TARİHİ YAPILARIN RESTORASYONU İÇİN YENİ NESİL HARÇLARIN GELİŞTİRİLMESİ

Tuğçe KAYA

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARİHİ YAPILARIN RESTORASYONU İÇİN YENİ NESİL HARÇLARIN GELİŞTİRİLMESİ

Tuğçe KAYA
0000-0002-9331-1339

Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN
(Danışman)

Prof. Dr. Ali MARDANİ
(2.Danışman)

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Tuğçe KAYA tarafından hazırlanan "TARİHİ YAPILARIN RESTORASYONU İÇİN YENİ NESİL HARÇLARIN GELİŞTİRİLMESİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Adem Doğangün

Başkan	:	Prof. Dr. Adem Doğangün 0000-0002-1867-7103 Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye	:	Prof. Dr. Hakan Tacettin Türker 0000-0003-0326-5015 Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye	:	Prof. Dr . Muhammed Bilal Bağbancı 0000-0001-9050-4488 Bursa Uludağ Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Anabilim Dalı	İmza
Üye	:	Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Özen 0000-0001-5522-427X Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye	:	Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Gökhan Altun 0000-0002-9345-9907 Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali KARA
Enstitü Müdürü
../../….

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

…/…/……

Tuğçe KAYA

TEZ YAYINLANMA
FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Danışman Adı-Soyadı Tarih	Öğrencinin Adı-Soyadı Tarih
İmza Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.	İmza Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ TEZ TANITIMI
ÖĞRENCİ VE DANIŞMAN FORMU

FR 3.4.6_27

ÖĞRENCİ
Adı SOYADI: Tuğçe Kaya
ÜNVANI :
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ABD
E-POSTA : tugce.isafca@gmail.com
ORCID : 0000-0002-9331-1339
TÜBİTAK ID : TBTK-0056-9646
WOS RESEARCHER ID :MXL-4657-2025
SCOPUS AUTHOR ID : 57697156000
Google Scholar ID : 4yETcioAAAAJ&hl

DANIŞMAN
Adı SOYADI: Adem Doğangün
ÜNVANI : Prof. Dr.
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ABD
E-POSTA : adogangun@uludag.edu.tr
YÖKSİS ARAŞTIRMACI ID : 12367
ORCID : 0000-0002-1867-7103
TÜBİTAK ID : TBTK-0007-9304
WOS RESEARCHER ID : AAR-6126-2020
SCOPUS AUTHOR ID : 6602349830
Google Scholar ID : j6e038oAAAAJ&hl

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ YÜKSEK LİSANS/DOKTORA EĞİTİMİ BOYUNCA

BİLİMSEL ÇALIŞMALARI VE FAALİYETLERİ*

1. İsafça, T., Karakuzu, K., Özen, S., Doğangün, A., & Mardani-Aghabaglou, A. (2021). Effects of material properties on the mechanical and durability behaviors of Khorasan mortar mixtures: a review. *Journal of Adhesion Science and Technology*, *35*(23), 2507-2528
2. İsafça-Kaya, T., Karakuzu, K., Özen, S., Mardani, A., & Doğangün, A. (2024). Effects of shrinkage reducing admixture and polypropylene fiber utilization on some fresh state, mechanical and durability properties of khorasan mortar. International Journal of Architectural Heritage, 18(1), 1-20.
3. İsafça-Kaya, T., Kaya, Y., Mardani, N., Mardani, A., & Doğangün, A. (2025). Improving Lime-Based Restoration Mortars: Effect of Type and Utilization Rate of Binder and Aggregate. Materials, 18(5), 96
4. Kaya, T. İ., Karakuzu, K., Özen, S., Doğangün, A., & Aghabaglou, A. M. (2022). Effect of polypropylene fiber and shrinkage reducing admixture utilization on water absorption of Khorasan mortar. Materials Today: Proceedings, 57, 730-733
5. Kaya, Y., Aytekin, B., Kaya, T., & Mardani, A. (2023). Investigation of pozzolanic activity of recycled concrete powder: effect of cement fineness, grain size distribution and water/cement ratio. Materials Today: Proceedings
6. Kaya, T. İ., Karakuzu, K., Mardani, A., & Doğangün, A. (2022). Yüksek sıcaklığın polipropilen lif takviyeli horasan harcının bazı özelliklerine etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (37), 96-101
7. İsafça, T.,&Doğangün, A., Bursa Ulu Cami'nin Taşıyıcı Sisteminin Yapısal Olarak İrdelenmesi, I. Uluslararası Bilim ve İnovasyon Kongresi, Denizli, Türkiye, 2019/8, 660-665.
8. Kaya, T. İ. & Doğangün, Major Damages In Turkish Hıstorıcal Mosques, 6. Uluslararası Erciyes Bilimsel Araştırmalar Kongresi. 2021.
9. İsafça-Kaya, T., Kaya, Y., Mardani, A., & Doğangün, A., Effect of Aggregate Type on Compressıve Strength Performance of Khorasan Mortar Mıxtures, UMTEB – XIV International Scientific Research Congress September 14-15, 2023 / Naples, Italy, 559-564.
10. Kaya T., Mardani A., Doğangün A., Kaya Y.(2023), Yüksek Dayanımlı Horasan Harcı Karışımı, Patent, Buluşun Başvuru Numarası: 2023/018412,
11. BAP , BURSİYER, Kuruma Büzülmesi Önleyici Katkı ve Sentetik Lif Kullanımının Horasan Harcının Reolojik, Mekanik ve Bazı Durabilite Özelliklerine Etkisi, Yürütülen Kuruluş: BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ, (Haziran 2020-Haziran 2022)
12. BAP, ARAŞTIRMACI, Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılmak Üzere Onarım Harçlarının Geliştirilmesi, Yürütülen Kuruluş: BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ (Devam ediyor).

***Makaleler, Bilimsel toplantılarda sunulan bildiriler, patentler, projeler, eğitimler vb. faaliyetler sıralanmalıdır.**

BİRLEŞMİŞ MİLLETLER SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA HEDEFLERİ

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Malzeme inovasyonu / yeniliği
İnşaat teknolojisi
Altyapı dayanıklılığı

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Tarihi mirasın korunması, Kültürel miras, Restorasyon, Geleneksel yapı malzemeleri

☐

Sürdürülebilir malzemeler, Çevre dostu inşaat, Düşük karbonlu malzemeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

☐

Anahtar Kelimeler

Anahtar kelimeler aşağıdaki bağlantı üzerinden seçilecektir.
https://incites.help.clarivate.com/Content/Resources/Docs/SDG2023.xlsx

ÖZET

Doktora Tezi

TARİHİ YAPILARIN RESTORASYONU İÇİN YENİ NESİL HARÇLARIN GELİŞTİRİLMESİ

Tuğçe KAYA

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN
2. Danışman: Prof. Dr. Ali MARDANİ

Bu tez çalışmasında, tarihi yapıların özgün malzeme özellikleriyle uyumlu, mekanik performansı artırılmış ve sürdürülebilir kireç esaslı bir tamir harcı geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, Anadolu'da yaygın olarak kullanılan Horasan harcının bileşenleri, fiziksel ve mekanik özellikleri, hasar mekanizmaları ve tamir malzemesi seçim kriterleri detaylı bir araştırma sonucunda incelenerek oluşturulmuştur. Elde edilen teorik veriler doğrultusunda beş aşamadan oluşan sistematik bir deney programı tasarlanmıştır. Birinci aşamada, harçların kuruma ve büzülmeye bağlı çatlak oluşumuna karşı performansını iyileştirmek amacıyla katkı maddeleri ile kuruma büzülmesinin kontrolü araştırılmıştır. İkinci aşamada, farklı puzolan tipleri ve inceliklerinin taze ve sertleşmiş harç özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Üçüncü aşamada, agrega tipi ve tane dağılımının mekanik performans üzerindeki rolü değerlendirilmiştir. Dördüncü aşamada, su/toplam kuru malzeme ve bağlayıcı/agrega oranlarının optimizasyonuna yönelik çalışmalar yürütülmüştür. Son olarak, beşinci aşamada geliştirilen optimum Horasan harcının performansı, geleneksel pişmiş kil tuğlalarla oluşturulmuş duvar prizması ve duvar örnekleri üzerinde basınç, kesme ve çapraz basınç deneyleriyle test edilmiş ve harç-tuğla arayüzü ve sistem davranışı analiz edilmiştir. Deneysel bulgular, geliştirilen harcın hem estetik hem de yapısal açıdan ideal özelliklere sahip olduğunu, tarihi dokuyu koruduğunu, endüstriyel üretim ve sürdürülebilir restorasyon uygulamaları için uygun olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, tarihi yapıların korunmasında bilimsel temelli, uzun ömürlü ve orijinal malzeme uyumlu çözümler sunmak açısından önemli bir katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kireç esaslı harç, Horasan harcı, Tarihi yapı onarımı, Malzeme optimizasyonu, Yığma duvar davranışı.

2025, vii + 128 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

DEVELOPMENT OF NEW GENERATION MORTARS FOR THE RESTORATION OF HISTORICAL STRUCTURES

Tuğçe KAYA

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN
Co-Advisor: Prof. Dr. Ali MARDANİ

This thesis study aims to develop a lime-based repair mortar that is compatible with the original material properties of historical structures, has increased mechanical performance and is sustainable. Within the scope of the study, the components, physical and mechanical properties, damage mechanisms and repair material selection criteria of the Khorasan mortar, which is widely used in Anatolia, were examined and created as a result of detailed research. A five-stage systematic experimental program was designed in line with the obtained theoretical data. In the first stage, the control of drying shrinkage with additives was investigated to improve the performance of mortars against crack formation due to drying and shrinkage. In the second stage, the effects of different pozzolan types and finenesses on fresh and hardened mortar properties were investigated. In the third stage, the role of aggregate type and grain distribution on mechanical performance was evaluated. In the fourth stage, studies were carried out for the optimization of water/total dry material and binder/aggregate ratios. Finally, in the fifth stage, the performance of the optimum Khorasan mortar developed was tested with pressure, shear and diagonal compression tests on wall prisms and wall samples formed with traditional baked clay bricks, and the mortar-brick interface and system behavior were analyzed. Experimental findings have shown that the developed mortar has ideal properties in terms of both aesthetics and structure, protects the historical texture, and is suitable for industrial production and sustainable restoration applications. This study makes an important contribution in terms of providing scientifically based, long-lasting and original material-compatible solutions in the protection of historical structures.

Key words: Khorasan mortar; fiber; chemical admixture; mechanical properties; durability performance

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince, değerli görüş ve önerileriyle bu sürecin yönlendirilmesine katkı sağlayan birinci danışmanım Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN ve ikinci danışmanım Prof. Dr. Ali MARDANİ'ye teşekkür ederim. Ayrıca, çalışmamın ilerleyişine katkı sağlayan ve desteklerini esirgemeyen tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. M. Bilal BAĞBANCI ve Sayın Prof. Dr. Hakan T. TÜRKER'e de teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince, deneysel ve akademik çalışmalarımda bana destek olan Dr. Öğr. Üyesi Süleyman ÖZEN, Dr. Kemal KARAKUZU ve Yük. İnş. Müh. Yahya KAYA ve İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemesi Laboratuvarı ekibine teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini her daim hissettiğim annem Yıldız İSAFÇA, babam Nezih İSAFÇA ve tüm aileme teşekkürlerimi sunarım.

Doktora eğitimim sırasında hayatıma dahil olan eşim Yahya KAYA ve varlığıyla bu süreci güzelleştiren canım oğlum Ömer KAYA'ya teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen FDK-2024-1965 ve OUAP (MH) 2020-4 numaralı projeler kapsamında yürütülmüştür.

Doktora eğitimim süresince almış olduğum burs desteği dolayısıyla Yükseköğretim Kurulu (YÖK) 100/2000 Doktora Burs Programı'na ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 2211-A programına teşekkür ederim.

Tuğçe KAYA
…/…/…….

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET....viii
ABSTRACT....ix
TEŞEKKÜR....x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ....xiii
1. GİRİŞ…… 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI....5
2.1. Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılacak Malzemenin Önemi....5
2.2. Tarihi Yapılarda Kullanılan Harçların Özellikleri....9
2.3. Harç Karışımlarını Oluşturan Bileşenler....11
2.3.1. Bağlayıcı....11
2.3.2. Agrega....22
2.3.3. Kimyasal Katkı....26
2.3.4. Lif Kullanımı....30
2.3.5. Diğer Malzemeler....33
3. MATERYAL ve YÖNTEM....37
3.1. Malzeme Özellikleri....37
3.1.1. Doğal hidrolik kireç....37
3.1.2. Puzolanlar....38
3.1.3. Agrega....43
3.1.4. Lif....46
3.1.5. Kimyasal Katkı....46
3.2. Karışımların Hazırlanması....47
3.2.1. Aşama 1: Horasan harcı karışımlarının büzülme davranışının incelenmesi....47
3.2.2. Aşama 2: Puzolan türü ve kullanım oranı ile kür şartlarının Horasan harcı karışımlarının dayanım performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi....49
3.2.3. Aşama 3: Agrega türü, elek aralığı ve kullanım oranlarının Horasan harcının dayanım performansına etkisinin incelenmesi....51
3.2.4. Aşama 4: Su/kuru malzeme oranı ve bağlayıcı/agrega oranının Horasan harcının dayanım performansına etkisinin incelenmesi....52
3.3. Tuğla yığma prizma ve duvar numunelerinin dayanım performanslarının incelenmesi (Aşama 5)....53
3.4. Çalışma Kapsamında Uygulanan Deneysel Yöntemler....55
3.4.2. Taze Hal Deneyleri....56
3.4.3. Sertleşmiş hal özellikleri....59
3.4.4. Analiz ve Mikroyapı incelemesi....65
3.4.5. Yığma prizma ve duvar modeli üzerinde gerçekleştirilen deneyler....65
4. BULGULAR ve TARTIŞMA....69
4.1. Aşama 1....69
4.1.1. Taze Hal....69
4.1.2. Sertleşmiş Hal Özellikleri....71
4.2. Aşama 2....93
4.2.1. Taze hal....93
4.2.3. Sertleşmiş hal....94
4.3.Aşama 3....97
4.3.1. Taze Hal....97
4.3.2. Sertleşmiş Hal....98

4.4. Aşama 4 101
4.5. Aşama 5: Yığma Numunelerde Mekanik Performans Değerlendirmesi 103
4.5.1. Yığma prizma numunelerinde gerçekleştirilen testler 103
4.5.2. Yığma duvar numunesi üzerinde gerçekleştirilen testler 106
5.SONUÇLAR 111
KAYNAKLAR 114
ÖZGEÇMİŞ 127

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simge	**Açıklama**
$CaCO_3$	Kalsiyum karbonat
CO_2	Karbondioksit
CaO	Kalsiyum oksit
$Ca(OH)_2$	Kalsiyum hidroksit
C_2S	Di-kalsiyum silikat
SiO_2	Silisyum oksit
Al_2O_3	Alüminyum oksit
Fe_2O_3	Demir oksit

Kısaltma	**Açıklama**
M.Ö.	Milattan önce
M.S.	Milattan sonra
NHL	Doğal hidrolik kireç
KK	Kızdırma kaybı
KBE	Kuruma büzülme engelleyici
PP	Polipropilen
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
XRD	X-ışını kırınımı
TGA	Termogravimetrik analiz

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No		Sayfa
Şekil 2.1	Tamir harcı olarak çimentonun kullanıldığı yapıda meydana gelen aşınma (Cinemre, 2019)	8
Şekil 2.2	Hava kirecinin kimyasal döngüsü (Gür, 2019)……	13
Şekil 2.3	Hidrolik kirecin kimyasal dönüşüm reaksiyonları……..	14
Şekil 2.4	Kireç ve puzolanik malzeme arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyon….	17
Şekil 2.5	Puzolanların sınıflandırılması (Bulut, 2007)……...	18
Şekil 2.6	Agregaların sınıflandırılması (Erdoğan, 2007)……	22
Şekil 2.7	a) İstanbul Üsküdar bölgesinde yer alan tarihi bir yapıya ait tuğla-kireç harcı örgüsü (Yüzer vd.,2015) b) Aigai arkeolojik alanında zemin kaplaması olarak kullanılan Horasan harcı (Böke, 2007)……...	23
Şekil 2.8	Türkiye'nin eş donma-çözülme çevrim sayısı kontur haritası……	29
Şekil 2.9	Liflerin sınıflandırılması (Chawla, 1998)……	31
Şekil 3.1	Eğilme ve basınç dayanımı deneyleri için hazırlanan kireç numuneleri	38
Şekil 3.2	Harman tuğlalarının çeneli kırıcı ile kırılması	43
Şekil 3.3	Agregaların tane dağılımlarının belirlenmesi	43
Şekil 3.4	Harç karışımlarında kullanılan agregalara ait gradasyon eğrisi	44
Şekil 3.5	Mermer tozu ve silis içerikli agregalar	45
Şekil 3.6	Lif içeren karışımın yayılma deneyi (%1,2 oranında)	48
Şekil 3.7	Yığma prizmaların temsili gösterimi (basınç ve kayma dayanımı için)	54
Şekil 3.8	Model yığma duvarın temsili gösterimi	55
Şekil 3.9	Harç karışımının yayılma miktarının ölçülmesi	57
Şekil 3.10	Harcın taze halde birim hacim ağırlığı ölçümü	58
Şekil 3.11	Hava içeriği deney cihazı	59
Şekil 3.12	Harç karışımlarının kuruma büzülme kalıplarına yerleştirilmesi	60
Şekil 3.13	Kuruma büzülmeye bağlı boy değişimi ölçümü cihazı	61
Şekil 3.14	Harç numunelerine eğilme deneyi uygulaması……...	62
Şekil 3.15	Harç numunelerine basınç deneyi uygulaması……	63
Şekil 3.16	Aşınma deneyi sırasında numunenin görünümü…….	64
Şekil 3.17	Numunelerin deney için hazırlanması…….	64
Şekil 3.18	Numunelerin maruz bırakıldıkları sıcaklığın zamana bağlı değişimi……..	65
Şekil 3.19	Yığma prizmaların basınç dayanımlarının belirlenmesi……..	66
Şekil 3.20	Yığma prizmaların kayma dayanımlarının belirlenmesi…….	67
Şekil 3.21	Yığma duvar modelinin diyagonal basınç deneyine tabi tutulması…….	68
Şekil 4.1	Lif içeren numunelerin eğilme (a) ve basınç (b) grafikleri	72
Şekil 4.2	Lifli harç karışımlarında gözlenen lif topaklaşması .....……	73
Şekil 4.3	a) Lifin yüzeyi,b) Zayıf aderans,c) Homojen dağılmama,d) Boşluklu yapı	74
Şekil 4.4	KBE katkılı numunelerin eğilme ve basınç dayanımları	75

Şekil No		Sayfa
Şekil 4.5	Lif + KBE katkılı numunelerin eğilme ve basınç dayanımları	77
Şekil 4.6	Numunelerin 28 ve 90. günlerdeki su emme değerleri	89
Şekil 4.7	Kuruma büzülmesine bağlı boy değişimleri ……...	81
Şekil 4.8	352 çevrim sonunda numunelerin kütle kayıpları	84
Şekil 4.9	90 gün kür sonrası yüksek sıcaklıkta numunelerin basınç dayanımları	86
Şekil 4.10	300 ve 600 °C'deki kütle kayıp oranları	89
Şekil 4.11	28 günlük XRD analizi: a) Kontrol b) KBE15 (C, Q, H, A)	90
Şekil 4.12	NHL (a) ve BP (b) numunelerine ait XRD desenleri	91
Şekil 4.13	NHL ve BP numunelerine ait TGA grafiği	94
Şekil 4.14	Farklı kür koşullarındaki 28 ve 90 günlük basınç dayanımları	95
Şekil 4.15	Harç numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı	99
Şekil 4.16	Mikroskop görüntüleri: a) Arayüz b) Tuğla-agrega c) Lif boşluğu	100
Şekil 4.17	28 günlük basınç dayanımları (harç karışımları)	101
Şekil 4.18	a) Dere kumu çatlak engeli b) Tuğla kırığı çatlağı	102
Şekil 4.19	Yığma prizma numuneleri üzerinde kesme dayanımı deneyinin gerçekleştirilmesi ……...	103
Şekil 4.20	Yığma prizma numuneleri üzerinde basınç dayanımı deneyinin gerçekleştirilmesi ……	104
Şekil 4.21	Taşıma ve yükleme sırasında kırılan duvar numuneleri	106
Şekil 4.22	Diyagonal basınç deneyi uygulanan yığma duvar numunesi ve meydana gelen hasar detayları ……...	107
Şekil 4.23	Diyagonal basınç deneyi sırasında duvar numunesine uygulanan yükün zamana bağlı değişim grafiği……...	107

ÇİZELGELER DİZİNİ

Şekil No		Sayfa
Çizelge 2.1	Tarihi harç ve sıva yapılarında çevresel ve onarım malzeme özelliği kaynaklı oluşan hasarlar ve nedenleri (Torraca, 1982) ..….	6
Çizelge 2.2	Bağlayıcı malzeme alanındaki kronolojik gelişmeler…..…….....	11
Çizelge 2.3	TS 459-1 Standardına göre doğal hidrolik kirecin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri (TS EN 459-1) …….	15
Çizelge 2.4	Roma ve Osmanlı döneminde kullanılan Horasan harcındaki tuğla agregasına ait oksitler (Uğurlu ve Böke, 2010) ……	24
Çizelge 2.5	Organik katkı kullanımının sınıflandırılması …….....	33
Çizelge 2.6	Geleneksel katkılar ve harç üzerindeki etkileri (Böke vd., 2004) …	35
Çizelge 3.1	Doğal hidrolik kirece ait fiziksel ve kimyasal özellikler ……..	37
Çizelge 3.2	Kireç numunelerinin eğilme ve basınç dayanımları …….....	38
Çizelge 3.3	Kullanılan tuğla tozunun fiziksel ve kimyasal özellikleri ……	39
Çizelge 3.4	Kontrol karışımı ve tuğla tozu ikameli harç karışımların basınç dayanımı ……...	40
Çizelge 3.5	TS 25'e göre puzolanik aktivite deneyinde kullanılan malzeme miktarları ……..	40
Çizelge 3.6	Kullanılan uçucu küle ait fiziksel ve kimyasal özellikler …….	41
Çizelge 3.7	Kullanılan yüksek fırın cürufuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler	42
Çizelge 3.8	Kullanılan metakaoline ait fiziksel ve kimyasal özellikler ……...	42
Çizelge 3.9	Harç karışımlarında kullanılan agregaların elek analizi sonuçları…	44
Çizelge 3.10	Harç karışımlarında kullanılan agregaların fiziksel özellikleri ……	46
Çizelge 3.11	Harç karışımlarında kullanılan polipropilen life ait fiziksel ve mekanik özellikler ……	46
Çizelge 3.12	Polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı özellikleri …	47
Çizelge 3.13	Glikol eter esaslı kuruma büzülme engelleyici katkı özellikleri …..	47
Çizelge 3.14	Karışımlarda kullanılan malzeme miktarları …….....	49
Çizelge 3.15	Harç karışımlarını oluşturan malzeme miktarları …….	51
Çizelge 3.16	Harç karışımlarında kullanılan malzeme miktarları …….	52
Çizelge 3.17	Harç karışımlarında kullanılan malzeme miktarları …….	53
Çizelge 4.1	Harç karışımlarının karışımların hedeflenen yayılma değerine ulaşmak için gerekli su azaltıcı katkı miktarı ……...	69
Çizelge 4.2	Harç karışımlarının taze hal birim hacim ağırlıkları ve hava içerikleri ……	71
Çizelge 4.3	Harç karışımlarının su azaltıcı katkı ihtiyacı ve yayılma değerleri...	93
Çizelge 4.4	Harç karışımlarına ait yayılma değerleri ……..	98
Çizelge 4.5	Yığma prizma numunelerine ait dayanım özellikleri ……...	104
Çizelge 4.6	Literatürde harman tuğlası kullanılarak hazırlanmış ve diyagonal basınç deneyi uygulanmış yığma duvar numunelerine özellikler ve test sonuçları……..	109

1. GİRİŞ

Binlerce yıllık çok katmanlı bir kültürel geçmişe sahip olan Türkiye, dünya üzerindeki en zengin kültürel miras alanlarından biri konumundadır. Anadolu coğrafyasında yaklaşık 8750 taşınmaz kültür varlığı bulunduğu, 2023 yılı itibarıyla bunlardan yaklaşık 5800 adedinin restorasyonunun tamamlandığı rapor edilmiştir (Vakıflar Genel Müdürlüğü, 2025). Söz konusu yapılar, yalnızca mimari değerleriyle değil aynı zamanda tarihsel sürekliliği temsil eden taşıyıcı bellek unsurları olarak da önem taşımaktadır. Bu kapsamda, tarihi yapılar kültürel varlıkların önemli bir bileşenini oluşturmakta ve koruma-restorasyon çalışmalarının merkezinde yer almaktadır.

Tarihi yapılar, inşa edildikleri dönemin mimari karakteristiklerini, yapım tekniklerini ve kullanılan malzeme teknolojilerini yansıtan özgün eserlerdir. Bu yapılara ilişkin dönemin analizinde, teknik ve teknolojik olanakları doğrultusunda seçilmiş uygun malzemelerin kullanıldığı anlaşılmaktadır. Ancak, zaman içerisinde maruz kaldıkları çevresel etkiler ve yapısal yükler, özellikle malzeme kaynaklı bozulmalarla birlikte fiziksel bütünlüğün zedelenmesine yol açabilmektedir. Nitekim, malzeme bazlı hasarlar tarihi yapıların stabilitesini ve çevresel etkilere karşı direncini ciddi şekilde zayıflatmaktadır (Gür, 2019). Bu durum, onarım süreçlerinde kullanılacak malzemenin seçiminde yüksek düzeyde dikkat ve özen gerektirmektedir.

Restorasyon uygulamalarında, yapının özgün malzemesi ile fiziksel, kimyasal ve mekanik açıdan uyum sağlayacak onarım harçlarının tercih edilmesi büyük önem arz etmektedir. Yapılan incelemeler, bu yapılarda çoğunlukla kireç esaslı harçların kullanıldığını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, özgün malzeme ile uyumsuzluk gösteren çimento esaslı harçların kullanımı, yapı üzerinde geri dönüşü olmayan zararlar doğurabilmektedir. Bu bağlamda, tarihi yapıların özgün malzeme karakteristiklerinin analiz edilmesi ve bu yapılarla uyumlu, yeni nesil onarım malzemelerinin geliştirilmesine yönelik bilimsel çalışmaların önemi giderek artmaktadır.

Ülkemizde yer alan pek çok tarihi yapı, özellikle Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı dönemlerinde, yığma yapı tekniği ile inşa edilmiştir. Bu yapılarda sıklıkla kullanılan Horasan harcı, kireç bağlayıcısı ve öğütülmüş pişmiş kil esaslı agregaların (kiremit,

tuğla vb.) birleşimiyle oluşturulan geleneksel bir harç türüdür. Estetik görünüm, suya karşı dayanıklılık ve uzun ömürlülük açısından sağladığı avantajlar nedeniyle, özellikle Osmanlı mimarisinde yaygın olarak kullanılmıştır (Akman ve ark., 1986; Böke ve ark., 2004).

Horasan harcının mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin geliştirilmesine yönelik araştırmalar, restorasyon uygulamalarının başarı düzeyini doğrudan etkileyen bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Yapılan bilimsel çalışmalar, bu tür kireç esaslı harçların bağlayıcı tipi, mineral ve kimyasal katkı içeriği ile lif ilavesi gibi parametrelerle güçlendirilmesinin mümkün olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, ülkemizde kullanılan geleneksel harçların özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik nitelikli Ar-Ge çalışmalarının teşvik edilmesi, restorasyon alanında sürdürülebilir ve etkili çözümlerin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır.

1.1.Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasının temel amacı, tarihi yapıların restorasyonunda kullanılmak üzere, özgün dokuyla kimyasal, fiziksel ve mekanik açıdan uyumlu, yüksek dayanım performansı gösteren ve endüstriyel ölçekte üretilebilecek bir harç karışımının geliştirilmesidir. Bu doğrultuda, geleneksel kireç esaslı bir harç türü olan Horasan harcının farklı karışım oranları kullanılarak mekanik performansının sistematik biçimde iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Araştırma kapsamında, harç karışımlarına farklı tür ve oranlarda puzolan, agrega, kimyasal katkı ve lif ilavesi yapılmış; su/kuru malzeme oranı ve bağlayıcı/agrega oranlarındaki değişimlerin harcın mekanik özelliklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmalar neticesinde, dayanım açısından optimum performans gösteren karışım oranı belirlenmiş, bu karışım ile yığma prizma ve duvar modelleri üretilmiştir. Hazırlanan numunelere uygulanan mekanik testler, geliştirilen harcın gerçek yapı uygulamalarındaki davranışını ortaya koymak amacıyla değerlendirilmiştir.

Gerçekleştirilen bu deneysel çalışma, restorasyon ve güçlendirme projelerinde kullanılacak uygun malzeme seçiminde karar vericilere rehberlik edebilecek nitelikte bilimsel veri sunmaktadır. Geliştirilen harç karışımı hem yapısal hem de estetik açıdan özgün dokuyla bütünlük arz etmekte; bu yönüyle tarihi yapıların korunmasına katkı sağlayacak yenilikçi ve sürdürülebilir bir çözüm önerisi sunmaktadır.

Tez kapsamında elde edilen bulgular, farklı karışım oranlarıyla üretilmiş hidrolik kireç esaslı harçların ve Horasan harcının dayanım ve durabilite özelliklerine ilişkin literatüre özgün katkılar sağlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, ilerleyen araştırmalara bilimsel bir temel oluşturma potansiyeline sahiptir.

1.2.Tezin Yöntemi

Tez çalışması, kapsamlı bir literatür taraması ile başlamış ve tarihi yapıların harç özellikleri, hasar mekanizmaları ve onarım malzemesi seçim kriterleri gibi temel konular detaylı olarak irdelenmiştir. Literatür değerlendirmesi sonucunda, özellikle kireç esaslı bağlayıcı sistemlerde kullanılan katkı ve agrega türleri, bağlayıcı-agrega oranları ile katkı malzemelerinin mekanik özelliklere etkisi analiz edilmiştir. Elde edilen bilgiler ışığında deneysel çalışmalarda kullanılacak malzeme türleri ve karışım oranları belirlenmiştir.

Tez kapsamında takip edilecek deneysel çalışma, beş temel aşamada gerçekleştirilmiştir:

1. Kuruma-Büzülme Kontrolü: Bu aşamada, polipropilen lif ve kuruma-büzülme engelleyici kimyasal katkılarla modifiye edilmiş harç karışımları hazırlanarak çatlak oluşumunun önlenmesi ve durabilite özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen numuneler üzerinde taze ve sertleşmiş hal deneyleri uygulanmıştır.
2. Puzolanik Katkıların Etkisi: İlk aşamada belirlenen temel harç karışımlar baz alınarak, puzolanik katkı türü ve oranı sistematik olarak değiştirilmiştir. Farklı puzolan tür ve oranlarının yanı sıra çeşitli kür koşullarının mekanik performans üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

3. Agrega Türü ve Granülometri Etkisi: Harç karışımlarında kullanılan agregaların türü ve tane dağılımının dayanım performansı üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiştir.
4. Karışım Oranlarının Optimizasyonu: Bağlayıcı/agrega ve su/kuru malzeme oranları sistematik biçimde değiştirilerek elde edilen numunelerin basınç dayanımları analiz edilmiş ve optimum karışım oranları belirlenmiştir.
5. Yığma Numuneler Üzerinde Mekanik Performans: Optimum karışım oranları ile hazırlanan harçlar, harman tuğlası ile birlikte kullanılarak yığma prizma ve duvar modellerinde uygulanmıştır. Bu numunelere uygulanan mekanik testler, geliştirilen harcın yapısal performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, başlangıçta tarihi yapıların inşası sırasında kullanılmış harçlar tanıtılmıştır. Ardından, günümüzde bu yapıların onarım çalışmalarında kullanılan harçların temel bileşenleri sınıflandırılmıştır. Bunun yanı sıra, harç karışımlarını oluşturan malzemelerin harcın fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerine olumlu ve olumsuz etkilerine de vurgu yapılmıştır. Konu ile ilgili yapılan ulusal ve uluslararası çalışmalar araştırılmış ve öz olarak sunulmuştur.

2.1. Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılacak Malzemenin Önemi

Kireç esaslı malzemelerde zaman içerisinde, çevre şartları, dinamik yükler, yangınlar, yapının kullanım şekli ve kullanılan malzemeye bağlı olarak çeşitli bozulmalar gerçekleşebilmektedir. Söz konusu zararlı etkiler, harç yapısının çatlamasına veya tamamen parçalanmasına, buna bağlı olarak da yapının stabilitesinin bozulmasına sebep olabilmektedir. Ayrıca, harcın agrega ve tuğla ile olan aderansının zayıflamasına ve harcın bağlayıcılık özelliğini kaybetmesine yol açabilmektedir. Örneğin, donma-çözülme döngüsüne maruz kalan malzemelerde çatlaklar oluşabilmektedir (Gür, 2019; Torraca, 1982). Ayrıca, ortamın nem durumuna bağlı olarak harçların yapısındaki suyun buharlaşması, büzülme çatlaklarına sebep olabilmektedir. Yine ortamın bağıl nemi, kalsiyum hidroksitin ($Ca(OH)_2$) karbonatlaşmasını ve hidrolik bağlayıcılar için kalsiyum silika hidratın (C-S-H) kararlılığını etkileyebilmektedir (Lanas ve ark., 2005; Zappia ve ark. 1998; Sánchez ve ark. 1997). Tasarım ve kötü işçilik kaynaklı sebepler de bu bozulmaları daha şiddetli bir hale getirebilmektedir (Ingham, 2009). Tarihi yapıların harç ve sıva bileşenlerinde, çevresel ve onarım malzemesi özelliği kaynaklı oluşan hasarlar ve bu hasarların nedenleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir (Torraca, 1982).

Çizelge 2.1. Tarihi harç ve sıva yapılarında çevresel ve onarım malzeme özelliği kaynaklı oluşan hasarlar ve nedenleri (Torraca, 1982)

Çevresel Kaynaklı Hasarlar		
Faktör	**Etki**	**Hasar Tipi**
Yağmur ve kar suları ile oluşan asidik sular (CO_2 ve SO_2 gibi)	Karbonatlarmış kirecin çözülmesi	Harcın yapışma ve bağlanma özelliklerini azaltır. Agregaları ayrıştırır
Sürekli donma- çözünme döngüsü	Genleşme sebebiyle bağlayıcı agrega ara yüzünün bozulması	Harcın çatlayarak bozulması
Aşırı miktarda su buharına maruz kalma (Yangın olaylarında)	Harcın taşıyabileceği kritik su buharı içeriği aşılabilir	Harcın katmanlar halinde dağılmasına sebep olur
Harçta kullanılan kumun kil içermesi	Nemli ortamda kilin şişmesi ve içsel gerilme oluşması	Harcın dağılması veya harç yüzeyinde bölgesel olarak şişmelerin oluşması
Deniz suyu, hava kirliliği veya harçta yabancı madde bulunması	Anyonik tuz kristalleri oluşabilir. Örneğin klorür, sülfat veya nitrat gibi	Harcın ayrışması, çatlak oluşumu ve bölgesel renk bozulmaları
Bitki oluşumu	Özellikle bazı bitki kökleri harçların çözülmesine yol açabilir	Biyolojik çürüme, harcın boyanması ve dağılması
Organik büyüme varlığı	Böceklerin oluşmasıyla harcın bağlayıcılığı zayıflar	Mikrobiyolojik çürüme ve harcın çözünmesi
Onarım Malzemesi Özelliği Kaynaklı Hasarlar		
Faktör	**Etki**	**Hasar Tipi**
Bağlayıcı olarak kireçten daha fazla çimento kullanımı	Aşırı sert harç oluşumu ve ayrışarak parçalanma	Suyun çatlaklar yoluyla harç içine difüzyonu ve harçta büzülme çatlağı oluşumu
Çimento kullanımından kaynaklı tuzlar	Harç yüzeyinde çiçeklenme	Tuzlar çiçeklenmeye sebep olarak içsel gerilmeleri arttırırlar
Sentetik reçine eklenmesi	Özgün harcın su ve su buharı geçişini engeller	Harç yüzeyinde ayrışmalarla birlikte kabuklanma oluşumu

Çizelge 2.1'den görüldüğü gibi söz konusu zararlı etkilerden dolayı harç yapısı çatlayarak veya tamamen parçalanarak stabilitesi bozulmuştur. Ayrıca, harcın agrega veya tuğla ile olan aderansı zayıflamış ve harç bağlayıcılık özelliğini kaybetmiştir. Bazı durumlarda da bu zararlı etkiler harç renginin bozulmasına sebep olmuştur. Yapıların onarımında kullanılacak malzemelerin niteliği onarım çalışmalarında dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan biridir. (Özgen, 2012). Hasar görmüş tarihi yapıların

onarımında kullanılacak malzeme, yapının orijinal malzemesi ile kimyasal, fiziksel ve mekanik açıdan uyumlu olmalıdır.

Türkiye'de kirecin elde edildiği kaynakları kısıtlı olması ve uygulama prosesinin uzun süreli olması sebebiyle tarihi yapıların onarımında beyaz Portland çimentosu veya kireç karışımlı çimentolu harç tercih edilmiştir (Gür, 2019). Ancak, Portland çimentosu, yüksek mukavemete sahip olması, düşük su buharı geçirgenliği ve kimyasal yapısı gereği tuz oluşumuna yol açması sebebiyle çeşitli hasarlara sebep olabilmektedir. Dolayısıyla, Portland çimentosu kullanılan onarımlarda, eski malzeme ile uyumsuzluk problemi ortaya çıkabilmektedir. Tarihi eserlerin onarımında Portland çimentosu harcının kullanılması sonucu gözlemlenen olumsuz etkiler aşağıda özetlenmiştir.

- Portland çimentosu kullanımı yapının özgün malzemesi ile uyum sağlamamakta, eski ve yeni harçlar arasında doku ve renk ayrımına sebep olarak estetik açıdan yapıyı etkilemektedir.
- Portland çimentosu ile hazırlanan onarım harçları, yapısı gereği düşük porozite ve yüksek mikroporozite özelliğine sahip olmaktadır. Dolayısıyla, yüksek su tutucu özelliğe sahip olduğundan rutubete yol açmaktadırlar.
- Bünyelerinde barındırdıkları $CaSO_4$, H_2O ve Na, K iyonları, NaOH, KOH ve havadaki CO_2 ile reaksiyona girerek Na_2CO_3, K_2CO_3 tuzları oluşmaktadır. Oluşan bu tuzlar ise, havada bulunan kükürt gazının etkisiyle Na_2SO_4 ve K_2SO_4'e dönüşebilmektedir. Harçların bünyesinde oluşan bu tuzlar, yapı taşlarında yüzey aşınmasına, yapının özgün harcında ise ayrışmalara sebep olmaktadır. Bununla birlikte bu tuzlar zaman içerisinde duvarlarda bulunan diğer tuzlarla da tepkimeye girebilmektedir. Böylece zararlı etkisi olan daha kompleks tuzların oluşmasına yol açabilmektedir.
- Portland çimentosu ile hazırlanan onarım harcının ısıl genleşme katsayısı tarihi yapıdaki harcınkine kıyasla daha yüksek olmaktadır. Bu sebeple olası sıcaklık farkında termal büzülme kaynaklı hasar oluşumunun olasılığı daha yüksek olmaktadır.
- Portland çimentosu harçlarının elastisite modülü ve basınç dayanımı genellikle geleneksel harçlara nazaran daha yüksek olmaktadır. Bu durumda onarım amaçlı kullanılan Portland çimentosu düzgün yayılı ve üniform yükü taşırken, daha zayıf

özellikte olan geleneksel harcın söz konusu yükleri taşıyamayarak ezilmesine sebep olabilmektedir (Ersen ve ark., 2016, Pusat, 2002).

- Çimento harcının, yapının özgün malzemeleriyle uyumlu olmaması nedeniyle tarihi yapıların onarımında kireç harcının kullanılması zorunlu hale gelmiştir (Cinemre, 2019).

Yukarıda belirtilen sebepler gibi çeşitli nedenlerden ötürü tarihi yapıların onarımı esnasında birçok uygulamada Portland çimento kullanımından kaçınılmaktadır. Ancak, çeşitli araştırmacılar tarafından yürütülen, belirli oranda çimento ikamesinin kireç esaslı harçların mekanik ve durabilite özelliklerine etkisinin incelendiği çalışmalar devam etmektedir (Gulbe, 2017; Pusat, 2002; Yılmaz, 2010; Silva ve ark., 2015). Onarım harcı olarak Portland çimentosunun kullanıldığı ve yapı ile uyumsuzluğun söz konusu olduğu bazı restorasyon çalışmaları Şekil 2.1'de verilmiştir.

Şekil 2.1. Tamir harcı olarak çimentonun kullanıldığı yapıda meydana gelen aşınma (Cinemre, 2019)

Daha önce de vurgulandığı gibi, tarihi yapıların onarımında Portland çimentosu gibi yapının özgün malzemesine uyumlu olmayan malzemelerin kullanılması çeşitli kimyasal hasarlara ve özgün duvar ile fiziksel ve mekanik özellikler açısından uyumsuzluğa sebep olmaktadır. Bu sebeple kireç esaslı karışımlara puzolanik malzemeler ve lif ilave edilerek harcın mekanik özellikleri arttırılmış, beton kadar dayanıklı aynı zamanda kireç gibi nefes alan bir harcın geliştirilmesi yönünde çalışmalar yapılmıştır (Gür, 2019; Lanas ve ark., 2003; Malinowski, 1981; Izaguirre ve ark. 2011).

2.2. Tarihi Yapılarda Kullanılan Harçların Özellikleri

Tarihi yapıların inşası sırasında yapıldığı dönemin teknik ve teknolojik imkanları dahilinde uygun malzemeler kullanıldığı anlaşılmıştır. Bu bağlamda tarihi yapılarda genel olarak taş, harç, sıva, ahşap, metal ve cam malzemeler kullanılmıştır.

Harçların genellikle yapının bulunduğu coğrafya, kültür ve dönemin özelliklerine bağlı olarak farklı karışımlar tasarlanarak üretimi sağlanmıştır. Harç, bağlayıcı, ince agrega ve su karışımından oluşan ve katılaşma özelliği gösteren bir yapı malzemesi olarak literatürde tanımlanmaktadır (Eriç, 2010; Debes, 1949). Eriç (2010)'e göre, harçlar; ana bağlayıcı malzemeleri (kil, alçı, kireç, çimento, melez) ve kullanım alanları (örgü, sıva, şap, şerbet) dikkate alınarak farklı sınıflarda incelenebilir. Sıva harçları, yapı yüzeylerinin korunması ve estetik görünümünün sağlanması için kullanılan, sürekli bir kaplama malzemesi iken; duvar örgü harçları, yapı elemanlarının birleştirilmesi ve yük transferinde önemli bir rol oynayan bağlayıcı bir malzemedir (Gür. 2019).

Ülkemizdeki tarihi yapıların pek çoğunun yığma yapım tekniği kullanılarak inşa edildiği bilinmektedir. Yığma elemanlar, taş, tuğla gibi yığma birimleri ve onları bir arada tutan harçlardan meydana gelmektedir (Kumble, 2023). Taş ve tuğla duvarlarda ilk kullanılan bağlayıcı malzeme çamur harcı olmuştur. Tarihsel süreçte, alçı, bitüm ve özellikle kireç gibi doğal malzemeler de yaygın olarak kullanılmıştır. Yaklaşık 600 yıl önce düşey fırınların geliştirilmesiyle kireç üretimi endüstriyel bir boyut kazanmış ve Yunan-Roma dönemlerinden günümüz çimentosunun keşfine kadar en önemli bağlayıcı malzemelerden biri olmuştur (Akman, 2003; Pekmezci, 2014). Kireç esaslı harçlar 20.

yüzyılda Portland çimentosunun yaygınlaşmasından önce, yapılarda en çok tercih edilen harç türüdür (Pozo-Antonio, 2015). Bu bağlamda, ülkemizde farklı dönemlerde inşa edilmiş tarihi yapılarda da sıklıkla kireç esaslı harçlarının kullanıldığı bildirilmiştir (Yüzer, 2015). Dönemin teknolojisine bağlı olarak bu harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin geliştirildiği görülmüştür. Örneğin, kireç esaslı harçlara çeşitli puzolanların ilave edilmesiyle hidrolik özellik kazandırılmıştır. Böylece harcın dayanımı arttırılmış ve geçirgenliği azaltılmıştır. Bununla birlikte, kireç esaslı harçlara at kılı ve saman gibi bitkisel lifler, yumurta, şeker ve meyve suyu gibi katkılar eklenerek harçların mekanik ve durabilite özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır (Nogueira, R. ve ark., 2018; Tekin ve Kurugöl, 2012; Brandt, 2008).

Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı dönemlerinde inşa edilen çok sayıda eserin Horasan harcı kullanılarak inşa edildiği vurgulanmıştır. Horasan isminin, İran'ın doğusunda yer alan Horasan bölgesinden geldiği bilinmektedir. Bunun dışında, Roma döneminde "cocciopesto", Yunanistan'da "korassani", Hindistan'da "surkhi", Arap devletlerinde "homra" olarak isimlendirilmiştir (Akman ve ark., 1986; Böke ve ark., 2004). Horasan harcı; bağlayıcı olarak hidrolik kireç, agrega olarak da kiremit ve tuğla gibi pişmiş killi malzemelerin öğütülerek karıştırılmasıyla elde edilen harç ve sıva çeşididir. Özellikle 15. yüzyıl ve sonrasından itibaren tarihi yapılarda yüksek dayanım ve dayanıklılık özelliklerinden dolayı köprü, yapı temelleri, cami, su kemeri, su kuyusu ve sarnıç gibi su etkisine maruz kalan yapılarda sıklıkla kullanıldığı beyan edilmiştir (Mavioğlu, 2011). Ayrıca gerek estetik yönü gerek dayanıklılık performansı bakımından diğer harçlara karşı üstünlüğü nedeniyle horasan harcının Osmanlı döneminde sıklıkla tercih edildiği ifade edilmektedir (Akman ve ark., 1986).

Yığma yapıların bütünlüğünü sağlayan örgü harcı, yapının dış yüklere karşı gösterdiği direncin temel belirleyicilerinden biridir. Harcın bileşimindeki malzemelerin türü, oranları ve işçilik kalitesi, yapının ömrü boyunca maruz kalacağı yükler karşısında gösterdiği davranışı doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, tarihi ve kültürel mirasımızın önemli bir parçası olan yığma yapıların restorasyonunda uygun harç seçimi büyük önem taşımaktadır. Bu seçimin en uygun şekilde yapılabilmesi için ise harç karışımlarını oluşturan bileşenlerin harcın dayanım ve durabilite özelliklerine etkisi iyi bir şekilde belirlenmelidir.

2.3. Harç Karışımlarını Oluşturan Bileşenler

2.3.1. Bağlayıcı

Hidratasyon adı verilen bir süreç sonucu sertleşen bağlayıcılar, yapı malzemesi karışımlarına dayanım ve bütünlük kazandırır. Priz olayı, fiziko-kimyasal bir süreç ile gerçekleşmektedir (Gür, 2019). Priz sürecinin tamamlanmasının ardından bağlayıcı maddelerin fiziksel mukavemet kazanmasını sağlayan sertleşme süreci başlamaktadır. Bağlayıcılar sertleşme şekline göre 2 gruba ayrılmaktadır. Çimento, alçı, hidrolik kireç gibi suyun varlığında dayanım kazanan bağlayıcılar hidrolik bağlayıcı; hava kireci gibi sadece havada dayanım kazanan bağlayıcılar ise hava bağlayıcıları olarak isimlendirilmektedir (Gür,2019; Pusat, 2002; Postacıoğlu, 1981).

Bağlayıcı ve sıva malzemeleri ile ilgili araştırmaların Neolitik çağında başladığı beyan edilmiştir (Gani, 1997). Tarihi yapılarda kullanılan bağlayıcıların kronolojik gelişimi Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Bağlayıcı malzeme alanındaki kronolojik gelişmeler (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Dönem	Bağlayıcı Alanında Gelişmeler
M.Ö.8000 Öncesi	Killi toprakların bağlayıcılık potansiyelinin keşfi
M.Ö.8000-M.Ö.4500	Alçı ve kirecin bilinçli olarak üretimi
M.Ö.4500-M.Ö.300	Kireç, alçı ve killi topraklardan üretilen harçların kullanımı
M.Ö.300-M.S.1453	Roma'da puzolan karışımlı harçların hidrolik bağlayıcılığının keşfi
1453- 1690	Osmanlıda horasan harcının üretilme ve yaygın kullanımı
1690- 1790	Eddystone deniz fenerinin yapımı
1790- 1800	İngiltere'de doğal çimento üretimi ve kullanımı
1800- 1824	Hidrolik kireç bağlayıcının üretimi ve gelişimi
1824- 1850	Portland çimentosunun üretimi
1850- 1865	Betonarme malzemenin kullanılmaya başlanması
1865 1900	Bağlayıcı malzemeler ve beton için temel deney yöntemlerinin standardizasyonu
1900- 1910	Hazır beton üretimi

Çizelge 2. 1. Bağlayıcı malzeme alanındaki kronolojik gelişmeler (Erdoğan ve Erdoğan, 2007). (Devam)

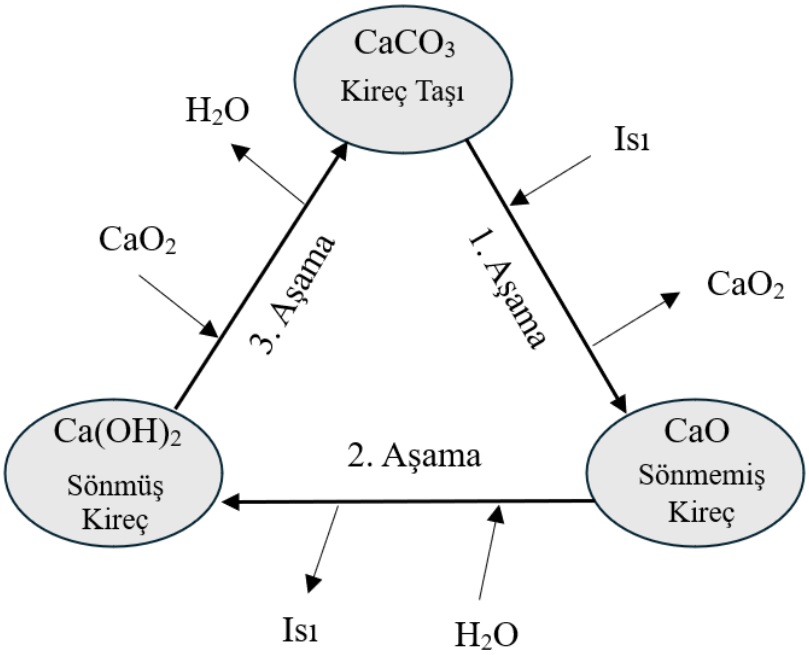
Dönem	Bağlayıcı Alanında Gelişmeler
1910- 1920	Türkiye'de ilk çimento fabrikasının kurulması
1920- 1930	Öngerilmeli beton üretimi
1930- 1950	Betonun pompa gücü kullanılarak taşınması ve vibrasyon uygulaması
1950- 1970	Kimyasal ve mineral katkı malzemelerinin geliştirilmesi
1970- 1980	Lifli beton kullanımı

Çizelge 2.2'de görüldüğü gibi M.Ö 8000 yıl öncesinden killi toprakların bağlayıcılık potansiyeli keşfedilmiş farklı çağlarda gelişerek günümüze kadar devam etmiştir. İlk yıllarda kil ve kireç içerikli malzemelerin bağlayıcı olarak kullanıldığı, daha sonraki dönemlerde çimentolu sistemlere geçiş yapıldığı anlaşılmıştır.

Kireç

Kireç, tarihi yapıların inşasında kullanılan en önemli bağlayıcı malzemelerden birisidir. Yapılarda kullanılan kirecin üretimi ve bağlayıcılık kazanma prosesi Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Öncelikle doğadan elde edilen kireçtaşının ($CaCO_3$) fırınlarda veya ocaklarda 700-900°C'de ısıtılmasıyla bünyesindeki CO_2 gazı ayrılır ve sönmemiş kireç (CaO) elde edilir (TS EN 459-1). Bu işleme kalsinasyon adı verilir (Şekil 2.2- 1. aşama). Sönmemiş kirecin gerekli miktarda su ile hidratasyonu neticesinde söndürme işlemi yapılarak sönmüş kirece ($Ca(OH)_2$) dönüştürülür. (Şekil 2.2- 2.Aşama) (Erdoğan, 2009). Kaliteli ürün elde edilebilmesi için kirecin ağırlıkça 1/3'ü oranında su ile söndürülmesi önerilmiştir. Söndürme işlemi sırasında kireç hacminde artış meydana gelmektedir. Bu nedenle söndürme işlemini tamamı gerçekleşmeden yapıda kullanılması, büyük hasarlara yol açabilmektedir. Söndürme işleminin tamamlanması için kireç taşının en az iki hafta süre ile söndürme havuzunda bekletilmesinin gerekli olduğu bildirilmiştir (Mehta ve Monteiro, 2006).

Hidrolik olmayan kireç harçları, kirecin havada serbest bulunan CO_2 ile tepkimesi sonucu $CaCO_3$ dönüşmesiyle dayanım kazanmaktadır (Şekil 2.2- 3.Aşama). Bu sertleşme işlemi kirecin dış yüzünden iç yüzüne doğru zamanla gerçekleşen bir olaydır (Böke ve ark., 2004; Dayı, 2017).

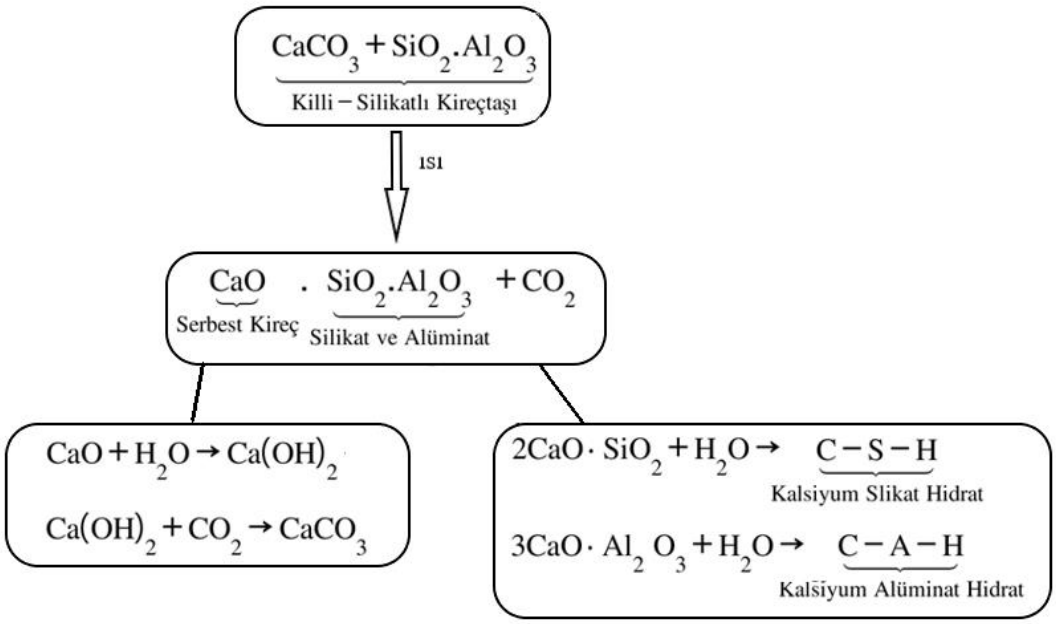


Şekil 2.2. Hava kirecinin kimyasal döngüsü (Gür, 2019)

Hidrolik kireç

Hidrolik kireç, saf kireçten farklı olarak içerisinde bulunan di-kalsiyum silikat (C_2S) bileşeni sayesinde çimentoya benzer hidratasyon gerçekleştirerek su altında da sertleşebilen bir kireç türüdür ve saf kirece kıyasla daha yüksek ve hızlı bir şekilde dayanım kazanmaktadır.

Kil içeren kireçtaşının kireç ocağında kalsine edilmesi sonucu, yüksek sıcaklıkta gerçekleşen silika-kireç reaksiyonu ile C_2S oluşur. Oluşan C_2S, söndürme aşamasında su ile reaksiyona girerek hidratlı kalsiyum silikat (C-S-H) üretilir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Hidrolik kirecin kimyasal dönüşüm reaksiyonları (Gür, 2019; Torraca, 2009)

%10-15 oranında kil içeren kireçtaşı kalsinasyonu, sıradan sönmemiş kireçten farklı bir ürün ortaya çıkarır; bu kireç çukurda söndürülemez, çünkü sertleşir ve kullanılamaz hale gelir. Az miktarda su püskürtülerek elde edilen toz, kumla karıştırılarak uygulama öncesinde su eklenmelidir. Bu tür kireç, nemli ortamda sertleşerek yüksek dayanımlı harç üretebilir.

Kireç üretim işlemi, kullanıma hazır sönmüş toz kireç, ince öğütülmüş sönmemiş toz kireç, standart sönmemiş kireç ve yerinde söndürülecek kireçler olarak farklı ülkelerde farklılık göstermektedir (Faria ve ark., 2008).

Killi-silisli kireçtaşlarının ısıtılıp öğütülmesiyle elde edilen ve katkı içermeksizin hidrolik özellik gösteren kireçler, doğal hidrolik kireç olarak adlandırılır. Belirli miktarda serbest kireç içeren bu malzemeler, TS EN 459-1 standardına göre 28 günlük minimum basınç dayanımı değerlerine göre sınıflandırılır (Çizelge 2.3).

Çizelge 2.3. TS 459-1 Standardına göre doğal hidrolik kirecin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri (TS EN 459-1)

Kireç Tipi	$Ca(OH)_2$ içeriği (%)	7 günlük basınç dayanımı (MPa)	28 günlük basınç dayanımı (MPa)
NHL 2	≥35	-	2-7
NHL 3.5	≥25	-	3-10
NHL 5	≥15	≥2	5-15

Hidrolik kireçlerin bir başka türü de yapay hidrolik kireçlerdir. Yapay hidrolik kireçler, puzolanik veya hidrolik malzeme eklenerek hidrolik özellik kazanan hava kireçleridir ve formüle edilmiş kireç (FL) ile hidrolik kireç (HL) olmak üzere iki sınıfa ayrılır. FL, yüksek kalsiyum hidroksit içeriğine sahip puzolanik ve/veya hidrolik kireç katkılı kireçleri ifade ederken, HL, çimento, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi katkılarla hidrolik özellik kazanan düşük kalsiyum hidroksit içerikli kireçlerdir (Gür, 2019; TS EN 459-1).

Horasan harçlarında kullanılan kirecin sönme süresi uzun tutulduğunda harçların işlenebilirlik özelliğinin olumlu yönde etkilendiği bilinmektedir. Bu durumda, karışımlarda istenilen işlenebilirliği sağlamak için su gereksinimi azalmaktadır. Dolayısıyla, kapilarite katsayısının daha düşük, tanecik dağılımı ve kireç-agrega aderansının ise daha yüksek olması beklenilmektedir. Bu durum aynı zamanda, kirecin CO_2 ile daha hızlı reaksiyona girerek daha hızlı sertleşmesini sağlamaktadır (Margalha ve diğ., 1985; Grilo ve ark., 2014). Ayrıca kirecin elde edilmesinde kullanılan kireç taşının kimyasal kompozisyonu, tane büyüklüğü, gözenekliliği, içerisinde bulunan kalsiyum karbonat kristallerinin büyüklükleri, kireç taşının kalsinasyon süresi ve kalsine edildiği fırın sıcaklığı, sönmemiş kirecin saflığı, parçacık büyüklüğü, söndürme işlemi sırasında kullanılan suyun saflığı, karıştırma süresi ve sıcaklık gibi faktörlerde kirecin kalitesini etkilemektedir (Böke ve ark., 2007).

Canbaz ve Güler (2017) kireç türünün Horasan harcının özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla kireç taşının kendisinin iki katı su ile söndürülmesi sonucu oluşan yağlı kireç (hava kireci), ve hidrate kireç kullanılmıştır. Yağlı kireç ile üretilen harç numunelerinin mekanik ve fiziksel özelliklerinin daha üstün olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte hidrate kireçli Horasan harçlarında pişmiş kil tozu-kireç

oranın artmasıyla eğilme ve basınç dayanımı artmıştır. Yağlı kireçli harçlarda ise bu durumun tersi gözlemlenmiştir.

Çimento ve kireç esaslı harçların sahip olduğu dezavantajlar nedeniyle tarihi yapıların korunma çalışmalarında hidrolik bağlayıcılar içeren harmanlanmış harçların kullanımı yaygınlaşmıştır. Ancak, bu tür harçların özellikleri ile ilgili bilgi eksikliğinin olduğu anlaşılmıştır. Silva ve arkadaşları (2014), sönmüş ve hidrolik kirecin harmanlanmasıyla oluşturulmuş harç karışımında hidrolik kireç içeriğinin harcın mekanik ve geçirgenlik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla, kütlece %0-100 arasında 5 farklı oranda hidrolik kireç sönmüş kireçle ikame edilerek farklı harç karışımları hazırlanmıştır. Hidrolik kireç içeriğinin artışıyla karışımın sünekliğinin ve boşluk oranının azaldığı, buhar geçirgenliğinin ise hafif bir azalma gösterdiği anlaşılmıştır. Bu doğrultuda çekme dayanımının etkilenmediği ancak basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Fakat bu artışın doğrusal olmadığı vurgulanmıştır. Hidrolik kirecin ikame oranının artışıyla bu etki daha da belirgin olmuştur. Hava kireci içeren harç karışımlarında uzun priz süresi gibi dezavantajların gözlemlendiği bildirilmiştir. Ancak, %25'in üzerinde hidrolik kireç takviyesinin karışımların mekanik ve taze hal özelliğini olumlu etkilediği beyan edilmiştir.

Lanas ve arkadaşları (2003) bağlayıcı/ agrega oranının kireç esaslı bağlayıcıların mekanik özellikleri ve boşluk yapısına etkisini araştırmıştır. Bu amaçla, 2 tür hava kireci kullanılarak 1:1, 1:2, 1:3,1:4 ve 1:5 bağlayıcı/agrega oranında farklı karışımlar hazırlanmıştır. 28 ve 365 günlük numunelerin basınç ve eğilme dayanımları arasında büyük bir farkın olduğu anlaşılmıştır. Bağlayıcı/agrega oranının 2:1'e kadar artışıyla karışımın dayanım özelliğinde iyileşmeler gözlemlenmiştir. Bağlayıcı içeriği artışıyla, kılcal boşlukların artışından dolayı karbonatlaşma daha kısa sürede gerçekleşmektedir. Ancak, sistemde aşırı miktarda bağlayıcının var olması boşluk hacminin artmasına yol açacağından dayanımı olumsuz etkilemektedir.

Lanas ve arkadaşları (2004) bağlayıcı/agrega oranı ve agrega tane şeklinin değişiminin doğal hidrolik kireç esaslı harçların dayanım performansına etkisini araştırmışlardır. Bağlayıcı içeriğinin artışıyla karışımların basınç ve eğilme dayanımlarında artış gözlemlenmiştir. Karışımlarda yuvarlak şekilli agrega kullanılması durumunda agrega-

bağlayıcı aderansı azaldığından dayanımlarda düşüş gerçekleşmiştir. Köşeli agrega kullanımının dayanım performansını olumlu etkilediği anlaşılmıştır.

Puzolan

Puzolan ismi, Roma kenti Puteoli (günümüzde Pozzuoli) yakınlarında, volkanik kül birikimiyle oluşmuş bir topraktan gelmektedir. Geçmişte puzolanı değerli kılan özellik, oda sıcaklığında kireç ve su ile reaksiyona girerek hava gerektirmeden sertleşebilmesidir; bu süreç nemli ortamlarda, su altında veya kalın duvarların içinde gerçekleşebilir (Torraca, 1982).

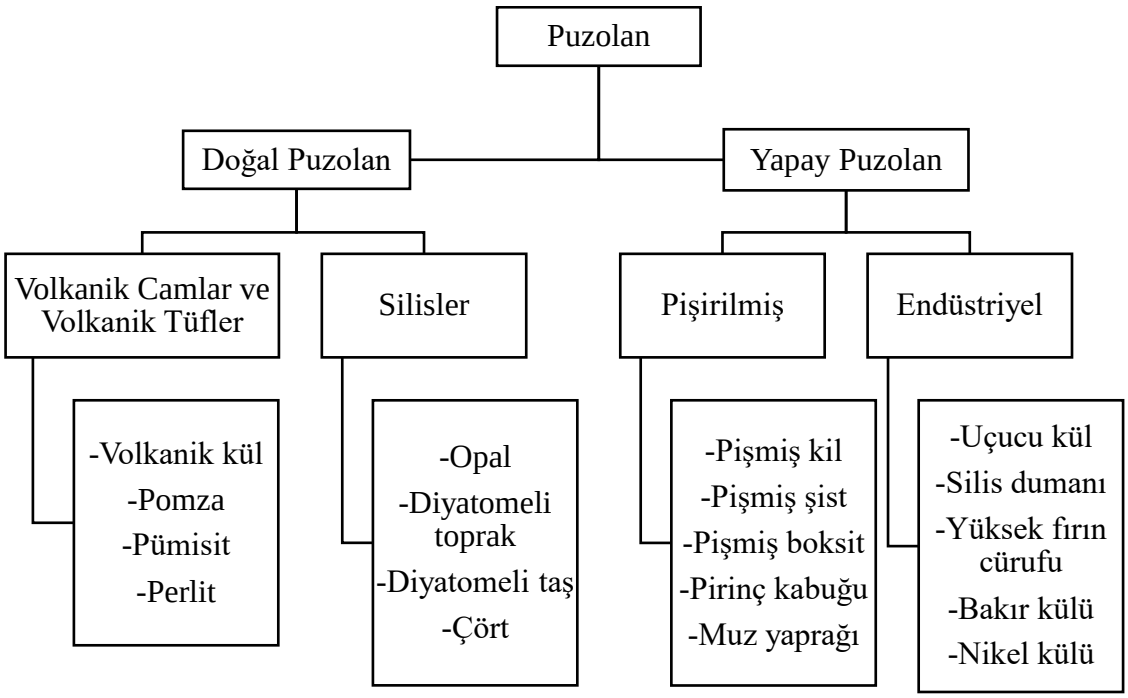
Puzolanlar, tek başına kullanıldığında bağlayıcılık özelliği olmayan veya çok az olan malzemelerdir (Erdoğan ve Erdoğan, 2005). Ancak ince öğütüldüğünde, Portland çimentosu ve kireç ile birlikte kullanıldığında bağlayıcılık özelliği kazanan silikatlı veya alüminatlı malzemelerdir. Nemin varlığında puzolanların yapısındaki reaktif silis ile kirecin yapısındaki ($Ca(OH)_2$'nin reaksiyonu sonucu bağlayıcılık özelliği olan C-S-H jeli oluşmaktadır (Şekil 2.4).

$$\underbrace{Ca(OH)_2}_{\text{Sönmüş kireç}} + H_2O + \underbrace{SiO_2.Al_2O_3}_{\text{Puzolan}} \rightarrow \begin{matrix} CSH \\ CAH \end{matrix}$$

Şekil 2.4. Kireç ve puzolanik malzeme arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyon

Kireç esaslı bağlayıcı malzemeler çimento esaslı malzemelere kıyasla dayanım gelişme hızı ve nihai dayanım açısından daha düşük performans sergilemektedir. Kireç esaslı bağlayıcılara puzolan ilave edilmesiyle gerçekleşen puzolanik reaksiyon sonucu bazı mekanik ve dayanıklılık özellikleri iyileştirilebilmektedir (Vavričuk vd, 2018). Puzolanik reaksiyonun ne mertebede gerçekleştiği ise puzolanın silis+alümin+demir oksit içeriği, amorf yapısı ve inceliğine bağlıdır (Erdoğan, 2003).

Elde ediliş şekillerine göre puzolanlar doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Doğal ve yapay puzolanlar da kendi içinde sınıflandırılmaktadır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Puzolanların sınıflandırılması (Bulut, 2007)

Doğal Puzolanlar

Doğal puzolanlar üretimi sırasında öğütme haricinde bir sürece tabi tutulmadan, su ve kalsiyum hidroksit ile tepkimesi sonucunda hidrolik bağlayıcılık özeliği gösteren silisli ve alüminli malzemelerdir (Tokyay, 2016, Erdoğan, 2003).

İnce silisli topraklar haricinde tüm doğal puzolanlar, volkanik kayaçlar ve minerallerden meydana gelmektedir. Volkanik patlama sırasında, alüminosilikatlardan oluşan magmanın hızlı soğuması, düzensiz bir yapıya sahip camsı fazlarının oluşumuyla sonuçlanır. Magma katılaşırken çözünmüş gazların eşzamanlı gelişimi nedeniyle, katılaşmış madde genellikle gözenekli bir doku ve kimyasal reaktivitesini artıran yüksek yüzey alanı elde eder. Alkalin çözeltilerine maruz kalan, düzensiz yapıya sahip alüminosilikatlar kararlı değildir. Bu yüzden volkanik camlar nemli bir ortamda kireç veya Portland çimentosu ile puzolanik aktivite sergiler. Doğal puzolanların sınıflandırılması, nadiren sadece bir reaktif bileşen içerdiklerinden, oldukça zordur. Ancak içerdikleri ana bileşen esas alınırsa, volkanik cam, volkanik tüf, kalsine kil veya şeyl ve silisli toprak olarak bir sınıflandırma yapılabilir (Mehta ve Monteiro, 2006).

Türkiye, bir doğal puzolan türü olan volkanik tüf açısından oldukça zengindir. 12. yy'ın başlarına ait olan, İstanbul'da bulunan Anemas Zindanlarının onarımı için hava kirecine hidrolik özellik kazandırmak amacıyla volkanik tüf kullanılmıştır. Gürdal vd. (2009) onarım malzemesi olarak hazırlanan karışımda ince öğütülmüş tüfün kireç ile birlikte kullanılmasıyla dayanım, su emme ve boşluk özelliği açısından olumlu etkisi olduğunu beyan etmişlerdir.

Bulut (2007) tarafından yapılan bir çalışmada, ham perlitin puzolanik aktivitesi ve perlit içeren kireç harcının yapı malzemesi olarak kullanılabilirliği incelenmiştir. Bağlayıcı olarak sönmüş kireç kullanılması durumunda, kireç/puzolan oranının 1:2, su/bağlayıcı oranının 0,5 olması ve kür sıcaklığının 55˚C derecede tutulması perlit içeren karışımlarda puzolanik aktivite açısından en uygun koşul olarak belirlenmiştir. Karışıma kalsiyum klorür ve sodyum sülfat eklenmesi kirecin su emici özelliğini arttırarak karbonatlaşmasını kolaylaştırmıştır. Dayanım özelliği açısından sodyum sülfat içeren numunelerin kalsiyum klorür içeren numunelere kıyasla daha başarılı olduğu bildirilmiştir. Ancak, su emme deneyi açısından bu durumun tersi gözlemlenmiştir.
Bir diğer çalışmada, çeşitli doğal ve yapay puzolanların, TS25 standardına göre puzolanik aktivite değerleri kıyaslanmıştır. Bu amaçla volkanik tüf, pomza ve perlit temin edilmiştir. Perlit ve pomzanın puzolanik reaksiyon göstermediği beyan edilmiştir. (Gür, 2019).

Mavioğlu (2011), ince öğütülmüş pomza taşı ve tuğla tozu kullanımının Horasan harcının dayanım, su emme ve rötre davranışı ile boşluk yapısına etkisini araştırmıştır. Bu amaçla, pomza taşı ve tuğla tozu %20 oranında bağlayıcı olan kireçle ikame edilerek toplamda 3 seri karışım tasarlanmıştır. Bağlayıcı/agrega oranı 1:2, 1:3 ve 1:4 olarak değiştirilerek toplamda 9 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışımların dayanım değerlerinin zamanla arttığı beyan edilmiştir. Bu artışın puzolanik katkı içeren karışımlarda daha bariz olduğu vurgulanmıştır. Karışımlara puzolan ilavesiyle gözenekliliğin, su emme ve rötre değerlerinin azaldığı söylenmiştir. Tuğla ve pomza tozunun benzer performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Yapay Puzolanlar

Yapay puzolanlar, puzolanik özelliği çok düşük ya da hiç olmayan malzemelerin ısıl işlem görmesi ile veya endüstriyel üretim sırasında, ürünlerin ani ısınıp soğumaya maruz kalmasıyla endüstriyel olarak elde edilebilmektedir (Tokyay, 2016). Kömürün yanması sonucu ortaya çıkan uçucu kül, çeşitli metalürjik işlemler sonucu oluşan silis dumanı, demirli ve demirsiz metal endüstrisinden elde edilen granüle cüruf yapay puzolan çeşitlerindendir (Mehta ve Monteiro, 2006).

Yapay puzolanların kireç esaslı harçlara etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. İlgili çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Memiş vd. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada farklı sıcaklık ve sürelerde kalsine edilmiş killerin kireç harcına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla 3 farklı kil, 3 farklı sıcaklıkta (600, 800 ve 1000˚C) ve sürede (1, 2 ve 4 saat) kalsine edilmiştir. Elde edilen kalsine edilmiş kil malzemeleri ağırlıkça %20, 50 ve 75 oranlarında sönmüş kireç ile ikame edilmiştir. Taze hal özelliği, dayanım ve boyutsal kararlılık performansı açısından en ideal pişirme sıcaklığının 800 ˚C, pişirme süresinin 2 saat ve ikame oranının %50 olduğu bildirilmiştir.

Metakaolin kullanımının hidrolik kireç esaslı restorasyon malzemesinin dayanım özelliklerine etkisi Vavričuk vd. (2018) tarafından araştırılmıştır. Bu amaçla 2 farklı metakaolin ağırlıkça %10, 20 ve 30 oranlarında doğal hidrolik kireçle ikame edilerek harç karışımları hazırlanmıştır. Metakaolin kullanımının sabit kıvam için su gereksinimini arttırdığı vurgulanmıştır. Metakaolin kullanımı ve kullanım oranın artışıyla karışımların basınç dayanımı artmıştır. Yüzey alanı ve Al_2O_3 içeriği daha yüksek olan, daha az mullit içeren metakaolin ikamesinin karışımların basınç dayanımı açısından daha başarılı olduğu bildirilmiştir. Metakaolin içeren doğal hidrolik kireç harçlarının tarihi yığma yapıların onarımında kullanımının daha yüksek basınç dayanımı ve aderans sağladığı bildirilmiştir.

Yüksek fırın cürufu ve bazalt lif kullanımının restorasyon harçlarının sülfat direncine etkisi Demircan ve Kaplan (2017) tarafından araştırılmıştır. Bu amaçla %25, 50 ve 75 oranlarında yüksek fırın cürufu ve %0,5, 1 ve 1,5 oranlarında bazalt lif ağırlıkça hidrolik

kireç ile ikame edilerek 9 farklı seri harç karışımı hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda su/bağlayıcı ve agrega/bağlayıcı oranları sırasıyla, 0,5 ve 1 olarak sabit tutulmuştur. Lif kullanımı ile karışım işlenebilirliğinin ve basınç dayanımının olumsuz etkilendiği bildirilmiştir. Yüksek fırın cürufu içeren karışımların sülfat direnci açısından üstün performans gösterdiği beyan edilmiştir. Cüruf içeriğinin artışıyla bu etkinin daha da bariz olduğu gözlemlenmiştir. İşlenebilirlik, dayanım ve sülfat direnci açısından optimum lif kullanım oranının %0,5 ve cüruf oranının %50 olduğu tespit edilmiştir.

Andrejkovičová vd. (2014) tarafından yürütülen çalışmada, metakaolin içeren hava kireci esaslı harç karışımlarının mekanik özelliklerine kil minerallerinin etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, hava kireci: kum oranı 1:3 olan iki farklı harç seti hazırlanmıştır. İlk set hava kireci ve %20 ağırlık oranında, daha fazla safsızlık (sırasıyla kalsit ve kaolinit) ve ikinci setteki malzemelere kıyasla daha yüksek yığın yoğunluklu metakaolin içermektedir. Harçlara, kil mineralleri (sepiolit, zeolit, paligorskit ve vermikülit) katkı maddesi olarak eklenmiş ve 28, 90 ve 180 günlük mekanik dayanımları değerlendirilmiştir. Birinci set harçlarda kil mineralleri ve/veya metakaolin kullanımı, özellikle ileri yaşlarda mekanik dayanımı artırmıştır. İkinci set harçlarda ise bağlayıcı eksikliği nedeniyle katkı maddeleri sınırlı bir etki göstermiştir. Sadece paligorskit eğilme dayanımını artırırken, vermikülit ve metakaolin, basınç dayanımı açısından daha iyi performans göstermiştir.

Puzolanik özellik gösteren çeşitli malzemelerin harç karışımları üzerindeki etkisi birçok araştırmacı tarafından incelendiği literatürden de anlaşılmıştır. Konu ile ilgili elde edilen başlıca sonuçlar özetlenmiştir;

- Harç karışımlarına eklenen puzolanik katkının türü, miktarı, fiziksel ve kimyasal özelliklerinin harcın mekanik ve durabilite özelliklerini etkilediği
- Puzolanın inceliğinin ve reaktif SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3 miktarının puzolanik reaksiyonu kontrol ettiği (Mavioğlu, 2011)
- Metakaolin, yüksek fırın cürufu ve uçucu külün agrega yerine ikame edilmesinin Horasan harcının fiziksel ve mekanik özelliklerini olumlu etkilediği (Işıkdağ vd., 2013, Işıkdağ vd, 2014, Vavričuk vd, 2018)

rapor edilmiştir.

2.3.2. Agrega

Agrega, inşaat ve yapı malzemeleri içinde yer alan, doğal ya da yapay kaynaklardan elde edilen granüler malzemelerdir. Çeşitli boyutlarda ve şekillerde bulunabilen agregalar, genellikle kum, çakıl, kırma taş veya benzeri materyallerden oluşur. Agreganın temel işlevi, bağlayıcı malzemelerle birleşerek bir bütünlük sağlaması ve mekanik dayanımı artırmasıdır.

Agregalar, karışımlarda daha doğru bir şekilde kullanılmak amacıyla çeşitli özelliklerine göre sınıflandırılmışlardır (Şekil 2.6).

Şekil 2.6. Agregaların sınıflandırılması (Erdoğan, 2007)

Kireç esaslı harçlarda agrega, sadece hacim doldurucu bir bileşen değil, aynı zamanda harcın mekanik özelliklerini, işlenebilirliğini ve dayanıklılığını doğrudan etkileyen kritik bir unsurdur. Agreganın tane boyutu, granülometrisi ve mineralojik özellikleri, kirecin bağlayıcılık performansını optimize ederken harcın eğilme ve basınç dayanımı üzerinde de önemli bir rol oynar. Ayrıca agrega, harcın çatlama riskini azaltarak yapıların uzun ömürlülüğüne katkı sağlar. Bu nedenle, kireç esaslı harçların tasarımında uygun agrega seçimi hem fiziksel hem de kimyasal uyumluluk açısından büyük önem taşımaktadır.

Tarihi harçlarda hidrolik özelliklerin artırılması amacıyla seramik atıkları (tuğla tozu, kırılmış tuğla) yaygın olarak kullanıldığı kanıtlanmıştır. Tuğla tozu ve tuğla kırığının bağlayıcı ve agrega ile ikame edilmesi, Helenistik dönemden Osmanlı dönemine kadar yaklaşık 2000 yıl boyunca uygulanmış ve özellikle Roma ile Bizans dönemlerinde yaygınlaşmıştır (Şekil 2.7). Bu yöntem sayesinde, kireç bazlı matrisin mukavemeti ve neme karşı direnci arttırılırken karışımların yoğunluğu azaltılmış ve seramik atıklarının geri dönüşümünü sağlanmıştır (Pachta vd., 2021).

Şekil 2.7. a) İstanbul Üsküdar bölgesinde yer alan tarihi bir yapıya ait tuğla-kireç harcı örgüsü (Yüzer vd.,2015) b) Aigai arkeolojik alanında zemin kaplaması olarak kullanılan Horasan harcı (Böke, 2007).

Horasan harcı üretiminde de agrega olarak genelde tuğla kırıntıları kullanılmaktadır. Tuğlanın hammaddelerini kuvars, feldspat ve diğer yardımcı mineralleri içeren doğal killer oluşturmaktadır (Böke, 2006). Roma ve Osmanlı döneminde kullanılan Horasan harcındaki tuğla agregasının içerdiği oksitler Çizelge 2.4'te gösterilmiştir

Çizelge 2.4. Roma ve Osmanlı döneminde kullanılan horasan harcındaki tuğla agregasına ait oksitler (Uğurlu ve Böke, 2010)

Oksit	Roma dönemi (%)	Osmanlı dönemi (%)
SiO_2	60-75	60-85
Al_2O_3	13-16	5-14
Fe_2O_3	5,0-7,0	3,0-8,0
Na_2O	0,3-0,7	0,8-2,0
K_2O	0,9-3,0	0,8-4,0
CaO	0,6-3,0	1,0-3,0

Çizelge 2.4'ten de görüldüğü üzere Roma ve Osmanlı döneminde kullanılan harçlardaki tuğlalarda SiO_2 ve Al_2O_3 miktarlarının yüksek olduğu görülmüştür. Böylece, bu tuğla agregasının puzolanik özellik gösterme potansiyeline sahip olacağı düşünülmüştür.

Tuğlada bulunan kaolinit kili ($Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$) 700-900◦C arasında sıcaklığa maruz kaldığında bünyesindeki suyu kaybederek metakaoline ($Al_2O_3.2SiO_2$) dönüşmektedir. Horasan harcı üretiminde kullanıldığında ve ortamdaki suyun varlığında kireç ile reaksiyona girerek hidrolik özelliği sağlayan kalsiyum silikat hidrat ($3CaO.2SiO_2.7H_2O$) ve tetrakalsiyum alüminat hidrat ($4CaO.Al_2O_3.19H_2O$) oluşturmaktadır (Prince vd.,2001, Böke vd., 2006).

İstanbul'daki Roma dönemi saray yapılarında kullanılan yapı harçlarının incelendiği bir çalışmada, tuğla kırığının agrega olarak yüksek miktarda kullanılması durumunda, tuğla kırığı ve tuğla tozunun harç içerisinde homojen olarak dağıldığı görülmüştür (Altaş vd, 2012). Ayrıca harçlarda agrega olarak tuğla kırığına ilaveten mika ve kuvars içeren dere agregasının da kullanıldığı ifade edilmiştir. Maksimum tane boyutu 16 mm olan agregaların yanında tane çapı 4 mm olan agregaların daha yüksek oranda kullanıldığı saptanmıştır. Harç karışımlarının porozitesinin %37-48, su emme oranının %23-33,

birim hacim ağırlığının 1,32-1,61 g/cm^3, basınç dayanımının ise 6-8 MPa arasında olduğu rapor edilmiştir.

Bizans dönemindeki yapılarda harç kalınlığı artışıyla karışımlarda kullanılan maksimum agrega tane boyutunun arttığı gözlemlenmiştir. Bazı yapılarda, 40 mm'den fazla hatta tuğla kalınlığı kadar kalınlığa sahip (Ayasofya Cami'nin kubbesinde harç kalınlığı 70 mm'dir) harçlara rastlanmıştır (Baronio vd., 1997).

Horasan harcı üretiminde agrega olarak kullanılan tuğlaların günümüzde yapılarda kullanılan tuğlalardan farklı olduğu anlaşılmıştır. Örneğin, agrega olarak kullanılan tuğlaların daha düşük sıcaklıklarda pişirildiği ve kil minerali açısından daha zengin olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle daha fazla puzolanik özellik gösterdiği rapor edilmiştir. Onarım amaçlı üretilen horasan harçlarında kullanılan tuğla agregasının puzolanik özelliğinin kaybolmaması için 600-900˚C aralığında pişirilmesi önerilmiştir. Ayrıca yüksek gözenekliliğe sahip tuğlaların tercih edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Gözenekli yapısından dolayı bünyesinde karışım suyunu tutarak kireç ile daha verimli puzolanik reaksiyon oluşacağı ifade edilmiştir. Bunlara ilaveten, tuğlaların kullanılmadan önce su ile temas etmemiş olması ve suda çözünen tuzları içermemesi vurgulanmıştır (Böke vd., 2007).

Topçu vd. (2015) genleştirilmiş perlit kullanımının horasan harçlarının fiziksel özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla agrega olarak kullanılan, 0-2 mm kiremit tozunun yerine %0-10-20-30 ve 40 oranlarında genleştirilmiş perlit ikame edilmiştir. Tüm karışımlarda bağlayıcı olarak sönmüş kireç kullanılmıştır. Karışımlardaki perlit içeriğinin artışıyla su emme kapasitesi artarken dayanım ve ısıl iletkenlik özelliklerinde azalmalara rastlanmıştır. Dayanım ve dayanıklılık açısından en uygun ikame oranının %10 ve %20 olduğu bildirilmiştir.

Bir diğer çalışmada, kiremit tozu ve parçalarının %10, 20, 30, 40 oranlarında uçucu kül ile ikamesinin horasan harcının mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi araştırılmıştır (Işıkdağ vd., 2014). Karışımlarda bağlayıcı olarak sönmüş kireç kullanılmıştır. Uçucu kül kullanımı, harç matrislerindeki bağlayıcı etkisini geliştirerek karışımların basınç ve

eğilme dayanımlarını ve ultrases geçiş hızı değerlerini artırmıştır. Uçucu kül kullanım oranının artışıyla karışımların donma- çözülme direnci artmıştır.

Bağlayıcı olarak kireç, doğal hidrolik kireç ve kireç-çimento karışımı kullanılan bir çalışmada, onarım harçlarında işlevsel ve teknik kriterleri karşılayan hafif harçların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Genleşmiş perlit, genleşmiş cam granülleri ve zeolit gibi hafif agregalar farklı oranlarda kuvars kumuna ikame edilmiştir. Hafif agregalar, yüksek gözeneklilik, düşük yoğunluk, tatmin edici mekanik özellikler ve iyileştirilmiş su buharı iletimi sağlamıştır. Genleşmiş perlit ve cam granülat içeren harçlar, termal yalıtım harçları arasında sınıflandırılmıştır. Hafif agregalar, tuz etkisi açısından dayanıklı, uyumlu ve termal performansı yüksek harçların geliştirilmesine olanak tanımıştır. Kireç ve doğal hidrolik kireç esaslı harçlar, iyileştirilmiş termal performanslarıyla önerilirken, kireç-çimento harçlar yalnızca çimento içeren yapıların onarımı için uygun görülmüştür (Záleská vd., 2021).

Gamerio vd. tarafından (2012) bağlayıcı/agrega oranının kireç esaslı harçların mineralojik ve mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışma sonucunda, bağlayıcı: agrega oranının azalması, eğilme mukavemetinin düşmesine neden olduğu görülmüştür. Bağlayıcı: agrega oranı 1:3 olan harçlarda, karbonatlaşma sürecinin daha hızlı gerçekleştiği, bu durumun portlanditin tüketimine yol açarak kısa vadeli puzolanik reaksiyonları engellediği belirlenmiştir. Buna karşılık, bağlayıcı: agrega oranı 1:1 olan harçlarda karbonatlaşma hızı daha düşük olup, bu durumun uzun vadeli puzolanik reaksiyonların gerçekleşmesi için daha fazla kireç oluşumuna olanak sağladığı vurgulanmıştır.

2.3.3. Kimyasal Katkı

Kireç esaslı harçların, tarihi yapıların inşasında kullanılan harçlarla olan benzer özellikleri nedeniyle restorasyon işlerinde kullanılan en uygun harç olduğu vurgulanmıştır. Ancak, priz ve dayanım kazanma süresinin uzun olması bu harçların başlıca dezavantajı olarak bilinmektedir. (Silva vd., 2019). Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, kireç esaslı harç karışımlarının olumsuz yönlerini minimize edebilmek için, yapının inşasında kullanılan eski malzemelere zarar vermeden çeşitli kimyasal katkılar

kullanılmaktadır. Bu bağlamda, kireç esaslı harçlarda su azaltıcı (Fernandez vd., 2013; Pérez-Nicolás vd., 2016), hava sürükleyici (Seabra vd., 2009), su itici (Izaquirre vd., 2009) ve viskozite düzenleyici katkının (Izaguirre vd, 2010; Lachemi vd., 2004) kullanıldığı çok sayıda çalışmanın gerçekleştirildiği anlaşılmıştır. Ancak, Horasan harcında kimyasal katkı kullanımı ile ilgili çok az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Kimyasal katkıların tarihi yapılarda kullanımı ile ilgili bazı araştırmalar özetlenmiştir.

Çimentolu sistemlerde olduğu gibi kireç esaslı harçların da mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirmek için su azaltıcı katkının kullanıldığı anlaşılmıştır. Kireç esaslı harçlarda da su azaltıcı katkı kullanımı ile sabit bir kıvamı sağlamak için su gereksinimi azalmıştır. (EN 934-2, 2009; Izaguirre vd., 2010). Bu sayede çimentolu harçlarda olduğu gibi, kireç esaslı harçların da priz süresinde azalma meydana gelerek (Fernandez vd, 2013) karbonatlaşma süreci ve basınç dayanımı olumlu etkilenmektedir (Pérez-Nicolás vd, 2016). Karışımların akışkanlığını sağlamak için en yaygın olarak lignosülfonat, polinaftalin sülfonat, polimelamin sülfonat ve polikarboksilat eter esaslı su azaltıcı katkıların kullanıldığı anlaşılmıştır (Newman ve Choo, 2003).

Lignosülfonat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkıların, saf hava kireçli karışımlarda polinaftalin sülfat esaslı katkılara kıyasla daha yüksek akışkanlık sağladığı ve işlenebilirliği daha uzun süre koruduğu belirlenmiştir. İleri yaş basınç dayanımını olumsuz etkilemeyen bu katkılar, çimentolu sistemlerde Ca^{2+} ile daha iyi kompleks oluşturarak kıvam koruma performansını artırmakta ve karbonatlaşmayı engellemektedir. Polinaftalinsülfonat esaslı katkıların ise kireç yüzeylerine daha iyi adsorbe olduğu, bu durumun yüksek anyonik fonksiyonel grup yoğunluğundan kaynaklandığı ifade edilmiştir. Ancak lignosülfonat esaslı katkıların sterik etkilerle işlenebilirliği iyileştirmesi nedeniyle kireç esaslı karışımlarda daha çok tercih edildiği vurgulanmıştır. (Pérez-Nicolás vd., 2016).

Kireç esaslı karışımlarda kireç ağırlığının %1'i oranında polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı kullanımı karışımların topaklaşmasını ciddi derecede azaltarak akışkanlığa olumlu etki sağladığı Fernandez vd. tarafından (2013) beyan edilmiştir. Bununla birlikte, bu tip katkıların söz konusu karışımlarda kullanımının, su ihtiyacını azaltarak priz süresinin kısalmasına neden olduğu aynı yazar tarafından bildirilmiştir. Su

ihtiyacının azalmasıyla karışımların yapısında daha küçük çaplı boşluklar oluştuğundan, basınç dayanımında önemli artışın meydana geldiği bildirilmiştir.

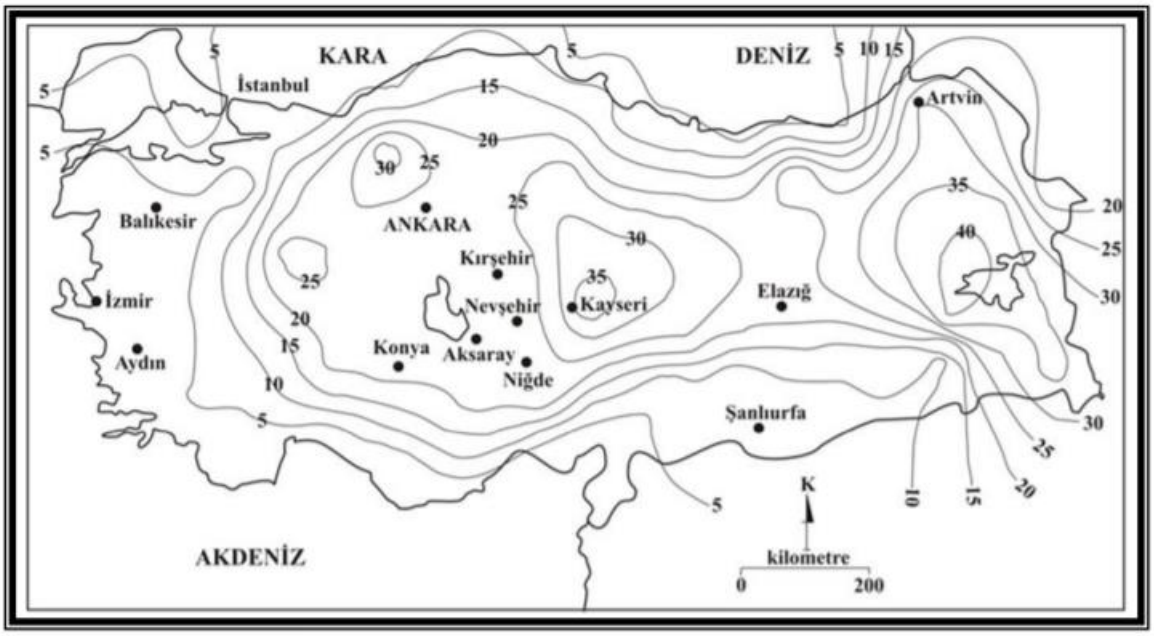
Silva vd. (2019), tarafından yapılan çalışmada polikarboksilat eter ve polinaftalin sülfonat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkılarının kireç esaslı harçların taze ve sertleşmiş hal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çimentolu sistemlerde de olduğu gibi, yayılma performansı açısından polikarboksilat eter esaslı katkının polinaftalin sülfonata göre daha başarılı olduğu bildirilmiştir. Polikarboksilat eter esaslı katkı kıvam koruma performansı açısından daha başarılı olsa da bu katkıyı içeren karışımlarda terleme eğiliminin daha yüksek olduğu görülmüştür. Benzer sonuçlar hava kireçli harçlar için Pinto vd. (2017) tarafından beyan edilmiştir. Ayrıca, yazarlar polikarboksilat eter esaslı su azaltıcı katkı içeren hava kireci harcının eski yapı ile uyumlu olduğunu ifade etmiştir.

Tarihi yapılarda sık sık rastlanan hasarlardan birinin donma-çözülme kaynaklı çatlamalar ve bozulmalar olduğu bilinmektedir. Horasan harcının çimentolu harçlara kıyasla daha yüksek kılcal su emme kapasitesine sahip olduğu daha önce de vurgulanmıştır. Dolayısıyla ıslanma-kuruma, donma-çözülme ve tuz çözeltilerinin olumsuz etkileri, bu tip karışımların dayanım ve durabilite performanslarını etkileyebilecek ciddi bozulmalara neden olabilmektedir (Izaguirre vd., 2009). Bu bağlamda tarihi yapıları olumsuz çevresel etki faktörlerine karşı korumak için diğer yapılara benzer şekilde izolasyon yapılması, tarihi dokuyu bozacağı için mümkün değildir. Bu nedenle, özellikle donma-çözülme etkisine maruz kalan yapıların korunması için hidrolik kireçli karışımlarda hava sürükleyici katkı kullanımı önerilmiştir (ASTM C226).

Çimentolu sistemlerde hava sürükleyici katkı kullanımı ile ilgili çok sayıda çalışma olmasına rağmen (Atahan vd., 2008; Ouyang vd., 2008) bu tip kimyasal katkıların kireç esaslı harç karışımlarında kullanımı oldukça sınırlı kalmıştır. Kireçli harçların oldukça boşluklu yapıya sahip olduğu bilinmektedir. Bu tip karışımlarda sürükleyici katkı kullanımıyla sürüklenen ekstra hava boşluğu harcın dayanımını azaltmaktadır. Ayrıca, aşırı miktarda hava sürüklenmesi, harç ve duvar arasında adhezyon kaybına yol açabilmektedir (Silva vd., 2020). Bu sebeplerden söz konusu katkının kireçli karışımlarda kullanımı rağbet görmemiştir. Cultrone vd. (2005;2007) bağlayıcı

ağırlığının %0,1'i oranında hava sürükleyici katkı kullanımıyla kireç esaslı harçlarda makro boşluk miktarının arttığını beyan etmiştir. Bu durumun, harç karışımlarının birim hacim ağırlığının azalmasına neden olmasının yanında su emme kapasitesi ve su kaybetme hızının artmasına sebep olduğu vurgulanmıştır.

Türkiye, bilindiği üzere 4 mevsimi yaşayan, Akdeniz iklimi ve karasal iklime sahip bir kuşakta yer almaktadır. Bu nedenle, donma-çözülme kaynaklı hasarlar yaygın olmaktadır. 100 istasyondan 20 yıllık yağış ve sıcaklık verileri göz önüne alınarak hazırlanan Şekil 2.8'deki haritaya göre Türkiye'de yıl boyunca donma-çözülme çevrim sayısı 40'a kadar çıkabilmektedir (İnce, 2013). Özellikle, 4 mevsimin de yağışlı geçtiği Karadeniz bölgesinde suyun zararlı etkileri daha da bariz olmaktadır.



Şekil 2.8. Türkiye'nin eş donma-çözülme çevrim sayısı kontur haritası (İnce, 2013, Binal vd., 1997)

Stiren-bütadien kauçuk esaslı modifiye polimer katkıların, düşük su emme oranlarına sahip polimer bağlayıcı eş matrisler oluşturarak çimentolu karışımların donma-çözülme direncini arttırdığı bilinmektedir. Ancak, güneş ışığında hızlı renk bozulmasına yol açtığı için restorasyon uygulamalarında kullanımı uygun görülmemiştir (Edison ve Lausberg, 2019).

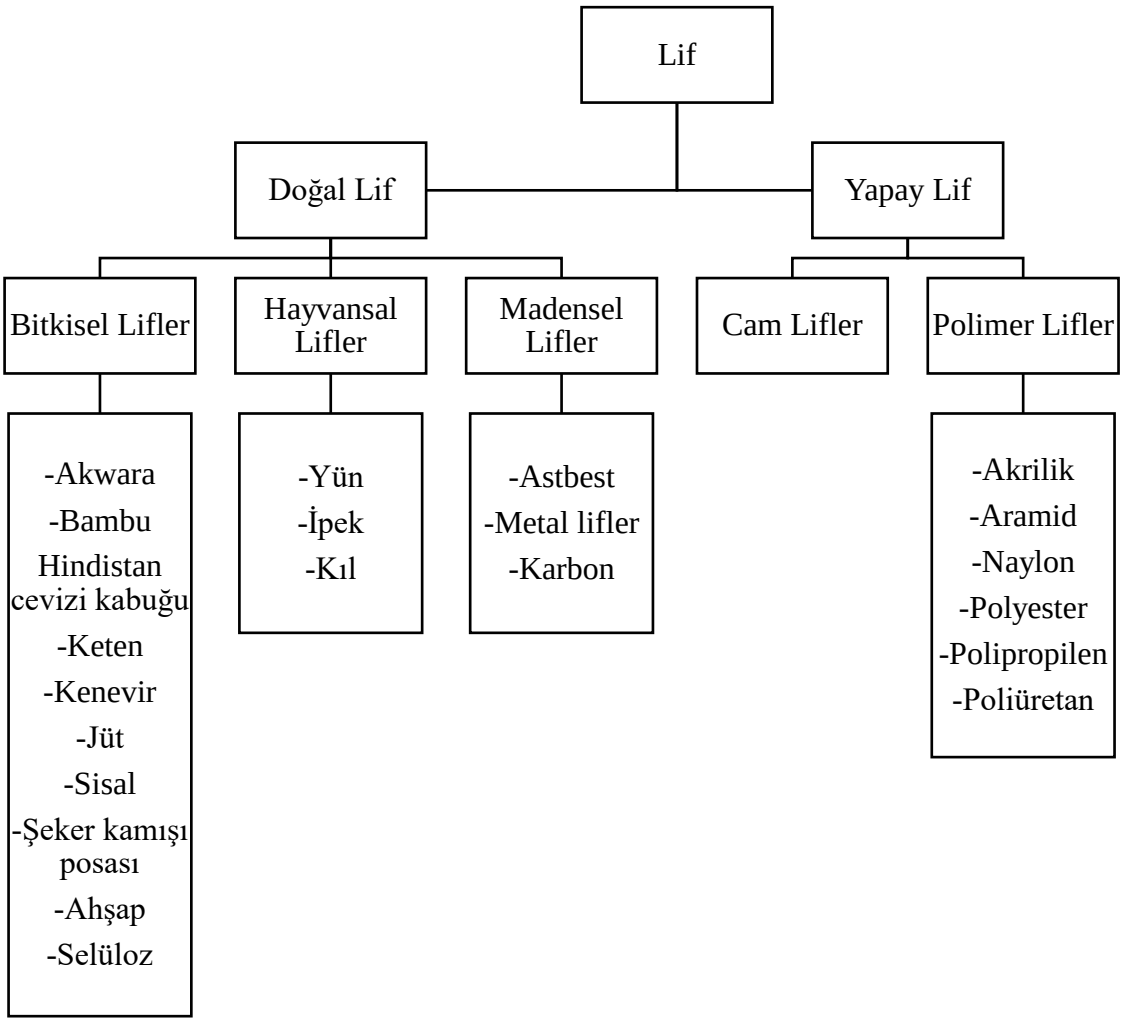
Çimento esaslı harçlarda su itici olarak kullanılan, sodyum oleat ve kalsiyum stearat içeren iki farklı anyonik yüzey aktif maddenin kireç esaslı harç karışımlarının dayanım ve durabilite özeliklerine etkisi Izaquirre vd. (2009) tarafından incelenmiştir. Harç karışımlarına kireç ağırlığının %0,5'i oranında sodyum oleat eklendiğinde karışımların kılcal geçirgenlik özelliğinde azalma, donma-çözülme direnci ve basınç dayanımında artış gözlemlenmiştir.

2.3.4. Lif Kullanımı

Kireç esaslı harçlar, çimento esaslı harçlara kıyasla daha gevrek bir yapıya sahip olması ve büzülme kaynaklı çatlakların daha fazla oluşması sebebiyle, tarihi yapıların onarımında kullanıldığında çeşitli olumsuz etkilere sebep olabilir. Ortaya çıkan gelen bu olumsuz etkiler karışımlara lif takviyesi ile azaltılabilmektedir (Lange vd., 1996; Cao ve Chung, 2001).

Harç matrisinde rastgele dağılmış olan lifler harcın eğilme dayanımını önemli ölçüde artırmakta, donma-çözülme direncini iyileştirmekte, çatlak gelişimini yavaşlatmakta ve tokluğun artmasını sağlamaktadır (Di Bella vd., 2014). Lifler yük altında gerilmeyi etrafındaki matrise dağılımını sağlayarak mikro çatlakların makro çatlaklara dönüşmesini engellemektedir (Pascal vd., 2004). Yaklaşık 3500 yıl öncesinde, güneşte pişmiş kil ve tuğla gibi gevrek malzemelerin güçlendirilmesi için at kılı, saman ve diğer bitkisel lifler kullanılmıştır (Brandt, 2008). Günümüzde de polipropilen ve çelik lifler benzer amaçlarla çimento ve kireç esaslı karışımlara ilave edilmektedir.

Horasan harçlarında istenen işlenebilirliğin sağlanması için su gereksinimi fazla olduğundan kuruma büzülme çatlaklarının oluşma riski yüksek olmaktadır. Bu çatlakların önlenebilmesinde çeşitli lifler ve kuruma-büzülme engelleyici kimyasal katkıların kullanılabilirliği beyan edilmiştir. Bu amaçla kullanılan liflerin sınıflandırılması Şekil 2.9'da gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi lifler genel olarak doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.



Şekil 2.9. Liflerin sınıflandırılması (Chawla, 1998)

Doğal liflerin bazıları oluşturduğu çeşitli olumsuz etkilerden dolayı yaygın olarak kullanılmamaktadır. Örneğin insan sağlığına olumsuz etkilerinden dolayı astbest liflerin kullanımı terk edilmiş ve yerlerini polimer lif gibi diğer türler almıştır (Brandt, 2008). Doğal ve yapay lif içeren kireç esaslı harçlar ile ilgili bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Altun vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada polipropilen lif kullanımının hidrolik kireç esaslı harç karışımlarının basınç ve eğilme dayanımları, su emme kapasitesi ve kuruma-büzülme davranışına etkisi incelenmiştir. Karışımlara lif ilavesi ile istenilen yayılma değerini sağlamak için su azaltıcı katkı gereksinimi artmıştır. Bununla birlikte

dayanım, su emme ve büzülme değerlerinde ciddi mertebede iyileşme tespit edilememiştir.

Polipropilen lif kullanımının kireç esaslı harçların taze ve sertleşmiş hal üzerindeki etkisi Izaguirre vd. (2011) tarafından incelenmiştir. Bu amaçla kütlece %0,5 ve %0,06 oranlarında polipropilen lif kullanılmıştır. Daha düşük oranda (%0,06) lif içeren karışımlarda boşluk oranı daha az olduğundan geçirgenlik ve dayanım özelliklerinde iyileşmeler gözlemlenmiştir. Ayrıca bu karışımda büzülme çatlaklarının azaldığı ve donma-çözülme direncinin arttığı bildirilmiştir. %0,5 oranında lif içeren karışımda ise kuruma büzülme çatlağı oluşumu tamamen ortadan kalkmıştır. Ancak lif içeriği fazla olduğundan karışımdaki boşluk oranı artarak geçirgenlik ve dayanım özellikleri olumsuz etkilenmiştir.

Erdoğdu vd. (2017) farklı oranlarda uçucu kül, çimento ve polipropilen lif kullanımının Horasan harcı karışımlarının taze hal, mekanik ve durabilite özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Uçucu külün harcın işlenebilirliğini iyileştirdiği belirtilmiştir. Lif takviyesi ve çimento ikame oranının artışıyla karışımların basınç ve çekme dayanımları olumlu etkilenmiştir. Çekme dayanımlarının arttırılmasında uzun liflerin kısa liflerden daha etkili olduğu vurgulanmıştır. Ancak çimento ikamesi ve lif takviyesinin karışımın kılcallık özelliğini olumsuz etkilediği saptanmıştır.

Rosato vd. (2017) farklı oranlarda nano selüloz lif kullanımının doğal hidrolik kireç esaslı harç karışımlarının basınç ve eğilme dayanımı ile geçirgenlik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla, çalışmada lif içermeyen kontrol karışımına kütlece %0,1, 0,25, 0,50 oranlarında nano selüloz lif ilave edilmiştir. Lif kullanım oranının artışıyla karışımların eğilme ve basınç dayanımı olumsuz etkilenmiştir. Ancak, bu durumun tersi kılcal su emme deneyinde tespit edilmiştir.

Iucolano vd. (2013) %1 ve 2 oranında cam ve bazalt lif kullanımının hidrolik kireç esaslı harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Lif türünden bağımsız olarak karışıma lif ilavesiyle mekanik özelliklerinin iyileştiği bildirilmiştir. Dayanım ve tokluk performansı açısından en üstün performansı sergileyen karışımın %2 oranında cam lifi içeren karışımın olduğu vurgulanmıştır.

Bir diğer çalışmada %2 oranında kenaf, sisal ve polipropilen lif kullanımının kireç esaslı harç karışımlarının mekanik ve durabilite performansına etkisi araştırılmıştır (Di Bella vd, 2014). Kenaf ve sisal gibi doğal lif ilavesiyle harç karışımlarının büzülme kaynaklı çatlaklarının azaldığı, dayanım değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Bu durum sisal lifli karışımlarda daha da bariz olmuştur. Donma- çözülme direnci açısından doğal liflerin polipropilen life kıyasla daha başarılı olduğu ifade edilmiştir.

2.3.5. Diğer Malzemeler

Taş, tuğla, kerpiç ve ağaç tarihi yapılarda kullanılan doğal malzemelerdir. Bu malzemelerin kalitesi yapıların servis ömrünü etkilemektedir (Ahunbay, 2009). Bununla birlikte, organik katkı maddelerinin uzun yıllardır kullanılması bu malzemelerin nitelik ve özelliklerini kanıtlamaktadır. Çizelge 2.5'te kireç esaslı harçlarda kullanılan doğal katkıların kronolojik olarak sıralaması yapılmıştır (Tekin ve Kurugöl, 2012).

Çizelge 2.5. Organik katkı kullanımının sınıflandırılması (Sickels 1981, Chandra 2003, Alberti, 1965, Tekin ve Kurugöl, 2012)

Tarihsel Sıralama	Protein	Yağ	Sakkarit	Reçine	Diğer
MÖ 2500-2100 (Orta Doğu)					Bitüm
MÖ 150 (Mısır)	Yumurta, Albumin, Hayvansal yapıştırıcı, Kazein, Keratin		İncir suyu, Arap zamkı		Kan
MÖ 46 (Roma İmparatorluğu)	Yumurta beyazı, süt, Kesilmiş süt, Çavdar hamuru	Hayvansal yağ	İncir suyu		Kan
MS 23 (Roma İmparatorluğu)	Süt, Kıl	Hayvansal yağ, Sıvıyağ, İç yağ	İncir suyu		Bitüm, Kan, Şarap, Lif, Arpa, Karaağaç kabuğu, Tutkal, Safran

Çizelge 2.5. Organik katkı kullanımının sınıflandırılması (Sickels 1981; Chandra 2003; Alberti, 1965,;Tekin ve Kurugöl, 2012) (Devam)

Tarihsel Sıralama	Protein	Yağ	Sakkarit	Reçine	Diğer
MS 800 (İngiltere)					Kan
13.yy (İngiltere)	Yumurta, Yumurta beyazı, Malt, Glüten	Balmumu	Şeker, Meyve suyu		İdrar, Bira, Pirinç, Tutkal
15.yy	Sıvıyağ				
16.yy	Yumurta, Yumurta beyazı, Malt, Glüten	Balmumu	Şeker, Meyve suyu, Arap zamkı		Kan, İdrar, Bira, Pirinç, Tutkal
17.yy			Arap zamkı		Kan
18.yy (İngiltere)	Yumurta, Yumurta beyazı, Hayvansal yapıştırıcı, Peynir, Süt	Hayvansal yağ, Balmumu		Bitkisel reçine	Kan
18.yy ortaları	Yumurta, Peynir, Süt, Kesilmiş süt, Yayık ayranı, Glüten, Çavdar hamuru	Balmumu	Meyve suyu, İncir suyu		Kan, Gübre, Bira, Arpa, Sebze suyu
19.yy (İngiltere)	Yumurta beyazı, Peynir, Süt, Kesilmiş süt	Sıvıyağ, Tereyağı	Şeker, Pekmez		
19.yy (İngiltere)	Yumurta, Yumurta beyazı, Hayvansal yapıştırıcı, Peynir, Süt	Hayvansal yağ, Sıvıyağ, Balmumu	Arap zamkı, Pamuk	Hayvansal reçine	Kan

Çizelge 2.5'ten anlaşıldığı gibi Arap zamkı, kemik tutkalı, yumurta akı, kesilmiş süt, şeker, incir sütü gibi birçok farklı malzeme, tarihi yapılarda kullanılmıştır. Çizelge 2.6'da tarihi yapılarda kullanılan geleneksel katkılar ve kullanım amaçları özetlenmiştir. Çizelge 2.6'dan görüldüğü gibi karışımlara ilave edilen malzemeler genellikle taze hal özelliklerini veya durabilite performanslarını etkilemektedir (Böke vd., 2004).

Çizelge 2.6. Geleneksel katkılar ve harç üzerindeki etkileri (Böke vd., 2004)

Malzeme	**Kullanım amacı**
Arap zamkı, incirin sütlü suyu ve hayvan tutkalı	Yapışkan olarak
Çavdar hamuru, kesik süt, yumurta akı ve kan	Daha hızlı sertleşme için
Arpa, idrar ve hayvan tüyleri	Dayanıklılığı arttırmak için
Balmumu	Büzülmeyi önlemek için
Yumurta akı, hayvan tutkalı, şeker, süt	Kirecin plastik özelliğini arttırıp kırılganlığı azaltmak için

Ayasofya Cami, dünya kültürel mirası açısından Türkiye'nin en değerli tarihi yapılarından birisidir. Söz konusu yapının inşasında kireç harcının özelliklerini geliştirmek amacıyla dişbudak ağacının (fraxinus excelsior) yaprağı kaynatılarak elde edilen suyun harç karışımlarda kullanıldığı beyan edilmiştir (Diker, 2010).

Elert vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, hayvan tutkalının kireç harçlarının minerolojik, mekanik ve aşınma direnci özelliklerine etkisi incelenmiştir. Hayvan tutkalı, karbonatlaşmayı engellemesi ve köpük ajanı gibi davranarak hava kabarcığı oluşumunu artırması nedeniyle harçların mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir. Karışımlardaki organik katkı oranı arttıkça bu etki daha belirgin olmuştur. Bununla birlikte, söz konusu katkının karışıma ilavesiyle hava koşularına karşı dayanıklılıkta (su püskürtme ve SO_2) önemli iyileşme gözlemlenmiştir. Ayrıca hayvan tutkalı kullanılan karışımlarda çatlak oluşumunun önemli derecede azalmasının yanında pürüzsüz yüzeyli alt tabakalarda bile yapışmayı olumlu etkilemiştir. Renk değişiminde ise önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir.

Tekin ve Kurugöl (2012) organik katkıların kirecin karbonatlaşma hızına etkisini araştırmıştır. Organik katkı olarak, süt, yumurta akı, yumurta sarısı, alkolsüz bira, esmer şeker ve şeker kamışı suyu kullanılmıştır. Yumurta sarısı ve yumurta akı katkısının kireç harcının mekanik özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca yumurta sarısı ve şeker kamışı suyunun karbonatlaşma hızını arttırdığı belirlenmiştir. Genel olarak organik katkı kullanımının karışımlarda priz geciktirme etkisi oluşturduğu beyan edilmiştir.

Ventolà vd. (2011) farklı katkı madde kullanımının kireç esaslı harç karışımlarının karbonatlaşma hızı, mekanik özellikler, priz süresi ve suyun olumsuz etkilerine karşı direncine etkisini araştırmışlardır. Hayvan tutkalı ilavesiyle harç karışımlarının dayanım özelliklerinin iyileştiği beyan edilmiştir. Hem toz hem de müsilaj (esas olarak bir polisakkarit malzemesi) olarak nopal ilavesiyle karışımların karbonatlaşma oranını arttırdığı ifade edilmiştir. Bu durumun çoğu restorasyon uygulamasında, malzemenin mekanik erozyonu nedeniyle harçta oluşabilecek hasarları önlemek için önemli bir faktör olduğu bilinmektedir. Zeytinyağı (yağlı malzeme) kullanımı ile karışımların boşluk miktarı azaldığından geçirgenlik özelliğinin iyileştiği vurgulanmıştır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Malzeme Özellikleri

Çalışma kapsamında kullanılan malzemelerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıda verilmektedir.

3.1.1. Doğal hidrolik kireç

Çalışma kapsamında TS EN 459-1'e uygun NHL 3,5 tipi doğal hidrolik kireç kullanılmıştır. Üretici firma tarafından kirecin 28 günlük eğilme dayanımının minimum 1MPa, basınç dayanımının minimum 4 MPa olarak belirtilmiştir. Kullanılan doğal hidrolik kirecin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1' de verilmektedir.

Çizelge 3.1. Doğal hidrolik kirece ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Bileşen	Birim	Miktar
SiO_2	%	8,47
Al_2O_3	%	3,46
Fe_2O_3	%	0,39
CaO	%	53,84
MgO	%	0,62
SO_3	%	0,54
Na_2O	%	0,16
K_2O	%	0,27
KK	%	30,41
Özgül Ağırlık		2,79
Blaine İncelik Değeri	cm^2/g	5850
200 µm elek üstü kalan	%	0,4
90 µm elek üstü kalan	%	4,6
45 µm elek üstü kalan	%	24,2

Yapılan ön deneylerde çalışma kapsamında kullanılacak doğal hidrolik kireç ile üretilen kireç harcı numunesinin dayanım özellikleri TS EN 459-2 standardına göre kontrol edilmiştir. Karışımlar kütlece 1:3 oranında hidrolik kireç ve CEN standart kum kullanılarak su/bağlayıcı oranı 0,6 olacak şekilde üretilmiştir. 40x40x160 mm boyutundaki prizmatik kalıplara yerleştirilen karışım, ilk 24 saat boyunca nemli bir

ortamda üzeri örtülü olarak bekletilmiştir. Ardından kalıptan çıkarılarak 7 gün boyunca 20±1°C sıcaklıkta ve nemi %90'dan az olmayan ortamda deney gününe kadar bekletilmiştir. Hazırlanan kireç numuneleri Şekil 7'de gösterilmiştir.

Şekil 3.1. Eğilme ve basınç dayanımı deneyleri için hazırlanan kireç numuneleri

Numuneler üzerinde gerçekleştirilen basınç ve eğilme dayanımı deneylerine ait sonuçlar Çizelge 3.2.'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Kireç numunelerinin eğilme ve basınç dayanımları

	7 günlük	**28 günlük**
Eğilme dayanımı (MPa)	0,74	2,22
Basınç dayanımı (MPa)	2,31	4,89

3.1.2. Puzolanlar

Tez çalışması kapsamında hidrolik kireç esaslı Horasan harcının mekanik ve durabilite özelliklerinin puzolan ilavesi ile geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla karışımlara tuğla tozu, yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi yapay puzolanlar farklı oranlarda eklenmiştir. Çalışma kapsamında tuğla tozu kullanıma hazır olarak temin edilmemiştir. Bu sebeple, diğer puzolanlardan farklı olarak puzolanik aktivitesi standartlara göre kontrol edilmiştir. Buna karşın, diğer puzolanlar kullanıma hazır olarak satın alındığından, puzolanik aktiviteleri ayrıca test edilmemiştir. Çalışma kapsamında kullanılan puzolanlar ve özellikleri ile ilgili açıklamalar aşağıda detaylandırılmıştır.

3.1.2.1. Tuğla tozu

Çalışma kapsamında Eskişehir Eren Tuğla Fabrikasından temin edilen harman tuğlası, çeneli kırıcı kullanılarak kırılmış ve öğütülmüştür. Ardından, tuğla kırığının 90 µm'lik elekten elenmesiyle elde edilen tuğla tozu karışımlarda puzolan olarak kullanılmıştır. Tuğla tozuna ait, Bursa Çimento Fabrikası Laboratuvarında yapılan XRF analizi sonucu elde edilen fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 3.3.'te verilmiştir. Elde edilen sonuçların TS 25'te verilen sınır değerleri sağladığı belirlenmiştir.

Çizelge 3.3. Kullanılan tuğla tozunun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Bileşen	Birim	Miktar
SiO_2	%	47,72
Al_2O_3	%	14,60
Fe_2O_3	%	11,02
CaO	%	8,98
MgO	%	6,51
SO_3	%	1,25
Na_2O	%	2,39
K_2O	%	1,60
KK	%	0,92
Özgül Ağırlık		2,95
Blaine İncelik Değeri	cm^2/g	4150
200 µm elek üstü kalan	%	0
90 µm elek üstü kalan	%	13,4
45 µm elek üstü kalan	%	34,6

Harç karışımlarında kullanılacak tuğla tozunun puzolanik özelliği hem ASTM C618 standardına göre hem de TS 25'e göre kontrol edilmiştir. ASTM C618 standardına göre hazırlanan harç karışımlarında su/bağlayıcı ve kum/bağlayıcı oranları sırasıyla 0,485 ve 2,75 olarak sabit tutulmuştur. %100 çimento içeren kontrol karışımına ilaveten, kütlece %20 tuğla tozu ve %80 çimento içeren harç karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar, 50x50x50 mm boyutlarında küp kalıplara yerleştirilmiştir. 24 saat boyunca 20±2°C'de %95±5 nemde kürlenen numuneler, 24 saat sonunda kalıptan çıkarılmış ve deney gününe kadar kirece doygun suda bekletilmiştir. ASTM C618'e göre kullanılan tuğla tozunun yeterli puzolanik aktiviteye sahip olması için tuğla tozu içeren

numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının kontrol numunelerinin en az %75'i kadar olması gerekmektedir. Bu standarda göre yapılan deneysel çalışmanın sonuçları Çizelge 3.4.'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Kontrol karışımı ve tuğla tozu ikameli harç karışımların basınç dayanımı

	Basınç Dayanımları (MPa)		
Numune	**7 gün**	**28 gün**	**90 gün**
Kontrol karışımı	44,76	52,25	56
Tuğla tozu ikameli karışım	31,14	42,89	48,37
Yüzde (%)	69,57	82,09	86,37

TS 25'e göre puzolan içeren numunelerin 7 günlük basınç dayanımlarının en az 4,0 MPa olması gerekmektedir. Bu standarda göre üretilen numuneler için gerekli karışım oranı hesabı Çizelge 3.5.'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. TS 25'e göre puzolanik aktivite deneyinde kullanılan malzeme miktarları

Malzeme	**Miktar (g)**
Sönmüş Kireç	150
Doğal Puzolan	T=2x150(doğal puzolanın yoğunluğu/ sönmüş kirecin yoğunluğu)
Standart Kum	1350
Su	0,5x(150+T)

Çizelge 3.5.'te belirtilen miktarlara göre üretilen harç numuneleri ilk 24 saat 23±2 °C oda şartlarında buharlaşmayı önleyecek şekilde üzeri kapatılarak bekletilmiştir. 24 saat sonunda kalıplar sökülmeden 6 gün daha 55±2°C sıcaklıktaki bir etüv içinde bekletilmiştir. 7. günde numuneler basınç dayanımı deneyinden en az 4 saat önce etüvden çıkarılarak ortam sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Basınç dayanımı deneyi sonunda tuğla tozu ile hazırlanan numunelerinin 4,01 MPa basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

Tuğla tozunun puzolanik aktivite özelliğinin incelenmesi için yapılan ön çalışma sonucunda, ASTM C618 ve TS25'e göre, tuğla tozunun karışımlarda kullanılabilmesi için yeterli puzolanik aktiviteye sahip olduğu tespit edilmiştir.

3.1.2.2. Uçucu Kül

Çalışmanın ikinci aşamasında hazırlanan belirli harç karışımlarında, bağlayıcı malzeme olarak uçucu kül kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan uçucu külün fiziksel ve mekanik özellikleri detaylı bir şekilde incelenmiş olup, bu özellikler Çizelge 3.6'da sunulmuştur.

Çizelge 3.6. Kullanılan uçucu küle ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Bileşen	Birim	Miktar
SiO_2	%	59,22
Al_2O_3	%	22,86
Fe_2O_3	%	6,31
CaO	%	3,09
MgO	%	1,31
SO_3	%	0,17
Na_2O	%	0,41
K_2O	%	1,51
KK	%	3,20
Özgül Ağırlık		2,31
Blaine İncelik Değeri	cm^2/g	4300

3.1.2.3. Yüksek fırın cürufu

Çalışmanın ikinci aşamasında hazırlanan harç karışımlarının bir kısmında puzolan olarak yüksek fırın cürufu tercih edilmiştir. Yüksek fırın cürufuna ait bazı fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 3.7' de özetlenmektedir.

Çizelge 3.7. Kullanılan yüksek fırın cürufuna ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Bileşen	Birim	Miktar
SiO_2	%	40,17
Al_2O_3	%	13,81
Fe_2O_3	%	0,94
CaO	%	30,12
MgO	%	6,60
SO_3	%	1,73
Na_2O	%	0,52
K_2O	%	0,96
KK	%	0,32
Özgül Ağırlık		2,90
Blaine İncelik Değeri	cm^2/g	4880
200 µm elek üstü kalan	%	0
90 µm elek üstü kalan	%	0,4
45 µm elek üstü kalan	%	3,7

3.1.2. 4. Metakaolin

Çalışmanın ikinci ve üçüncü aşamalarında hazırlanan harç karışımlarının bir kısmında puzolan olarak metakaolin tercih edilmiştir. Kullanılan metakaoline ait bazı fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 3.8.' de özetlenmektedir.

Çizelge 3.8. Kullanılan metakaoline ait fiziksel ve kimyasal özellikler

Bileşen	Birim	Miktar
SiO_2	%	56,10
Al_2O_3	%	40,23
Fe_2O_3	%	0,85
CaO	%	0,19
MgO	%	0,16
Na_2O	%	0,24
K_2O	%	0,51
KK	%	1,10
Özgül Ağırlık		2,52
Blaine İncelik Değeri	cm^2/g	146000
32µm elek üstü kalan	%	99
20 µm elek üstü kalan	%	96,9

3.1.3. Agrega

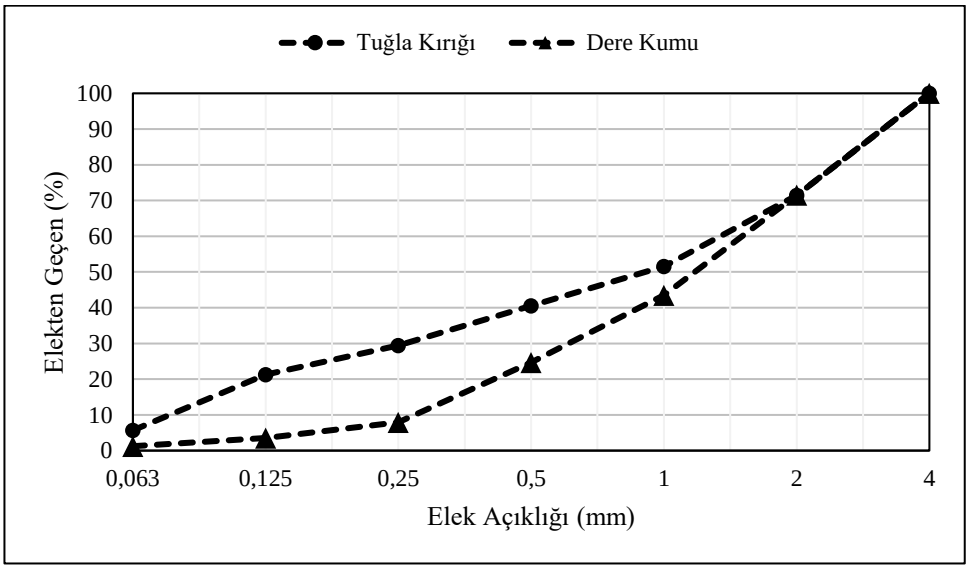
Çalışma kapsamında farklı aşamalarda farklı tip ve elek aralığında agregalar kullanılmıştır. Tuğla kırığı ve dere kumu agregası 1. aşamada, maksimum tane çapı 4 mm, sonraki aşamalarda ise 2 mm olacak şekilde tüm karışımlarda kullanılmıştır. Kullanılan tuğla kırığı agregası, temin edilen harman tuğlalarının çeneli kırıcı ile kırılıp öğütülmesi ve 4mm'lik elekten elenmesi sonucu elde edilmiştir (Şekil 3.2.). Agregaların tane dağılımı TS EN 206-1' göre belirlenmiş (Şekil 3.3.) ve elde edilen sonuçlar Şekil 3.3. ve Çizelge 3.9.'da gösterilmiştir.

Şekil 3.2. Harman tuğlalarının çeneli kırıcı ile kırılması

Şekil 3.3. Agregaların tane dağılımlarının belirlenmesi

Çizelge 3.9. Harç karışımlarında kullanılan agregaların elek analizi sonuçları

	Geçen Yüzde (%)	
Elek Göz Açıklığı (mm)	**Tuğla Kırığı**	**Dere Kumu**
4	100	100
2	71,41	71,53
1	51,58	43,49
0,5	40,58	24,64
0,25	29,40	7,88
0,125	21,24	3,57
0,063	5,67	1,23



Şekil 3.4. Harç karışımlarında kullanılan agregalara ait gradasyon eğrisi

Tez çalışmasının ikinci aşamasında, maksimum tane çapı 2 mm olan tuğla kırığı ve dere kumu agregasına ek olarak maksimum tane çapı 1 mm olan 2 tip silis içerikli agrega ve mermer tozu kullanılmıştır.

Şekil 3.5. Çalışmanın ikinci aşamasında kullanılan mermer tozu ve silis içerikli agregalar

Harç karışımlarında kullanılan tuğla kırığı ve dere kumu için özgül ağırlık ve su emme oranı tayini, TS EN 1097-6'e göre yapılmıştır. 4 mm ve 0,063 mm göz açıklığına sahip elekler arasında kalan agregalar için standartta önerilen piknometre yöntemi kullanılmıştır. Denklem 3.1 ve 3.2 kullanılarak agregaların özgül ağırlık ve su emme oranları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 13' te gösterilmiştir.

$$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \tag{3.1}$$

$$WA = \frac{100x(M_1 - M_4)}{M_4} \tag{3.2}$$

M_1: Doygun ve havada yüzeyi kurutulmuş agreganın kütlesi (g),

M_2: Doygun agrega numunelerini ve su içeren piknometrenin kütlesi (g),

M_3: Yalnızca su ile doldurulmuş piknometrenin kütlesi (g),

M_4: Etüvde kurutulmuş deney numunesi kısmının havadaki kütlesi (g)

WA: Su emme oranı

ρ_{ssd}: Doygun ve yüzeyi kuru haldeki tane yoğunluğu

Çizelge 3.10. Harç karışımlarında kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

	Tuğla Kırığı	Dere Kumu
Kuru Yüzey Doygun Özgül Ağırlık	2,18	2,60
Kuru Özgül Ağırlık	1,89	2,57
Su Emme Kapasitesi (%)	15,11	1,31

3.1.4. Lif

Çalışma kapsamında Polisan Kimya A.Ş. tarafından temin edilen 3 mm uzunluğundaki polipropilen mikro lifler kullanılmıştır. Kullanılan lifin üretici firma tarafından belirlenen fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.12'de verilmiştir.

Çizelge 3.11. Harç karışımlarında kullanılan polipropilen life ait fiziksel ve mekanik özellikleri

Kompozisyon	%100 ham polipropilen
Tip	Monofilament mikro lif
Kesit	Yuvarlak
Standart	EN 14889, ASTM C1116, ASTM D7508
Uzunluk	3±1 mm
Kalınlık	30-32 μm
Çekme dayanımı	513-562 MPa
Elastisite modülü	4048-5674 MPa
Uzama	%20-25
Yoğunluk	0,91 gr/cm^3
Yüzey alanı	140 m^2/kg
Erime sıcaklığı	160°C

3.1.5. Kimyasal Katkı

Tez çalışmasının 1. aşamasında, lifli karışımların hazırlanmasında hedef yayılmanın sağlanabilmesi için polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı, numunelerde kuruma-büzülme etkisinden kaynaklanan dayanım kaybının engellenmesi/ azaltılması amacıyla glikol eter esaslı kuruma büzülme engelleyici (KBE) katkı kullanılmıştır. Kullanılan kimyasal katkılar Polisan Kimya A.Ş. tarafından temin edilmiştir. Kullanılan kimyasal katkılara ait, üretici firma tarafından belirlenen özellikler Çizelge 3.12 ve 3.13'te verilmiştir.

Çizelge 3.12. Polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı özellikleri

Tip	Katı madde	Yoğunluk (g/cm^3)	pH 25°C	Klor içeriği (%)	Alkali içeriği Na_2O (%)
Polikarboksilat esaslı	32	1,060	2-5	<0,1	<10

Çizelge 3.13. Glikol eter esaslı kuruma büzülme engelleyici katkı özellikleri

Tip	Yoğunluk (g/cm^3)	pH (25°C)
Glikol eter esaslı	0,934	6,77

3.2. Karışımların Hazırlanması

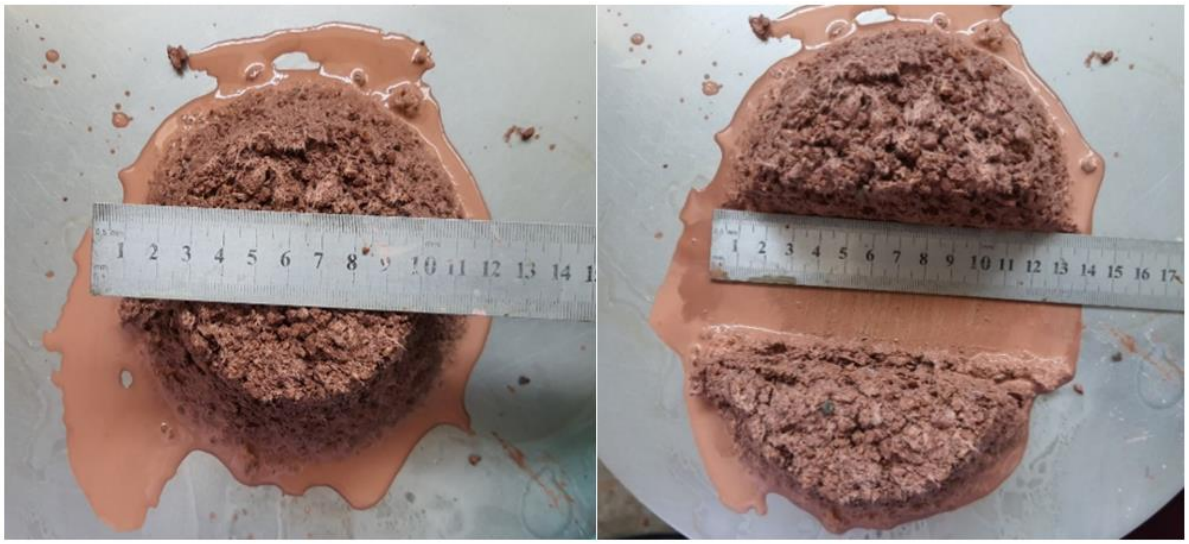
3.2.1. Aşama 1: Horasan harcı karışımlarının büzülme davranışının incelenmesi

Horasan harcı karışımlarının hazırlanmasında, bağlayıcının %80'i kireç, %20'si tuğla tozu olacak şekilde oranlar belirlenmiştir. Karışımlarda bağlayıcı/agrega oranı 1/3 olarak sabit tutulmuştur. Toplam agreganın kütlece %30'u dere kumu ve %70'i tuğla kırığı olacak şekilde karışımlar hazırlanmıştır.

Kontrol karışımının yanında kuruma-büzülme engelleyici katkı ve polipropilen lifin kullanıldığı toplam 4 seri horasan harcı karışımları hazırlanmıştır. Bu kapsamda, 1. seri kuruma büzülme engelleyici (KBE) katkı ve polipropilen lif içermeyen kontrol karışımıdır. 2. seride bağlayıcı ağırlığının %0,05, 0,1 ve 0,15 oranlarında kuruma-büzülme engelleyici katkı kullanılarak 3 farklı karışım üretilmiştir. 3. seri karışımda hacimce %0,4, %0,8 ve %1,20 oranlarında toplamda 3 farklı polipropilen lif takviyeli harç karışımı hazırlanmıştır. 4. seriye ait karışımlar ise, aynı oranlarda hem KBE katkı hem de polipropilen lif kullanılarak hazırlanmıştır.

Çalışma kapsamında harç karışımlarının aynı kıvama sahip olması için ASTM C1437'e göre yayılma miktarları 200±10 mm olarak belirlenmiştir. Bu amaçla, kuruma-büzülme engelleyici katkıların karışımlara az miktarda da olsa akıcılık kazandıracağı düşünüldüğünden dolayı, en yüksek yayılma değerine sahip olması beklenen %0,15 kuruma-büzülme engelleyici katkı içeren karışım seçilip hedef yayılmayı sağlamak için gerekli su miktarı belirlenmiştir. Yapılan yayılma deneyi sonucunda kontrol karışımı

için su/bağlayıcı oranı 1,20 olarak belirlenmiştir. Karışımlara lif ilavesiyle birlikte, işlenebilirliğinin azalması nedeniyle, çalışma kapsamında üretilecek karışımlar arasından istenilen yayılmaya ulaşması en zor olan karışımın hacimce %1,2 oranında lif içeren karışım olduğu ön görülmüştür. Bu amaçla bu karışımın hedef yayılma değerine ulaşmasını sağlayacak su azaltıcı katkı miktarının belirlenmesi için yayılma deneyi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde %1,2 oranında lif içeren karışımın çok katı kıvamda olduğu ve hedef yayılmayı sağlayamadığı, hedef yayılmaya ulaşmak için su ve su azaltıcı katkı miktarının arttırılması sonucu ise karışımlarda segregasyon meydana geldiği tespit edilmiştir (Şekil 3.6). Bu sebeple çalışma kapsamında kullanılacak lif oranları hacimce %0,4, 0,6 ve 0,8, hedef yayılma ise 150±10 mm olarak revize edilmiştir. Izaguirre vd. (2011), kireç esaslı harç karışımlarında aşırı su kullanımını önlemek ve uygun bir işlenebilirlik elde etmek için yaklaşık 150-170 mm aralığında bir yayılma önermişlerdir. Karışım oranlarındaki revizenin ardından KBE katkı içeren numunelerin hedef yayılma değerini sağladığı su/bağlayıcı oranı 0,91 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, KBE katkı içeren deneme karışımları üretilmiştir. Söz konusu karışımların kontrol karışımı ile aynı yayılma davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. Bu sebeple bu katkının akışkanlaştırıcı etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Buna ek olarak, diğer karışımlarda tespit edilen su miktarı sabit bir şekilde eklenerek istenilen yayılmayı sağlamak için su azaltıcı katkı gereksinimi belirlenmiştir.



Şekil 3.6. Hacimce %1,2 oranında lif içeren karışımın yayılma deneyi

Karışımların isimlendirilmesi kullanılan lif oranları ve KBE katkı oranları dikkate alınmıştır. Buna göre, lif ve KBE katkı içermeyen kontrol karışımı K, %0,10 oranında KBE katkı içeren karışım KBE10, %0,6 oranında lif içeren karışım P6, yüzde %0,8 lif ve %0,15 KBE katkı içeren karışım ise P8KBE15 olarak isimlendirilmiştir. Karışımlarda kullanılan tüm serilere ait malzeme miktarları Çizelge 3.14'te verilmiştir.

Çizelge 3.14. Karışımlarda kullanılan malzeme miktarları

Karışım	Kireç (gr)	Tuğla Tozu (gr)	Tuğla Kırığı (gr)	Dere Kumu (gr)	Su (gr)	Lif (%)*	KBE Katkı (%)**	SA*** Katkı (%)**
K	280	70	735	315	320	-	-	-
P4	280	70	735	315	320	0,4	-	0,28
P6	280	70	735	315	320	0,6	-	0,4
P8	280	70	735	315	320	0,8	-	0,5
KBE5	280	70	735	315	320	-	0,05	-
KBE10	280	70	735	315	320	-	0,10	-
KBE15	280	70	735	315	320	-	0,15	-
P4 KBE5	280	70	735	315	320	0,4	0,05	0,28
P4 KBE10	280	70	735	315	320	0,4	0,10	0,4
P4 KBE15	280	70	735	315	320	0,4	0,15	0,5
P6 KBE5	280	70	735	315	320	0,6	0,05	0,28
P6 KBE10	280	70	735	315	320	0,6	0,10	0,4
P6 KBE15	280	70	735	315	320	0,6	0,15	0,5
P8 KBE5	280	70	735	315	320	0,8	0,05	0,28
P8 KBE10	280	70	735	315	320	0,8	0,10	0,4
P8 KBE15	280	70	735	315	320	0,8	0,15	0,5

*Hacimce **Ağırlıkça ***Su Azaltıcı

3.2.2. Aşama 2: Puzolan türü ve kullanım oranı ile kür şartlarının Horasan harcı karışımlarının dayanım performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi

Tez çalışmasının ikinci aşamasında, Horasan harcı karışımlarının mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyen iki temel parametre olan puzolan türü ve kullanım oranı ile kür şartları incelenmiştir. Ancak bu aşamada, hazırlanan Horasan harcı karışımlarının performansı, tarihi yapıların onarımında sıklıklar tercih edilen hazır paket Horasan harçları ile kıyaslanmak istenmiştir. Bu amaçla, hazırlanan karışımların ticari hazır harçlarla kıyaslanabilmesi açısından hazır paket harçlarda olduğu şekilde toplam kuru malzeme karıştırılıp su/toplam kuru malzeme değişkeni üzerinden incelenmiştir.

Bu aşamada, ilk aşamada kullanılan tuğla tozundan farklı olarak, karışımlarda belirli oranlarda uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin kullanılmıştır. Söz konusu puzolanların kullanım oranları, literatürde mevcut çalışmalar doğrultusunda optimum olarak belirlenen aralıklar temel alınarak seçilmiştir. Bu kapsamda beş farklı harç karışımı serisi hazırlanmıştır.

Birinci seri, herhangi bir puzolan içermeyen kontrol karışımı olarak belirlenmiştir. İkinci seride, puzolan olarak kütlece %20 oranında tuğla tozu kirece ikame edilmiştir. Üçüncü ve dördüncü serilerde, sırasıyla %20, %30 ve %40 oranlarında uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kirece ikame edilmiştir. Beşinci seride ise kütlece %10, %20 ve %30 oranlarında metakaolin ikame edilmiştir.

Tüm karışımlarda bağlayıcı/agrega, su/katı malzeme, tuğla kırığı/dere kumu oranları ile hedef yayılma değeri sabit tutulmuştur. Bu parametreler sırasıyla 1/3, 0,23, 7/3 ve 160±20 mm olarak belirlenmiştir. Ayrıca, bu aşamada bir önceki aşamadan farklı olarak, kullanılan tuğla kırığı 63 mikron elekten elenerek toz malzemenin uzaklaştırılması sağlanmıştır. Böylece, harç karışımlarındaki ince malzeme miktarının etkisi sınırlandırılarak puzolan katkılarının mekanik özelliklere etkisi daha sağlıklı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Karışımlar içerdikleri puzolan türü ve oranına göre isimlendirilmiştir. Örneğin, puzolan içermeyen kontrol karışımı K, %20 oranında tuğla tozu içeren karışım TT20, %30 oranında uçucu kül içeren karışım UK30 şeklinde isimlendirilmiştir. Hazırlanan yeni karışım oranları ve hedef yayılma değeri için su azaltıcı katkı gereksinimleri Çizelge 3.15’te verilmiştir.

Çizelge 3.15. Harç karışımlarını oluşturan malzeme miktarları

Karışım	Kireç (gr)	Puzolan (gr)	Tuğla Kırığı (gr)	Dere Kumu (gr)	Su (gr)	Su Azaltıcı Katkı (gr)	Lif Miktarı (%)
K	350	-	735	315	320	0	0,4
TT20	280	70	735	315	320	0	0,4
UK20	280	70	735	315	320	0	0,4
UK30	245	105	735	315	320	0	0,4
UK40	210	140	735	315	320	0	0,4
YFC20	280	70	735	315	320	0	0,4
YFC30	245	105	735	315	320	0	0,4
YFC40	210	140	735	315	320	0	0,4
MK10	315	35	735	315	320	0,7	0,4
MK20	280	70	735	315	320	1,1	0,4
MK30	245	105	735	315	320	2	0,4

3.2.3. Aşama 3: Agrega türü, elek aralığı ve kullanım oranlarının Horasan harcının dayanım performansına etkisinin incelenmesi

Tez çalışmasının üçüncü aşamasında, harç karışımlarında iskelet görevi üstlenen agregaların türü, elek aralığı ve kullanım oranlarının basınç dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, dere kumu ve tuğla kırığının yanında karışımlarda mermer tozu ve silis kumu (quarz) da kullanılmıştır.

Bu aşamada kullanılan dere kumu ve tuğla kırığı agregaları, önceki aşamalardan farklı olarak maksimum tane çapı 2 mm olacak şekilde elenmiştir. Ayrıca, tuğla kırığı 63 µm'lik elekten geçirilerek fazla toz içeriğinden arındırılmıştır. Önceki aşamalardan farklı olarak, bu bölümde karışımlara maksimum tane çapı 1 mm olan mermer tozu ve iki farklı tip silis kumu ilave edilmiştir. Söz konusu malzemeler, dolgu malzemesi olarak toplam agrega kütlesine farklı oranlarda ikame edilerek harç karışımlarının dayanım özelliklerini artırmak amacıyla kullanılmıştır.

Tüm harç karışımlarında bağlayıcı olarak yalnızca doğal hidrolik kireç kullanılmış olup, herhangi bir puzolan katkısı eklenmemiştir. Bu aşamada hazırlanan karışımlara, ilk aşamada büzülme performansı açısından başarılı sonuç veren hacimce %0,4 oranında ve 3 mm uzunluğunda polipropilen lif eklenmesi de prosedüre dâhil edilmiştir.

Deneysel çalışmada bağlayıcı/agrega oranı, su/katı malzeme oranı ve hedef yayılma değeri sırasıyla 1/3, 0,23 ve 160±20 mm olarak sabit tutulmuştur. Harç karışımları, agregayı temsil eden "A" harfi ve 1, 2, 3 şeklinde numaralandırılarak isimlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan malzemeler ve karışım detayları Çizelge 3.16' da sunulmuştur.

Çizelge 3.16. Harç karışımlarında kullanılan malzeme miktarları

Karışım	Kireç (gr)	Tuğla Kırığı (gr)	Dere Kumu (gr)	Mermer Tozu (gr)	Silis kumu (gr)	Silis kumu-İnce (gr)	Su (gr)	Lif (%)
A1	350	735	315				320	0,4
A2	350	500	550	-	-	-	320	0,4
A3	350	500	350	200	-	-	320	0,4
A4	350	500	-	-	350	200	320	0,4

3.2.4. Aşama 4: Su/kuru malzeme oranı ve bağlayıcı/agrega oranının Horasan harcının dayanım performansına etkisinin incelenmesi

Tez çalışmasının bu aşamasında, patentlenebilir hazır tamir harcının geliştirilmesi amacıyla önceki aşamalardan yola çıkılarak kuru Horasan tamir harcı geliştirilmesi hedeflenmiştir. Harç karışımlarının mekanik performansını etkileyen temel parametreler olan su muhtevası ve bağlayıcı/agrega oranı sistematik olarak değiştirilmiştir. Numunelerin hidratasyon ve kürlenme süreçleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi amacıyla farklı su/toplam kuru malzeme oranları, harcın iç yapısal bütünlüğü ve agregaların dağılımı üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla ise bağlayıcı/agrega oranları deneysel parametreler olarak ele alınmıştır.

Harç karışımlarının hazırlanmasında, önceki aşamalarda elde edilen optimum karışım oranları dikkate alınmıştır. Bağlayıcı içeriği belirlenirken, ikinci aşamada gerçekleştirilen çalışmalar değerlendirilmiş ve optimum puzolanik malzeme olarak belirlenen metakaolin, bağlayıcı kütlesinin %20'si oranında doğal hidrolik kirece ikame edilmiştir. Agrega seçimi kapsamında, üçüncü aşamada elde edilen deneysel bulgular doğrultusunda, maksimum tane çapı 2 mm olacak şekilde, dere kumu ve tuğla kırığı agregaları 1:1 oranında karışıma dahil edilmiştir. Ayrıca, ilk aşamada elde edilen

olumlu sonuçlara dayanarak, tüm harç karışımlarına hacimce %0,4 oranında ve 3 mm uzunluğunda polipropilen lif eklenmiştir.

Bu aşamada incelenen parametreler doğrultusunda, su/toplam malzeme oranı 0,2 ve 0,25, agrega/bağlayıcı oranı ise 3 ve 2 olarak belirlenmiştir. Harç karışımlarında kullanılan malzeme miktarları Çizelge 3.17'de detaylıca verilmiştir. Harç karışımlarının isimlendirilmesi yapılırken agrega/bağlayıcı oranı ve su/kuru malzeme oranı dikkate alınmıştır. Örneğin agrega/bağlayıcı oranı 3 ve su/kuru malzeme oranı 0,25 olan karışım H325 olarak isimlendirilmiştir.

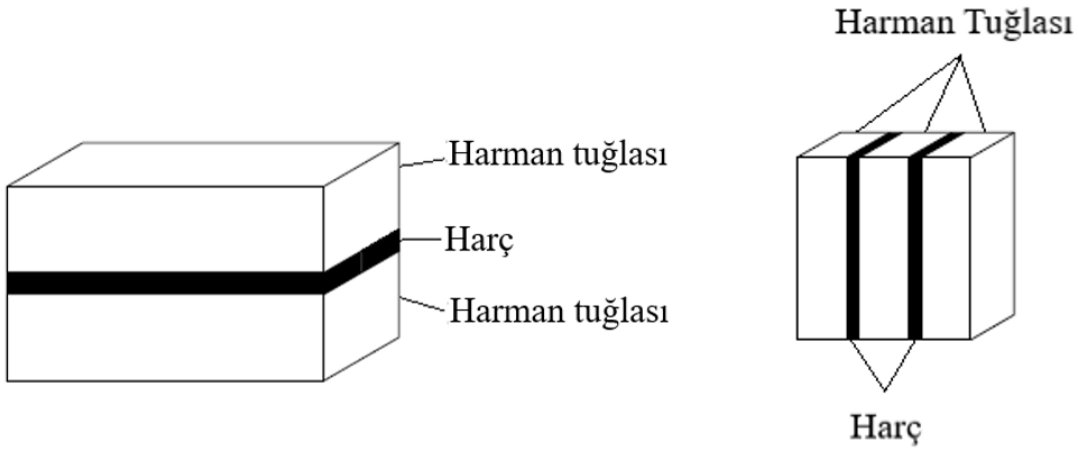
Çizelge 3.17. Harç karışımlarında kullanılan malzeme miktarları

İsimlendirme	Agrega / Bağlayıcı	Su/Kuru Malzeme	Tuğla kırığı (%)	Dere kumu (%)	Tuğla kırığı (gr)	Dere kumu (gr)	Kireç (gr)	Metakaolin (gr)	Lif (%)
H320	3	0,2	50	50	750	750	450	50	0,4
H325	3	0,25	50	50	750	750	450	50	0,4
H220	2	0,2	50	50	500	500	450	50	0,4
H325	2	0,25	50	50	500	500	450	50	0,4

3.3. Tuğla yığma prizma ve duvar numunelerinin dayanım performanslarının incelenmesi (Aşama 5)

Bu aşamada, önceki deneysel çalışmalar sonucunda dayanım açısından optimum performans gösterdiği belirlenen kireç esaslı onarım harcı kullanılarak, harman tuğlası ile yığma prizmalar ve yığma duvar numunesi oluşturulmuştur. Bu aşamanın temel amacı, geliştirilen harcın gerçek duvar uygulamalarında nasıl bir mekanik davranış sergilediğini belirlemek ve harç-tuğla arasındaki etkileşimi analiz etmektir.

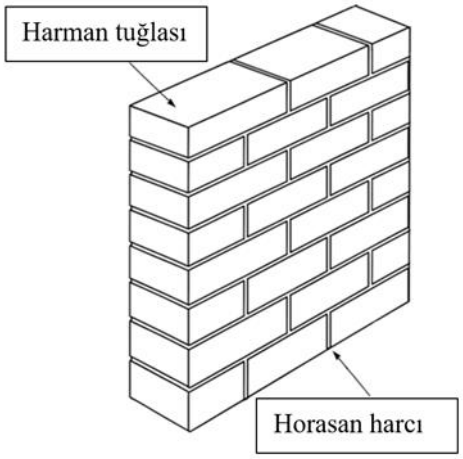
Deneysel süreç kapsamında, öncelikle yığma prizmalar hazırlanarak bu numuneler üzerinde basınç dayanımı ve kayma dayanımı testleri uygulanmıştır (Şekil 3.6). Basınç dayanımı testleri, prizma formundaki yığma elemanlarının eksenel yükler altındaki dayanım kapasitesini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Kayma testleri ise, harç ve tuğla arasındaki aderans özelliklerini ve kayma dayanımını değerlendirmek için uygulanmıştır.



Şekil 3.7. Basınç ve kayma dayanımı belirlenmek üzere hazırlanan yığma prizmaların temsili gösterimi

Bunun yanı sıra, oluşturulan yığma duvar numunesi üzerinde diyagonal basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu test ile duvar elemanının kesme dayanımı ve çatlak oluşum mekanizması incelenmiştir. Diyagonal basınç testi sırasında, numune belirli bir açıyla yüklenerek duvarın iç gerilmeleri, çatlak gelişimi ve nihai hasar mekanizması detaylı bir şekilde gözlemlenmiştir.

Yığma duvar numunesinin hazırlanmasında, 220x100x60 mm boyutlarında harman tuğlası ve çalışma kapsamında belirlenen oranlara sahip Horasan harcı kullanılmıştır. Seçilen harman tuğlaları, yatay doğrultuda 2,5 sıra, düşey doğrultuda 8 sıra ve şaşırtmalı olacak şekilde düzenlenmiş, sıralar arasındaki bağlayıcı harç tabakası yaklaşık 15 mm kalınlığında uygulanarak duvar numunesi oluşturulmuştur (Şekil 3.7). Numunenin inşasında, malzeme yerleşimi ve harç uygulaması standardize edilmiş yöntemlere uygun şekilde gerçekleştirilmiş, hazırlanan yığma duvar numunesinin yaklaşık boyutları 580x580x100 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3. 8. Çalışma kapsamında hazırlanan model yığma duvarın temsili gösterimi

Bu aşamada uygulanan tüm deneylerin prosedürleri, kullanılan test cihazları ve deneysel parametreler Deneysel Yöntemler bölümünde detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Elde edilen veriler, geliştirilen kireç esaslı onarım harcının yapısal elemanlar üzerindeki performansını değerlendirmek ve harcın geleneksel yığma sistemlerinde kullanım potansiyelini belirlemek açısından önemli bir veri seti sunmuştur. Sonuçlar, harç-tuğla etkileşimi, yük taşıma kapasitesi ve malzemenin dayanım karakteristikleri açısından detaylı olarak analiz edilmiştir.

3.4. Çalışma Kapsamında Uygulanan Deneysel Yöntemler

Çalışma kapsamında uygulanan deneyler ve faydalanılan standartlar bu bölümde detaylı olarak açıklanmıştır.

3.4.1. Çalışma Kapsamında Uygulanan Kür Koşulları

Çalışma kapsamında üretilen Horasan harcı numuneleri, hidratasyon ve dayanım gelişim süreçlerinin farklı kür koşullarından nasıl etkilendiğini incelemek amacıyla çeşitli kür rejimlerine tabi tutulmuştur. Uygulanan kür prosedürleri, deneysel aşamalara göre aşağıda detaylandırılmıştır:

Birinci Aşama: Hazırlanan harç karışımları, TS EN 1015-11 standardına uygun olarak ilk 48 saat boyunca kalıplarında bekletilmiştir. Ardından, numuneler yedi günlük bir

süre zarfında 20±2°C sıcaklık ve %95±5 bağıl nem koşullarına sahip bir kür odasında muhafaza edilmiştir. Bu sürenin sonunda, deney aşamasına kadar numuneler 20±2°C sıcaklık ve %65±5 bağıl nem ortamında muhafaza edilmiştir.

İkinci Aşama: Üretilen harç numuneleri, ilk 48 saat boyunca kalıplarında bekletildikten sonra, yedi gün süreyle 20±2°C sıcaklık ve %95±5 bağıl nem ortamında kür edilmiştir. Bu yedi günlük periyodun ardından, kür koşullarının dayanım üzerindeki etkisini sistematik olarak değerlendirmek amacıyla numuneler iki farklı ortamda muhafaza edilmiştir:

* Bir grup numune, standart laboratuvar koşulları olan 20±2°C sıcaklık ve %65±5 bağıl nem ortamında bekletilmiştir.
* Diğer bir grup numune ise kirece doygun su içerisinde tamamen batırılmış halde bekletilmiştir.

Üçüncü Aşama: Benzer şekilde, bu aşamada hazırlanan harç numuneleri, ilk 48 saat kalıplarında bekletildikten sonra, yedi gün süreyle 20±2°C sıcaklık ve %95±5 bağıl nem koşullarında kür edilmiştir. Deney gününe kadar ise numuneler 20±2°C sıcaklık ve %65±5 bağıl nem ortamında muhafaza edilmiştir.

Dördüncü Aşama: Bu aşamada üretilen numuneler, ilk 48 saat kalıplarında bekletildikten sonra, yedi gün süreyle 20±2°C sıcaklık ve %95±5 bağıl nem ortamında kür edilmiştir. Takiben, numuneler deney gününe kadar su içerisinde bekletilmiştir.

Beşinci Aşama: Bu aşamada hazırlanan numuneler, deney gününe kadar 20±2°C sıcaklık ve %65±5 bağıl neme sahip standart laboratuvar koşullarında muhafaza edilmiştir.

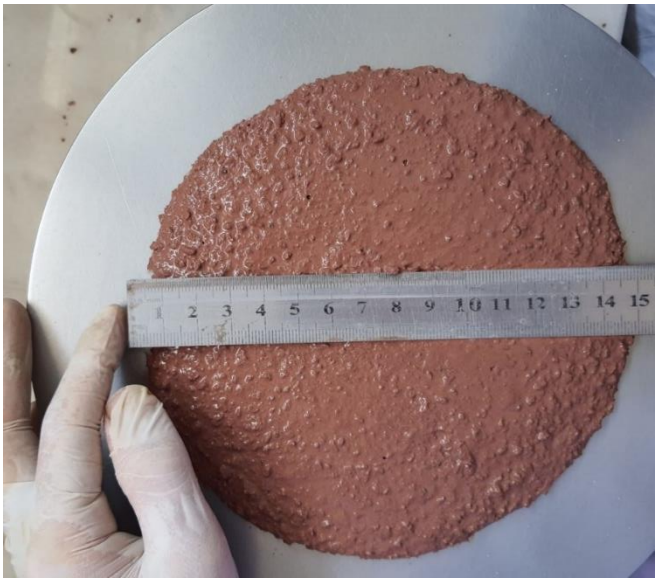
3.4.2. Taze Hal Deneyleri

Yayılma

Harç karışımlarının yayılma değerleri ASTM C1437 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında hazırlanan bazı karışımların zamana bağlı yayılma miktarları da ölçülmüştür. Zamana bağlı yayılma deneyleri, döküm sonrası 0, 15, 30, 45 ve 60. dakikalarda aşağıda açıklandığı şekilde gerçekleştirilmiştir.

1. Temizlenmiş yayılma tablasının ortasına kesik koni içerisine harç karışımı 2 aşamalı olarak doldurulmuş ve her aşamada 20 kere tokmak yardımıyla sıkıştırılmıştır. Kalıp dolduktan sonra üst yüzeyi düzeltilmiş ve yayılma tablası temizlenmiştir.

2. Kesik koni kaldırıldıktan sonra yayılma tablası 15 saniyede 25 kez düşürülerek numunenin yayılması sağlanmıştır. Yayılma tablası üzerindeki numune üzerinde birbirine dik doğrultuda yayılma çapı ölçülerek ortalaması alınarak kaydedilmiştir.



Şekil 3. 9. Harç karışımının yayılma miktarının ölçülmesi

Taze hal birim hacim ağırlık

Çalışma kapsamında, ilk aşamada, üretilen harç karışımları 2 aşamalı olarak sıkıştırma işlemi yapılarak kalıba doldurulmuştur. Kabın boş ve numune doldurulduktan sonraki ağırlıkları tartılmış (Şekil 3.9) ve numunelerin taze haldeki birim hacim ağırlıkları TS EN 1015-6'ya göre Denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen her bir sonuç üç ölçümden elde edilen sonucun ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

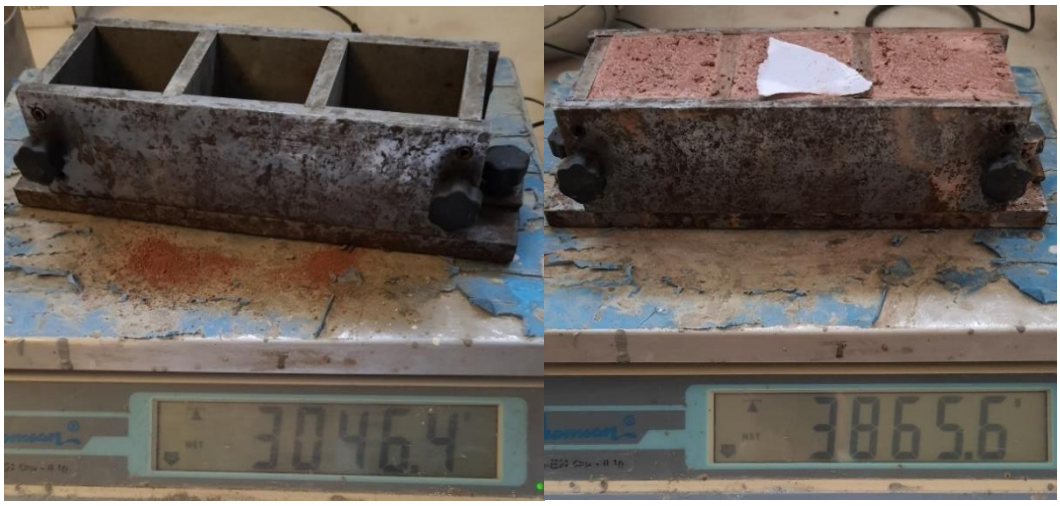
$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_v} \tag{3.3}$$

ρ_m: Taze harcın boşluklu birim hacim kütlesi (kg/m^3),

m_1: Boş kabın kütlesi (g),

m_2: Harç ile doldurulmuş kabın kütlesi (g),

V_v: Ölçü kabının hacmi (L)



Şekil 3. 10. Harcın taze hal birim hacim ağırlığının belirlenebilmesi için kalıbın boş ve dolu olarak tartılması

Hava içeriği

Harç karışımlarının hava içerikleri TS EN 413-2 standartlarına uygun olarak Şekil 3.10.'da görülen deney cihazı yardımıyla hesaplanmıştır. Üretilen harç standarda uygun olarak kabın üst seviyesinin hafif yukarısına gelecek kadar tabakalar halinde doldurulmuştur. Her bir tabaka sıkıştırma çubuğu ile 10 defa şişleme yapılarak yerleştirilmiştir. Kabın etrafı temizlendikten sonra kapak kabın üzerine oturtularak hava çıkışı engellenmiştir. Başlangıçta vanalar açık tutularak tahliye vanasından tüm hava boşalana ve su kabarcıksız olana kadar diğer vanadan su sıkılmış ve vanalar kapatılmıştır. Sisteme gerekli seviyeye kadar hava pompalandıktan sonra ince ayar yapılmış ve ayar vanası açılarak gösterge üzerinden hava miktarı okunmuştur.

Şekil 3. 11. Hava içeriği deney cihazı

3.4.3. Sertleşmiş hal özellikleri

Karışımların sertleşmiş hal özelliklerinin incelenmesi kapsamında üretilen numuneler TS EN 1015-11 standardına uygun olarak ilk 2 gün kalıp içerisinde, kalıptan çıkarıldıktan sonra 5 gün 20±2°C'de %95±5 bağıl nemli ortamda ve en son deney gününe kadar da 20±2°C'de, %65±5 bağıl nemli ortamda bekletilmiştir. Buna ek olarak, farklı kür şartlarının dayanım özelliklerine etkisinin incelendiği aşamalarda, numunelerin bir kısmı deney gününe kadar kirece doygun suda bekletilmiştir.

Su emme

Harç numunelerinin 28 günlük su emme deneyi ASTM C642 standardına göre yapılmıştır. 20±2°C ve %65±5 oranında neme sahip ortamda bulunan 50x50x50 mm boyutlarındaki numuneler standarda uygun olarak suda ve kütleleri ölçüldükten sonra sabit ağırlığa gelinceye kadar 110±5°C derecede etüvde bekletilmiştir. Yapılan ölçümler sonunda harç numunelerinin ağırlıkça su emme oranları Denklem 4 ile bulunmuştur. Elde edilen her bir sonuç, üç ölçümden elde edilen sonucun ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

$$\% = \left[\frac{(B - A)}{A}\right] x100 \tag{3.4}$$

A = Etüvde bekletilen numunenin kütlesi (g)

B = Suda bekletilen numunenin yüzey kuru kütlesi (g)

Kuruma Büzülmeye Bağlı Boy Değişimi

Kuruma büzülme boy değişimi ölçümleri ASTM C596 ve ASTM C157 standartlarına göre yapılmıştır. Bu amaçla üretilen harç karışımları 25x25x285 mm boyutlarında kalıplara 2 aşamalı olarak yerleştirilmiştir. Her bir karışım için 4'er adet numune üretilmiştir (Şekil 3.11). Bu numuneler diğer deneyler için üretilen numunelere göre daha narin olduğu ve kalıptan çıkarılırken kırılma riski olduğu için ilk 7 gün 20±2°C %95 bağıl nemde kalıpta kürlenmiştir. Ardından kuruma-büzülme ölçümleri boyunca 20±2°C %55±5 oranında neme sahip ortamda bekletilmiştir.

Şekil 3. 12. Harç karışımlarının kuruma büzülme kalıplarına yerleştirilmesi

Kuruma büzülme boy değişimi ölçümleri standarda uygun olarak dijital boy değişimi cihazı ile ölçülmüş boy değişimi Denklem 5 ile hesaplanmıştır. Elde edilen her bir sonuç, dört ölçümden elde edilen sonucun ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Numunelerin boy değişimi Şekil 3.12'de gösterilen cihaz yardımıyla ölçülmüştür.

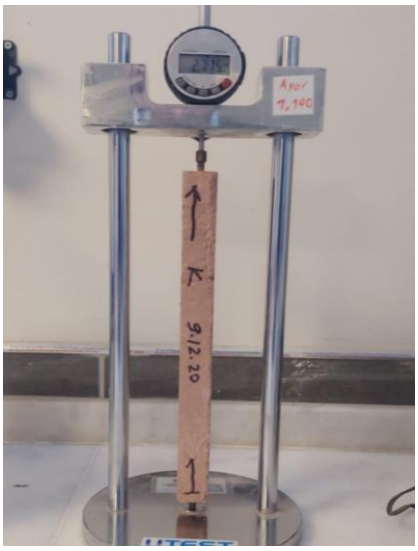
$$S = \frac{L_1 - L}{L_0} x100 \tag{3.5}$$

S: Numunelerin büzülme yüzdesi

L_1: Başlangıç ölçüm değeri

L : Sonraki günlerdeki ölçüm değeri

L_0: Etkin ölçüm boyu



Şekil 3.13. Kuruma büzülmeye bağlı boy değişimi ölçümü cihazı

Eğilme ve Basınç Dayanımı

Harç numunelerinin eğilme dayanımları TS EN 196-1 standardına göre belirlenmiştir. Bu amaçla 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik numuneler hazırlanmıştır. Eğilme deneyi uygulaması Şekil 3.14' te gösterilmiştir. Numunelerin eğilme dayanımları Denklem 6 ile hesaplanmıştır. Elde edilen her bir sonuç, üç ölçümden elde edilen sonucun ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

$$R_f = \frac{1,5xF_f xl}{b^3} \tag{3.6}$$

R_f : Eğilme Dayanımı (MPa)

b: Prizmanın kare kesitinin bir kenar uzunluğu (mm)

F_f : Prizmatik numunenin tam ortasından etkileyen yük (N)

l: Destek noktalarının birbirine uzaklığı (mm)

Şekil 3.14. Harç numunelerine eğilme deneyi uygulaması

Numunelerin basınç dayanımları TS EN 196-1 standardına göre belirlenmiştir. Bu amaçla eğilme dayanımı deneyinden sonra kırılan numuneler basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 3.15). Numune kırılıncaya kadar 0,05 kN/s yük yavaşça arttırılarak uygulanmıştır. Numunelerin basınç dayanımları Denklem 7 ile hesaplanmıştır.

$$R_c = F_c / 1600 \quad (3.7)$$

R_C: Basınç dayanımı (MPa)

F_C: Kırılmada maksimum yük (N)

1600: Numunenin kesit alanı (40mmx40mm)

Şekil 3.15. Harç numunelerine basınç deneyi uygulaması

3.4.3.4. Aşınma dayanımı

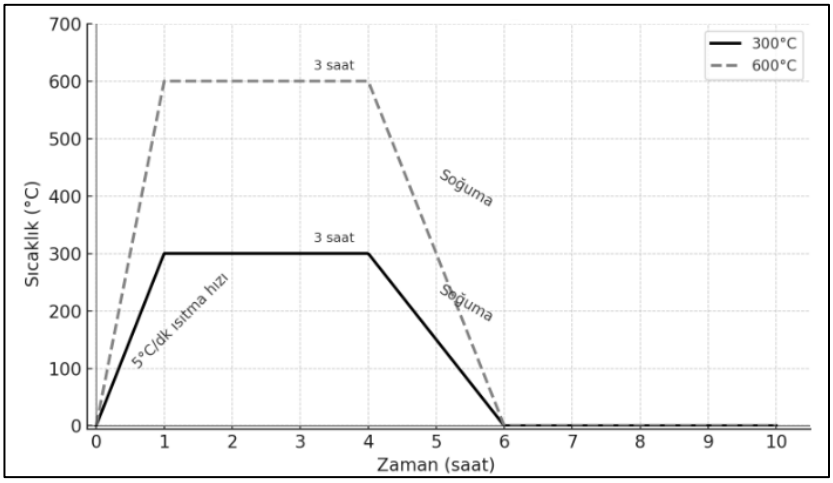
Numunelerin aşınma deneyi Böhme (Dorry) aşındırma cihazı ile EN 1338 standardına uygun olarak yapılmıştır (Şekil 3.16). 90 günlük 71±1,5 mm kenar uzunluğuna sahip kare harç numuneleri 110±5˚C etüvde sabit kütleye gelene kadar kurutulmuştur. İlk kütleleri ölçüldükten sonra numuneler aşınma deneyine tabi tutulmuştur. 75 cm çaplı aşındırma diskine yerleştirilen numunelere 20 gr standart aşındırıcı toz serpilerek ve numunelerin üzerine 294±3 N'luk ağırlık yüklenip disk hareket ettirilerek (30±1 devir/dk) deney gerçekleştirilirmiştir. Numunelere uygulanan bir çevrim 22 turdan oluşmaktadır ve toplamda 16 çevrim uygulanmıştır. Her çevrimden sonra numunelerin kütleleri ölçülerek aşınma kaynaklı kütle kayıpları tespit edilmiştir.

Şekil 3.16. Aşınma deneyi sırasında numunenin görünümü

Yüksek sıcaklık dayanımı

Yüksek sıcaklık deneyi 90 günlük 50 mm boyutlarında küp numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.17). Numuneler yüksek sıcaklığa maruz bırakılmadan önce 105 ˚C etüvde sabit kütleye gelene kadar bekletilmiştir. Daha sonra numuneler kül fırınında, 300 ve 600˚C'ye maruz bırakılmıştır. Bu işlem sırasında numuneler 5°C/dk'lık bir sıcaklık artışı ile 300 ve 600°C'lik test sıcaklığına ulaşıldıktan sonra 3 saat süreyle söz konusu sıcaklıklarda tutulmuş ve fırın içerisinde kendi halinde soğumaya bırakılmıştır (Şekil 3.18). Kül fırınından çıkarılan numunelerin kütlesi, ultra ses geçiş hızı ve basınç dayanımı değerleri belirlenmiştir.

Şekil 3.17. Numunelerin deney için hazırlanması



Şekil 3.18. Numunelerin maruz bırakıldıkları sıcaklığın zamana bağlı değişimi (Durgun vd., 2022)

3.4.4. Analiz ve Mikroyapı incelemesi

Sertleşmiş numunelerin kırılma yüzeylerinin mikro yapısal özellikleri, yüzey morfolojisi ve kimyasal bileşimi, ileri karakterizasyon teknikleri kullanılarak detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu kapsamda, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yüzey yapısı ve mikro yapı incelenmiş, X-ışını kırınımı (XRD) yöntemiyle kristal faz dağılımı ve yapısal bileşenler belirlenmiş, ayrıca termogravimetrik analiz (TGA) aracılığıyla numunelerin termal stabilitesi ve bileşenlerin bozunma davranışları değerlendirilmiştir. Yapılan analizler, sertleşmiş numunelerin malzeme karakterizasyonu açısından bütüncül bir bakış açısı sunarak, mikro yapı-makro özellik ilişkilerinin anlaşılmasına katkı sağlamaktadır.

3.4.5. Yığma prizma ve duvar modeli üzerinde gerçekleştirilen deneyler

Deneysel çalışma sonucunda elde edilen optimum harç karışımı ve harman tuğlası kullanılarak oluşturulacak yığma duvarın mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda tuğla-harç arayüzünün basınç ve kayma etkisine karşı dayanımı ve yığma duvar modelinin diyagonal basınç altındaki dayanımı ayrı ayrı test edilmiştir.

Yığma prizmalar, ASTM C1314 Standardına uygun olarak, belirlenen boyut, malzeme ve bağlayıcı özellikleri dikkate alınarak hazırlanmış ve kürleme süreci tamamlandıktan

sonra standart koşullar altında test edilmiştir (Şekil 3.19). Bu testler sırasında, prizmaların eksenel basınç dayanımları, yükleme hızı ve test prosedürleri ASTM C1314'te belirtilen kriterlere göre belirlenmiş, elde edilen veriler doğrultusunda, prizmaların taşıyabildikleri maksimum basınç yükü en kesit alanına bölünerek prizmaların karakteristik basınç dayanımları hesaplanmıştır.

Şekil 3.19. Yığma prizmaların basınç dayanımlarının belirlenmesi

Yığma prizmalar, ASTM C1823 Standardına uygun olarak, birim duvar elemanlarının düzenlenmesi, harç birleşimlerinin oluşturulması ve prizma boyutlarının belirlenmesi suretiyle hazırlanmıştır. Numuneler, standardın öngördüğü süre boyunca uygun çevresel koşullarda kürlenmiş ve mekanik özelliklerin stabilizasyonu sağlandıktan sonra kayma dayanımlarının belirlenmesi amacıyla ASTM C1823'te tanımlanan test yöntemlerine tabi tutulmuştur (Şekil 3.20). Test sürecinde, yükleme hızı, uygulama yöntemi ve sınır koşulları standart gerekliliklere uygun olarak belirlenmiş, elde edilen sonuçlar doğrultusunda yığma prizmaların kayma dayanımları hesaplanmıştır. Yığma prizmaların kesme dayanımları hesaplanırken Denklem 8' den faydalanılmıştır.

$$B_n = P / A_n \tag{3.8}$$

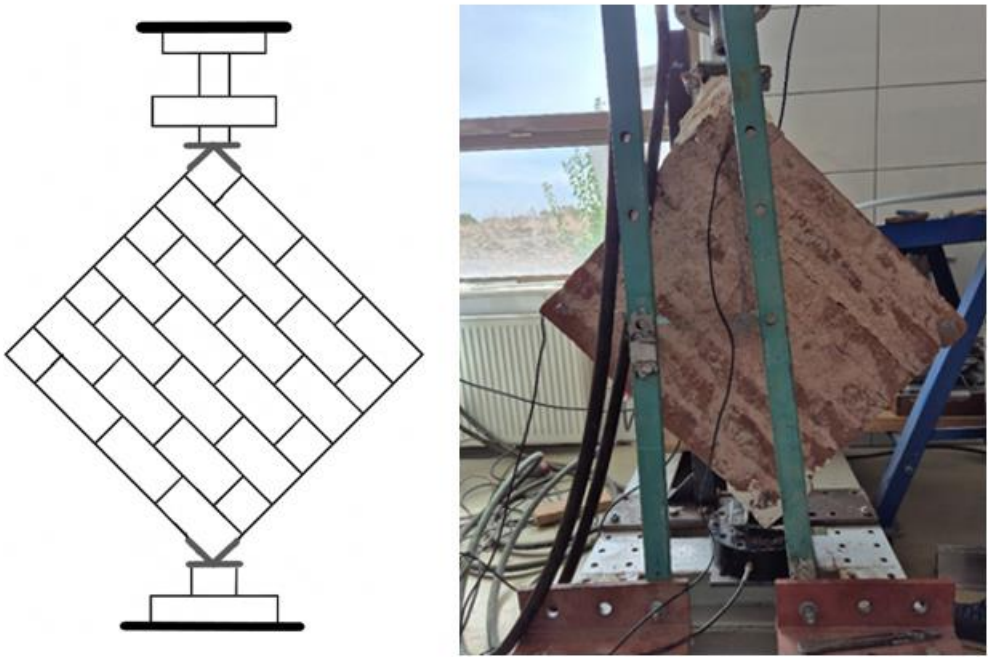
B_n: Net kesme gerilmesi (MPa)

P: Nihai deney yükü (N)

A_n: Temas yüzeyi alanı (mm^2)

Şekil 3.20. Yığma prizmaların kayma dayanımlarının belirlenmesi

Çalışma kapsamında elde edilen harcın kullanıldığı yığma duvarın kesme dayanımının belirlenmesi amacıyla, ASTM E519 Standardına uygun olarak diyagonal basınç deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.21). Bu doğrultuda, yığma duvar numunesi, standardın öngördüğü boyut, malzeme özellikleri ve bağlayıcı faktörler dikkate alınarak hazırlanmış ve uygun kürleme sürecine tabi tutulmuştur. Deney sırasında, ASTM E519'de belirtilen yükleme prosedürleri, sınır koşulları ve deformasyon ölçüm yöntemleri uygulanmış olup, test sonucunda duvarın kayma dayanımı, yük-deformasyon davranışı ve çatlak oluşum mekanizması analiz edilmiştir. (Şekil 3.21).



Şekil 3.21. Yığma duvar modelinin diyagonal basınç deneyine tabi tutulması

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Aşama 1

4.1.1. Taze Hal

Çalışmanın ilk aşamasında taze hal özelliklerinin belirlenmesi kapsamında karışımların hedeflenen yayılma değerine ulaşmak için gereken su azaltıcı katkı ihtiyacı, zamana bağlı yayılma, birim hacim ağırlık ve hava içeriği gibi özellikleri incelenmiştir.

Bilindiği üzere lif kullanımı karışımların taze hal özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu sebeple karışımların taze hal özelliklerinin belirlenmesine polipropilen lif içeren karışımlardan başlanmıştır. Bu amaçla, kontrol karışımı ve farklı lif oranlarına sahip harç karışımları hazırlanarak öncelikle 160 ± 20 mm hedef yayılma değeri için gerekli su azaltıcı katkı miktarı ve zamana bağlı yayılma değerleri belirlenmiştir (Çizelge 4.1).

Çizelge 4.1. Harç karışımlarının karışımların hedeflenen yayılma değerine ulaşmak için gerekli su azaltıcı katkı miktarı

Numune Kodu	SA* Katkı Miktarı (%)**	Yayılma miktarı (mm)
K	-	156
KBE5	-	158
KBE10	-	156
KBE15	-	157
P4	0,28	160
P6	0,4	159
P8	0,5	140
P4KBE5	0,28	160
P4KBE10	0,28	157
P4KBE15	0,28	158
P6KBE5	0,4	140
P6KBE10	0,4	145
P6KBE15	0,4	146
P8KBE5	0,5	150
P8KBE10	0,5	153
P8KBE15	0,5	152

*Su Azaltıcı **Ağırlıkça

Lifli karışımların su azaltıcı katkı gereksinimi belirlendikten sonra, lif içermeyen kontrol karışımı ile yalnızca kuruma büzülme engelleyici (KBE) katkı içeren karışımların hedeflenen yayılma değerine ulaşmak için gerekli olan su azaltıcı katkı miktarları tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1'den görüldüğü gibi, kontrol karışımında hedeflenen akış değeri yalnızca karışım suyuyla sağlanmış olup su azaltıcı katkı maddesi kullanımına ihtiyaç duyulmamıştır. Ancak, lif ilavesi ve lif kullanım oranındaki artışın, hedef akış değerine ulaşabilmek için gerekli su azaltıcı katkı miktarını artırdığı gözlemlenmiştir. Su azaltıcı katkı içeren lifli karışımlarda, aynı oranda kuruma büzülme engelleyici katkı maddesi kullanıldığında, akış değerlerinin aynı miktarda lif içeren ancak su azaltıcı katkı içermeyen karışımlara oldukça yakın olduğu belirlenmiştir. Buna ek olarak, yalnızca KBE katkı içeren karışımlarda, hedef akış değerine kontrol karışımında olduğu gibi doğrudan karışım suyuyla ulaşıldığı tespit edilmiştir.

Harç karışımlarının tespit edilen hava içeriği ve birim hacim ağırlıkları Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü üzere karışımlara lif ilavesiyle harçların hava içeriğinin %40-45 oranlarında arttığı ve birim hacim ağırlığının %5-7 azaldığı belirlenmiştir.

Liflerin karışım içerisinde topaklanma eğilimi, homojen dağılımı engelleyerek boşluk oluşumuna neden olmakta ve bu durum, karışımın hava içeriğini artırıp birim hacim ağırlığını azaltmaktadır. Literatürde, Barbero-Barrera ve ark. (2018) ile Puertas ve ark. (2003) tarafından polipropilen liflerinin harç matrisine ilavesinin işlenebilirliği olumsuz yönde etkilediği ve dolayısıyla malzemenin sıkıştırılmasını zorlaştırdığı rapor edilmiştir.

Izaguirre ve ark (2011) kireç esaslı harç karışımlarda yüksek oranda (%0,5) polipropilen lif kullanılmasının karışımların yeterli miktarda sıkıştırılamamasına sebep olduğunu belirtmişlerdir. Buna bağlı olarak da hava içeriğinin yüksek ve yoğunluğunun düşük olabileceğini ileri sürmüşlerdir.

Çizelge 4.2. Harç karışımlarının taze hal birim hacim ağırlıkları ve hava içerikleri

Numune Kodu	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m^3)	Hava İçeriği (%)
K	2201,6	4,0
P4	2093,3	5,8
P6	2058,9	5,6
P8	2047,5	5,6
KBE5	2202,7	4,4
KBE10	2182,7	4,0
KBE15	2105,6	4,0
P4 KBE5	2093,6	7,0
P4 KBE10	2071,2	6,8
P4 KBE15	2061,9	5,8
P6 KBE5	1946,7	7,2
P6 KBE10	1940,9	7,8
P6 KBE15	2101,3	6,3
P8 KBE5	1946	6,2
P8 KBE10	1874,7	5,6
P8 KBE15	1864,7	5,8

4.1.2. Sertleşmiş Hal Özellikleri

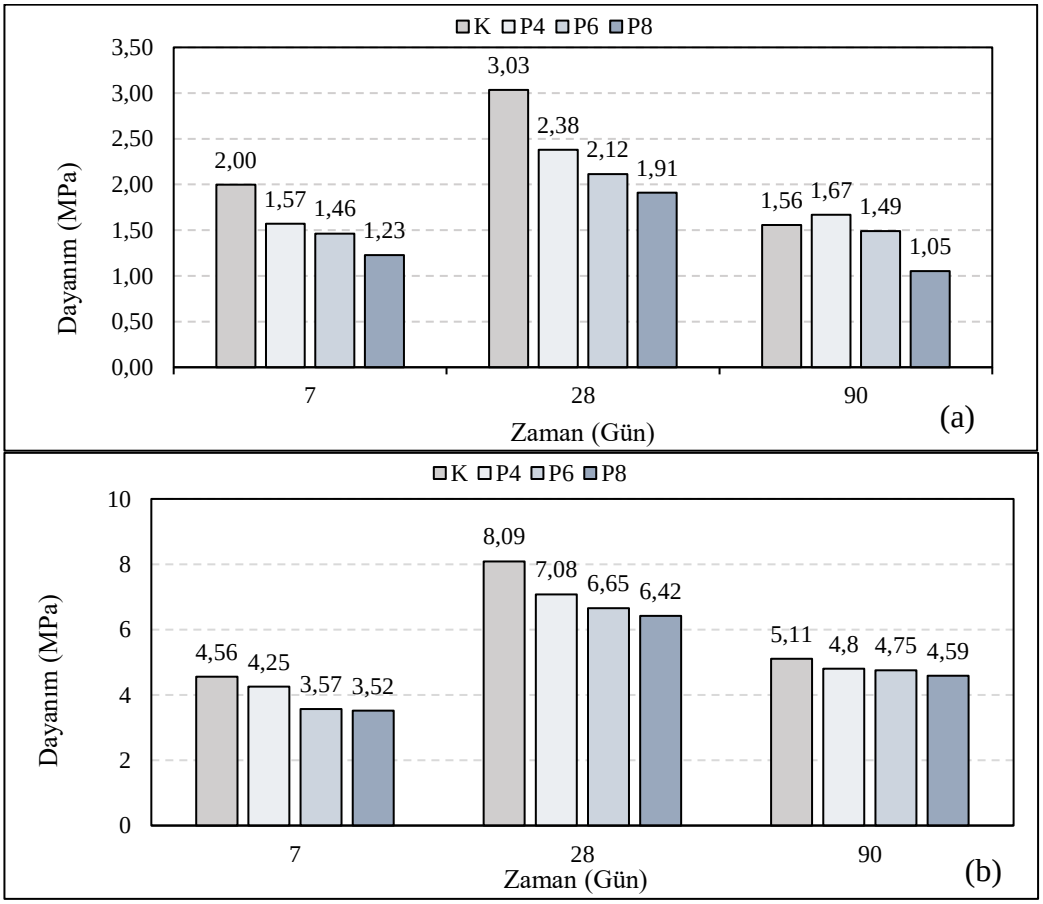
Eğilme ve Basınç Dayanımı

Harç numunelerinin 7, 28 ve 90 günlük eğilme ve basınç dayanımları Şekil 4.2, 4.4 ve 4.5' te sunulmaktadır. Deney sonuçları, lif ve kuruma büzülme engelleyici (KBE) katkı kullanım oranından bağımsız olarak, numunelerin ilk 28 gün içerisinde eğilme ve basınç dayanımlarında artış olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, 90 günlük numunelerde, 28 günlük numunelere kıyasla dayanım değerlerinde bir azalma meydana gelmiştir. Materyal ve yöntem bölümünde açıklandığı üzere, numuneler deney gününe kadar EN 1015-11 standardına uygun olarak 20±2°C sıcaklık ve %65±5 bağıl nemli kürleme koşullarına tabi tutulmuştur. Hava kürlemesi uygulanan numunelerde, zamanla serbest suyun buharlaşması sonucu nem içeriğinde azalma meydana gelmektedir. Bu durum, 90 günlük dayanım değerlerinde gözlemlenen düşüşün, priz alma sürecine bağlı olarak oluşan mikro çatlaklardan kaynaklandığını düşündürmektedir.

Grilo ve arkadaşları (2014), metakaolin içeren hidrolik kireç harçlarında, kararsız C-A-H ürünlerinin oluşumu nedeniyle mukavemet kaybı meydana geldiğini belirtmiştir. Bu

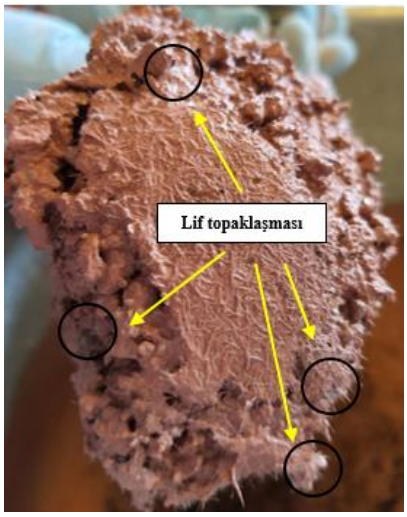
çalışmada ise, söz konusu puzolanlarla benzer özellikler taşıyan tuğla tozu kullanılmıştır. Bu doğrultuda, benzer bir davranışın gerçekleştiği varsayılmaktadır. Buna bağlı olarak, kararsız C-A-H ürünleri ile büzülme çatlaklarının zamanla meydana gelen hidrolik reaksiyon sonucu mukavemet gelişimini baskılayarak basınç dayanımında azalmaya neden olduğu düşünülmektedir. Benzer sonuçlar, Gameiro ve arkadaşları (2012) tarafından da rapor edilmiştir.

Her yaş grubunda, harç karışımlarında lif kullanımı, numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarında düşüşe yol açmıştır. Şekil 4.1' de görüldüğü üzere, P4 numunesinde eğilme ve basınç dayanımlarındaki azalma, kontrol karışımına kıyasla sırasıyla %0-9 ve %6-12 aralığında gerçekleşirken, P6 numunesinde bu oranlar %1-12 ve %7-22, P8 numunesinde ise %3-17 ve %10-23 olarak belirlenmiştir. Lif kullanımı, diğer yaş gruplarına kıyasla 90 günlük dayanımlarda belirgin bir etki göstermemiş olup, K, P4, P6 ve P8 numunelerinin basınç dayanımları birbirine yakın değerler sergilemiştir.



Şekil 4.1. Lif içeren karışımlara ait numunelerin eğilme (a) ve basınç (b) grafikleri

Şekil 4.2’de açıkça görüldüğü gibi lifli karışımlarda eğilme ve basınç dayanımlarında gözlemlenen azalmanın, karışım içerisindeki liflerin topaklaşması (aglomerasyonu) sonucu sıkıştırılabilirliğin azalması ve buna bağlı olarak boşluk oluşumunun artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, Çizelge 4.1' de gösterildiği üzere, polipropilen lif içeren karışımların hava içeriği, kontrol karışımına göre daha yüksek bulunmuştur. Numunelerde oluşan çatlaklar da göz önünde bulundurulduğunda, yükleme sırasında matris ile liflerin birlikte çalışmadığı değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda, karışımdaki lif içeriğinin artmasıyla söz konusu olumsuz etkinin daha belirgin hale geldiği sonucuna varılmıştır.

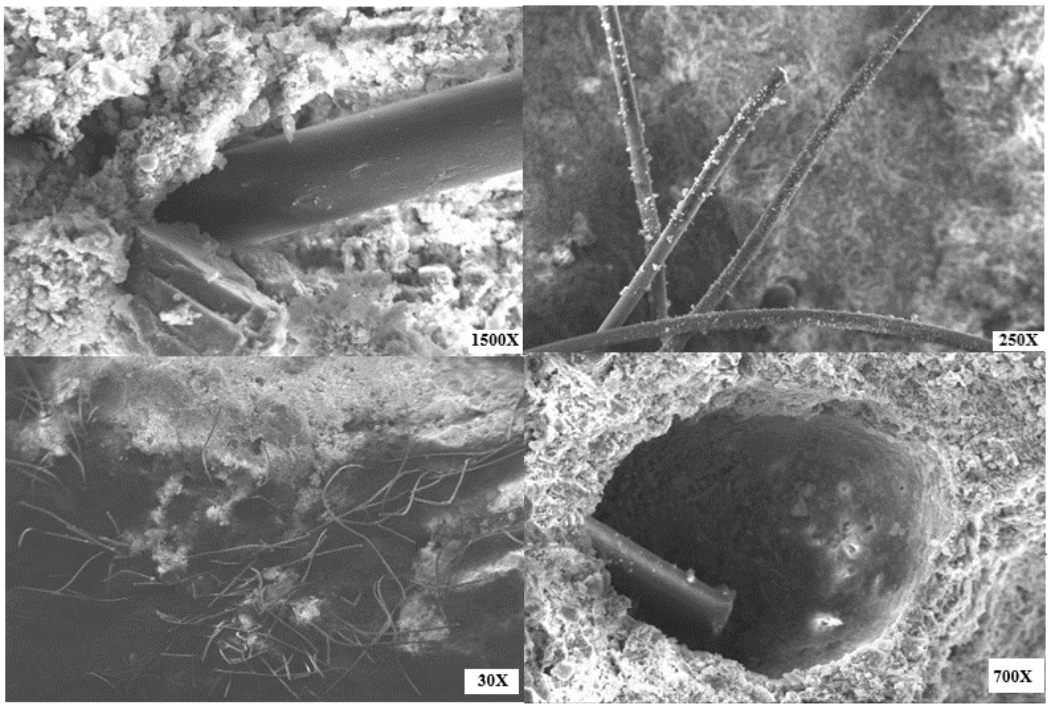


Şekil 4.2. Lifli harç karışımlarında gözlenen lif topaklaşması

Şekil 4.1' de görüldüğü üzere, eğilme ve basınç dayanımı sonuçları birbirleriyle uyumlu bir eğilim sergilemektedir. Bununla birlikte, 90 günlük numunelerin eğilme ve basınç dayanımları, 28 günlük numunelere kıyasla daha düşük bulunmuştur. Daha önce de ifade edildiği gibi, polipropilen liflerin büzülme çatlaklarının neden olduğu olumsuz etkileri büyük ölçüde önleyemediği belirlenmiştir. Ancak, liflerin 90 günlük dayanımlardaki azalma oranını kısmen azaltıcı bir etki gösterdiği görülmüştür.

Şekil 4.3' te P8 numunesinin SEM görüntüleri sunulmaktadır. Görseller incelendiğinde, lif yüzeyinin pürüzsüz olması ve lif yüzeylerinde daha az agrega parçacığı bulunması, liflerin matrisle aderansının zayıf olduğunu göstermektedir. Ayrıca, liflerin belirli bölgelerde yoğunlaşarak aglomere olduğu ve bu durumun matris içinde boşluklar ve

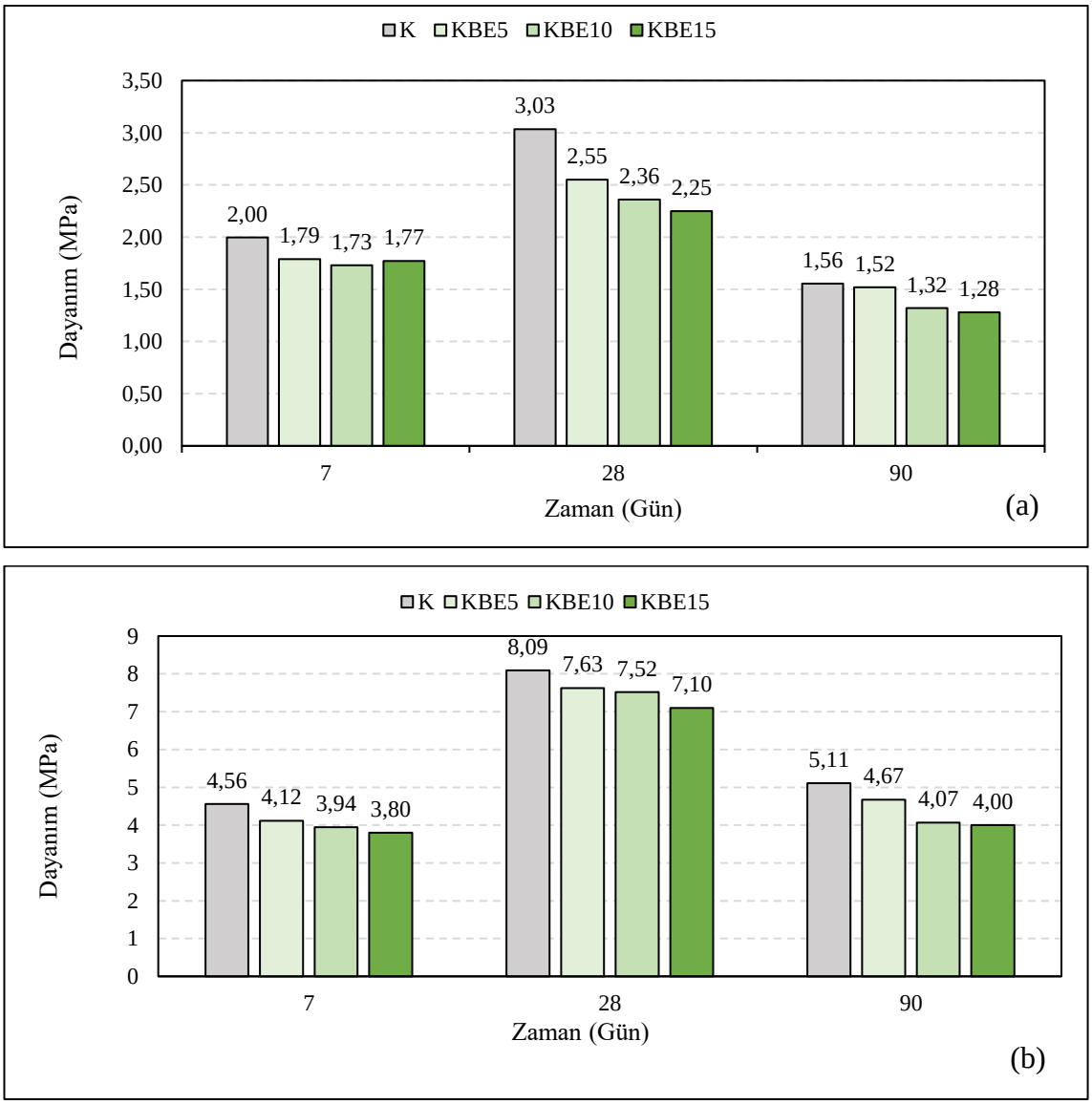
uyumsuzluklara neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu yapısal düzensizliklerin, polipropilen lif içeren örneklerin mukavemetinde düşüşe sebep olduğu düşünülmektedir. Benzer sonuçlar literatürde yer alan farklı çalışmalarda da rapor edilmiştir (Izaguirre, Lanas ve Alvarez, 2011; Benchiheub vd., 2018).



Şekil 4.3. a) Lifin pürüzsüz yüzey görüntüsü, b) Lif matris aderansının sağlanamadığını gösteren görüntü, c) Lifin matris içerisinde homojen dağılmadığını gösteren görüntü d) Harcın boşluklu yapısını gösteren görüntü

Kuruma büzülme engelleyici katkı içeren numunelerin eğilme ve basınç dayanımları Şekil 4.4' te gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, KBE katkı içeren harç karışımlarında eğilme ve basınç dayanımları, 7 günlük dayanımlara kıyasla 28 günlük yaşta artış göstermiştir. Bu eğilim, lif içeren karışımlarla benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte, 90 günlük numunelerin dayanım değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Kürlenme süresinden bağımsız olarak, KBE katkı kullanım oranındaki artışın dayanım özelliklerini olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir. Eğilme ve basınç dayanımlarındaki azalma oranları, kontrol karışımına kıyasla KBE5 için yaklaşık %11-26 ve %12-22, KBE10 için %13-22 ve %7-20, KBE15 için ise %2-16 ve %6-10 aralığında gerçekleşmiştir. Ayrıca, 28 günlük dayanım sonuçlarına kıyasla, 90 gün sonunda numunelerde eğilme ve basınç dayanımlarında sırasıyla %40-44 ve %38-46

oranında azalmalar gözlemlenmiştir. Literatürde bazı araştırmacılar, KBE katkı kullanımının çimentolu sistemlerin mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkileri olduğunu belirtmiştir (Weiss, 1999; Maltese vd., 2005; Güneyisi vd., 2014; Yoo vd., 2015; Gao vd., 2018). Bu sonuçların, bu çalışmada elde edilen verilerle uyumlu olduğu değerlendirilmektedir.

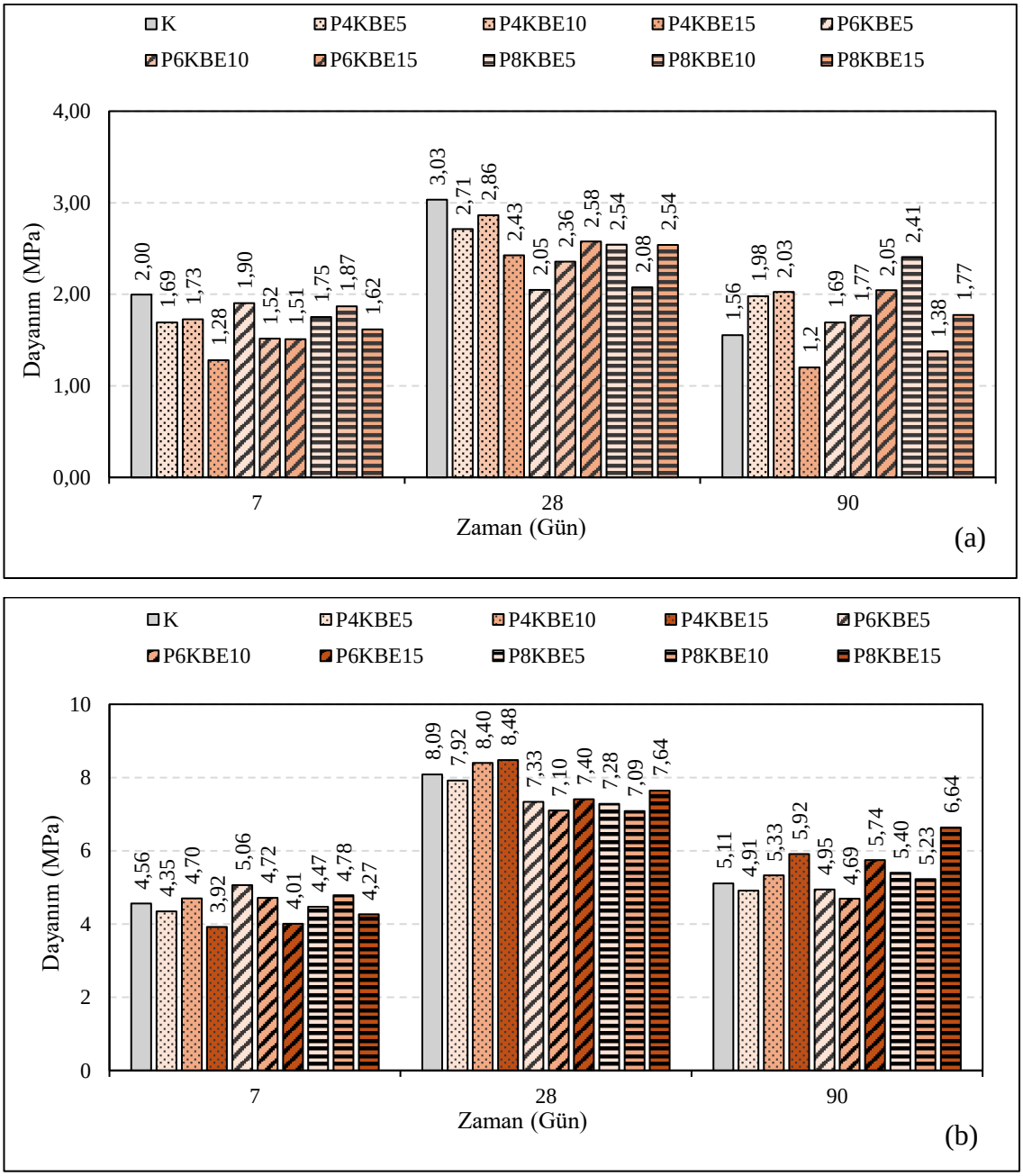


Şekil 4.4. Kuruma büzülme engelleyici katkı içeren karışımlara ait numunelerin eğilme (a) ve basınç (b) dayanımları

KBE katkı kullanımının basınç dayanımını etkileyen iki temel mekanizma olduğu literatürde belirtilmektedir. İlk olarak, çimentolu sistemlerde, KBE katkı moleküllerinin su-katı ara yüzeyinde adsorpsiyon oluşturduğu, bunun da çimento partiküllerinin yüzey

enerjisinde azalmaya ve hidratasyon ürünlerinin oluşumunda gecikmeye neden olduğu ifade edilmiştir (Wehbe ve Ghahremaninezhad, 2017). Bu doğrultuda, karışımlarda priz gecikmesine bağlı olarak erken yaş dayanımlarında düşüş gözlemlenmesi beklenmektedir (Brooks vd., 2000; Weiss vd., 1999). Ayrıca, su azaltıcı katkıların KBE katkı ile birlikte kullanılması durumunda, erken yaş dayanımlarındaki azalmanın daha belirgin hale geldiği belirtilmiştir (Brooks vd., 2000). İkinci olarak, KBE katkının 0,1 µm'nin üzerindeki gözenek içeriğini ve toplam gözenekliliği artırdığı ifade edilmektedir (Chunxiang vd., 2006). Bununla birlikte, bazı araştırmacılar KBE katkının, suyun yüzey gerilimini düşürerek bağlayıcı faz içerisindeki parçacıklar arası çekim kuvvetinin azalmasına neden olduğunu ileri sürmektedir. Bu durum, hamur fazının iç yapısını değiştirerek mekanik özelliklerde azalmaya yol açabilmektedir (Shah vd., 1992; Brooks vd., 2000). Sonuç olarak, KBE katkının bu etkilerinin, numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarında düşüşe neden olduğu meydana düşünülmektedir.

Şekil 4.5' te hem polipropilen lif hem de KBE katkı içeren harç karışımlarının eğilme ve basınç dayanımı sonuçları sunulmaktadır. Lif ve KBE katkı kullanım oranından bağımsız olarak, tüm karışımların dayanımlarının 7 günden 28 güne kadar arttığı gözlemlenmiştir. 7 günlük numunelerin dayanımları genel olarak birbirine yakın olmakla birlikte, P6KBE5 ve P6KBE10 karışımları bu eğilimin dışında kalmıştır. Kontrol numuneleri ile kıyaslandığında, P6KBE5 numunesinin dayanımı %30 oranında artış gösterirken, PKBE10 numunesinin dayanımında %50 oranında azalma meydana gelmiştir. Genel bir değerlendirme yapıldığında, 28 günlük numunelerde dayanım değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, bu dayanım azalmasının temel nedeninin, polipropilen liflerinin karışım içinde aglomerasyon oluşturması sonucunda gözenekliliğin artması olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.5. Hem lif hem KBE katkı içeren karışımlara ait numunelerin eğilme (a) ve basınç (b) dayanımları

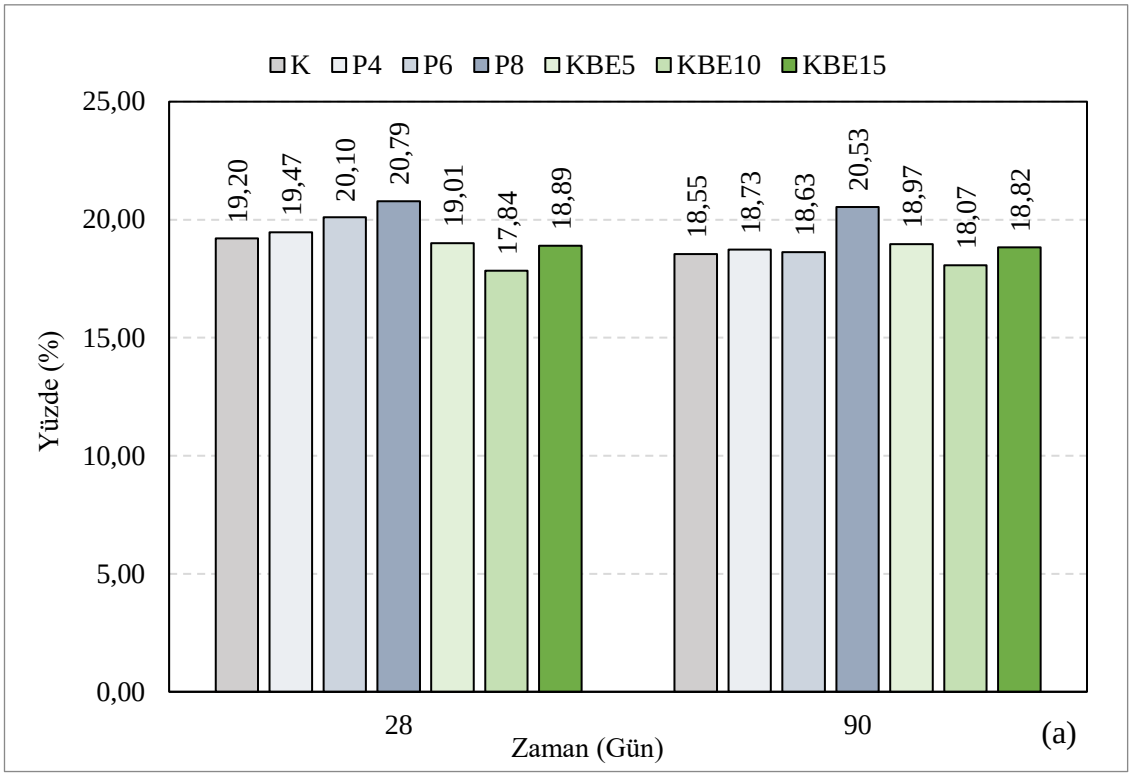
Literatürde, lif ve KBE katkıların birlikte kullanımı üzerine yapılan çalışmalarda farklı sonuçlar elde edilmiştir. Yoo ve ark. (2015), KBE katkı kullanımının lif ve matris arasındaki geçiş bölgesindeki gözenekliliği artırdığını ve bu durumun yüksek dayanımlı beton karışımlarının eğilme dayanımını olumsuz etkilediğini belirtmiştir. Ayrıca, KBE katkının büzülmeyi azaltmasıyla birlikte, lif ve matris arasında sürtünmeden kaynaklı

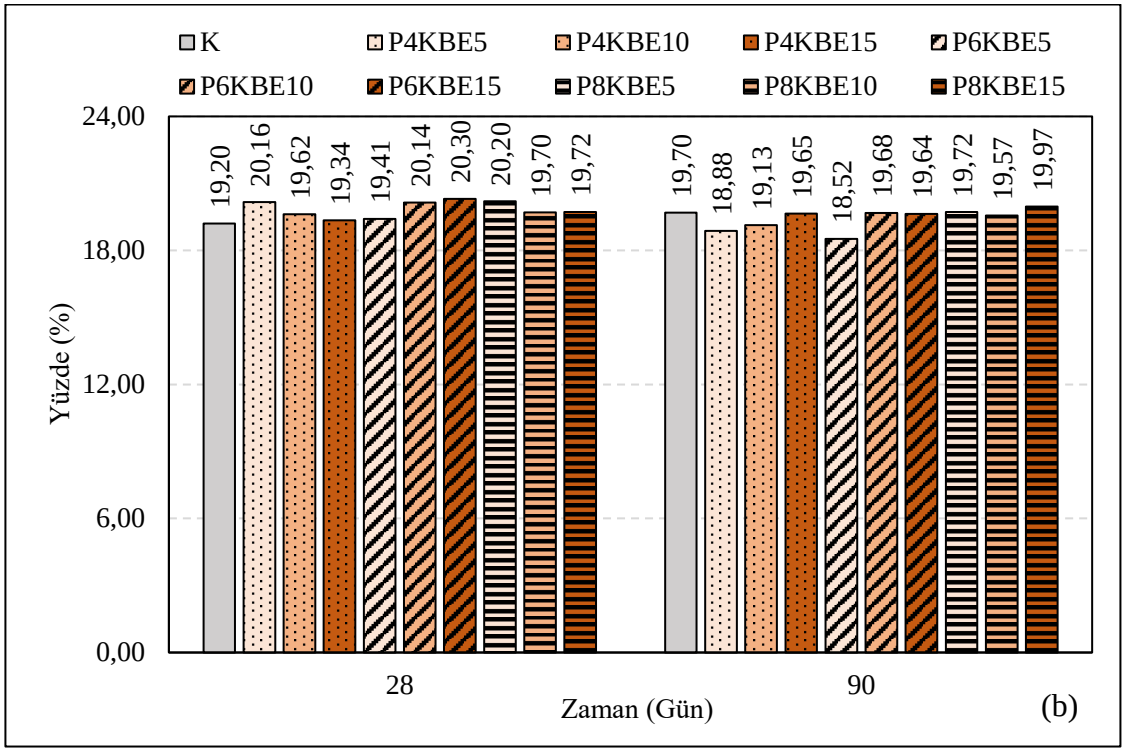
bağı oluşturan radyal hapsetme basıncı azalmıştır. Bu durum, lif sıyrılma direncini önemli ölçüde azaltarak dayanımı olumsuz yönde etkilemektedir. Bununla birlikte, Wang ve ark. (2013) ile Soliman ve Nehdi (2014) tarafından yapılan çalışmalar, lif ve KBE katkı içeren karışımların basınç dayanımının, bu malzemelerin ayrı ayrı kullanıldığı karışımlara kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu araştırmalara göre KBE katkının lif ile çözelti arasındaki temas açısını azalttığı, bunun da lifin matrisle daha iyi bütünleşmesini sağlayarak ıslanabilirliği artırdığı ifade edilmiştir. Böylece, lif-matris arayüzü daha sıkı bir yapı kazanmış ve mekanik dayanım üzerinde olumlu bir etki oluşturmuştur.

Şekil 4.5' te sunulan sonuçlar, Şekil 4.1 ve 4.4' te gösterilen eğilme ve basınç dayanımı verileriyle karşılaştırıldığında, lif ve KBE katkının birlikte kullanımının farklı bir eğilim gösterdiği belirlenmiştir. Bazı karışımlarda lif ve KBE katkının birlikte kullanımı numunelerin dayanımını artırırken, lif aglomerasyonunun baskın olduğu bazı numunelerde ise oluşan boşlukların mekanik dayanım üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda, lif ve KBE katkı içeren numunelerin dayanımlarının, yalnızca lif veya yalnızca KBE katkı içeren karışımların dayanım sonuçları ile tam anlamıyla örtüşmediği sonucuna varılmıştır.

Su Emme Değerleri

Harç numuneleri üzerinde yapılan su emme deneyi sonuçları Şekil 4.6’ da verilmiştir. Şekil 4.6’ dan anlaşılacağı üzere karışımlara lif ilave edilmesi karışımların su emme miktarını arttırmıştır. Söz konusu artış karışımlarda lif miktarının artmasıyla daha da belirgin olmuştur. Kontrol karışımıyla kıyaslandığında %0,4 polipropilen lif içeren harç karışımının su emme oranı %1 artış gösterirken, söz konusu bu oran %0,8 lif içeren karışımda %8 mertebelerine ulaşmıştır. Çizelge 4.1’den de görüldüğü gibi lif içeren karışımların hava içeriği yüksektir. Karışımların hava içeriğinin fazla olması numune içindeki boşlukların da fazla olduğunu göstermektedir. Söz konusu boşluklara bağlı olarak numunenin geçirgenliği artmakta ve su emme miktarı da aynı doğrultuda artış göstermektedir.





Şekil 4. 6. Harç numunelerinin 28 ve 90. günlerindeki su emme değerleri

Barbero-Barrera ve ark (2018) polipropilen lif içeren kireç esaslı karışımlarda dışa açık boşlukların lifsiz karışımlardan daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Buna bağlı olarak su emme katsayılarının daha fazla olduğunu bildirilmiştir. Ayrıca Karahan ve ark (2011) polipropilen lif içeren karışımlarda dışa açık-sürekli ve büyük boşlukların lifsiz karışımlara kıyasla daha fazla olduğunu beyan etmişlerdir. Literatürden de görüldüğü üzere numunelerde oluşan boşluk numunelerin su emme miktarını önemli mertebelerde etkileyebilmektedir. Çalışma kapsamında da lifli numunelerde oluşan sürekli ve büyük boşlukların söz konusu karışımların su emme oranlarını artırdığı düşünülmektedir.

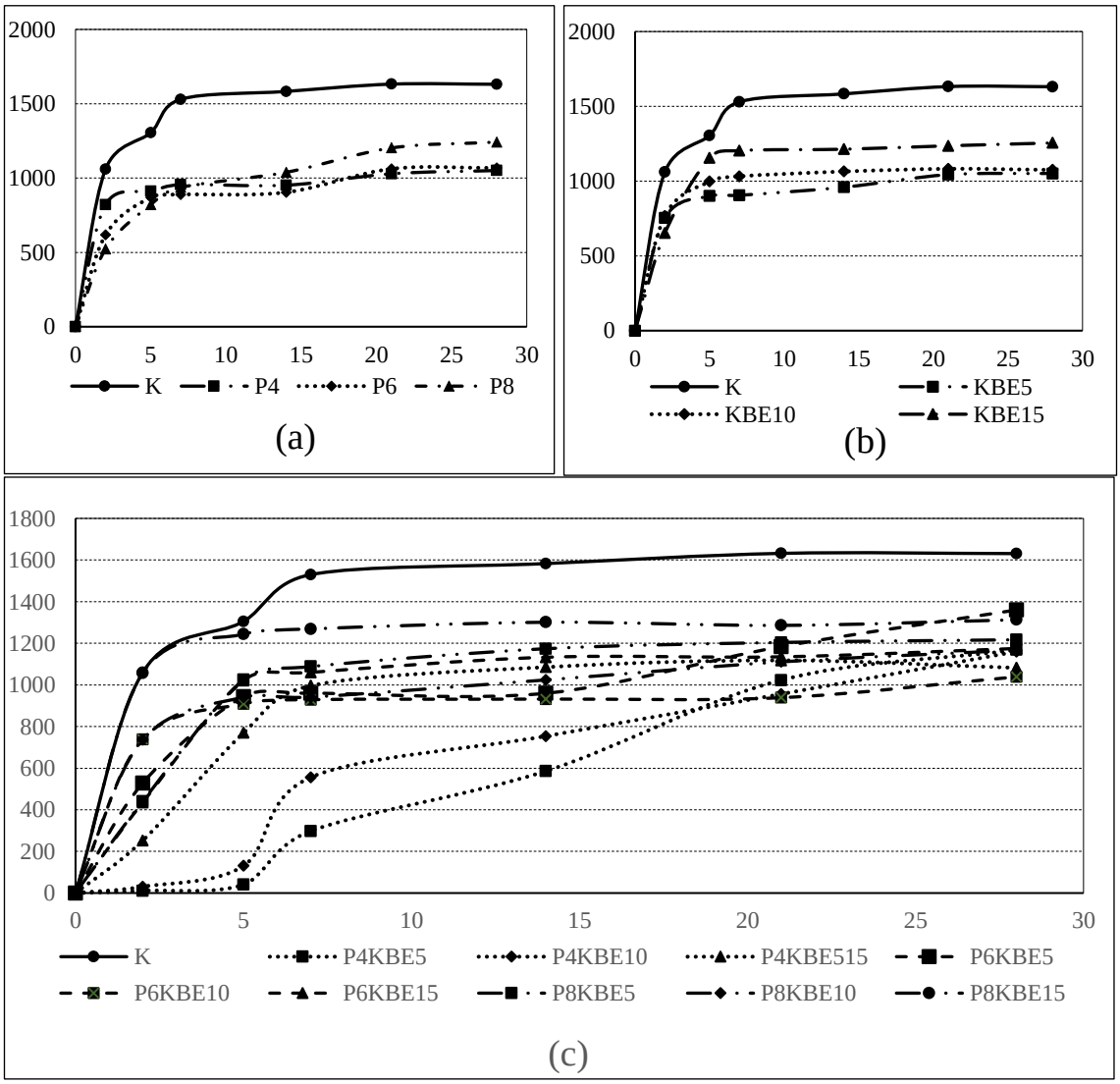
KBE katkı kullanımı ile karışımların 28 günlük su emme oranlarının, lif takviyesinin aksine, kontrol karışımına kıyasla yaklaşık %1-7 arasında azaldığı tespit edilmiştir. KBE katkı kullanımının, kuruma büzülmesine bağlı çatlak oluşumunu azalttığı bilinmektedir (Kadıoğlu, 2007; Mardani-Aghabaglou&İlhan, 2018; Mardani-Aghabaglou vd., 2019). Buna bağlı olarak da harcın su emme miktarının azalmış olabileceği düşünülmektedir. Ribeiro ve arkadaşları (2006) yapmış oldukları çalışmada, KBE katkı kullanımının çimentolu sistemlerde kılcal su emme ve oksijen geçirgenliği kapasitesini düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Bu durumun, gözeneklerde kalan KBE katkının sebep olduğu fiziksel etkiden kaynaklandığını öne sürmüşlerdir. Ayrıca KBE katkı çözeltinin yüzey gerilimini düşürmektedir. Böylece suyun taşınımı engellenerek geçirgenliğin azaldığı düşünülmektedir (Bentz ve ark 2008; Zhan ve ark 2019).

Farklı oranlarda lif ve KBE katkı içeren karışımların 28 günlük su emme oranlarının tüm karışımlar için kontrol karışımının su emme oranlarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun, karışımların su emme oranları üzerinde lif içeriğine bağlı olarak oluşan artışın, KBE katkısından kaynaklanan düşüşe kıyasla daha baskın olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Harç karışımlarının 90 günlük su emme oranlarında ise 28 günlük su emme oranlarına kıyasla belirgin bir değişim olmadığı görülmüştür.

Kuruma Büzülmesine Bağlı Boy Değişimleri

Harç karışımlarının 28 gün boyunca ölçülen kuruma büzülme değerleri Şekil 4.7'de sunulmuştur. Beklenildiği üzere, tüm karışımların büzülme değerlerinde zamanla artış gözlemlenmiştir. Numunelerin boy değişim hızının başlangıçta daha yüksek olduğu, ancak zamanla azaldığı anlaşılmıştır. Lif ve KBE katkı kullanım oranlarından bağımsız olarak, lif ve/veya KBE katkı içeren karışımların kuruma büzülme değerleri, kontrol karışımına kıyasla daha düşük bulunmuştur. Yalnızca lif içeren ve yalnızca KBE katkı içeren harç karışımlarının benzer kuruma büzülme davranışı sergilediği tespit edilmiştir.



Şekil 4. 7. Harç numunlerine ait kuruma büzülmesine bağlı boy değişimleri a) lifli numuneler b) KBE katkı içeren numuneler c) hem lif hem KBE katkı içeren numuneler

Sadece lif içeren karışımlar incelendiğinde (Şekil 4.7a), P4 karışımı kuruma büzülme davranışı bakımından en iyi performansı göstermiştir. Söz konusu karışımın büzülme değerleri kontrol karışımına kıyasla yaklaşık %35 oranında azalmıştır. P6 ve P8 numunelerinin büzülmesi ise kontrol numunesinden sırasıyla yaklaşık %34 ve %24 oranında daha az olmuştur.

Erken yaşlarda polipropilen liflerin elastisite modülü, matris fazının elastisite modülünden yüksek olduğundan dolayı, lifler matriste ilk çatlak oluşumunu geciktirmekte ve matrisin çatlama eğilimini azaltmaktadır (Toledo ve Sanjuan 1999). Ayrıca hidratasyon sonucu ortaya çıkan hidrate ürünler liflerin üzerine yapışmakta ve hamur fazındaki kapiler boşluklar sıkışıp tıkanmaktadır. Böylece katmanlar arasındaki suyun buharlaşması engellenmektedir. Jel suyu kaybolmadığından ve katmanlar arası su hareket etmediğinden dolayı matrisin plastik büzülmesi azalır ve matris çatlakları engellenir (Gao ve ark 2018). Bu bağlamda, çalışma kapsamında kullanılan polipropilen liflerin kuruma-büzülme sonucu oluşacak çatlakların bir kısmını engellediği, dolayısıyla büzülmeye bağlı boy değişimi değerlerinde azalma sağladığı görülmektedir.

Aly ve ark (2008), çimentolu sistemler üzerinde yaptıkları çalışmalarında, polipropilen lif oranının artışının kuruma büzülmesi ile ilişkili mikro gözenek yapısını etkilediğini ve karışımın geçirgenliğini arttırarak su çıkışını hızlandırdığını tespit etmişlerdir. Bu etkilere bağlı olarak, karışımların kuruma büzülme performanslarının olumsuz etkilendiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada, lif kullanımıyla birlikte karışımların hava içeriğinde artış meydana geldiği Çizelge 19'da görülmektedir. Hava içeriğinin artması geçirgenliğinin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle lif dozajının artışı ile meydana gelen büzülme artışının, liflerin homojen olarak dağılmaması sonucu oluşan sürekli boşluk miktarının kurumayı hızlandırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Sadece KBE katkı içeren harç karışımları arasında, 28 günlük kuruma-büzülme boy değişimi ölçümleri sonucunda en iyi performansı KBR5 karışımı göstermiştir. Kontrol karışımına kıyasla söz konusu karışımın büzülme değeri yaklaşık olarak %35 oranında daha az olmuştur. KBE katkılar, düşük viskoziteye sahip olmasından dolayı su-hava ara yüzeyine adsorbe olarak karışım suyunun yüzey gerilmesini düşürmektedir (Nmai ve ark. 1998; Zhang ve ark 2009). Bu sebeple, boşluklardaki suyun çıkışını

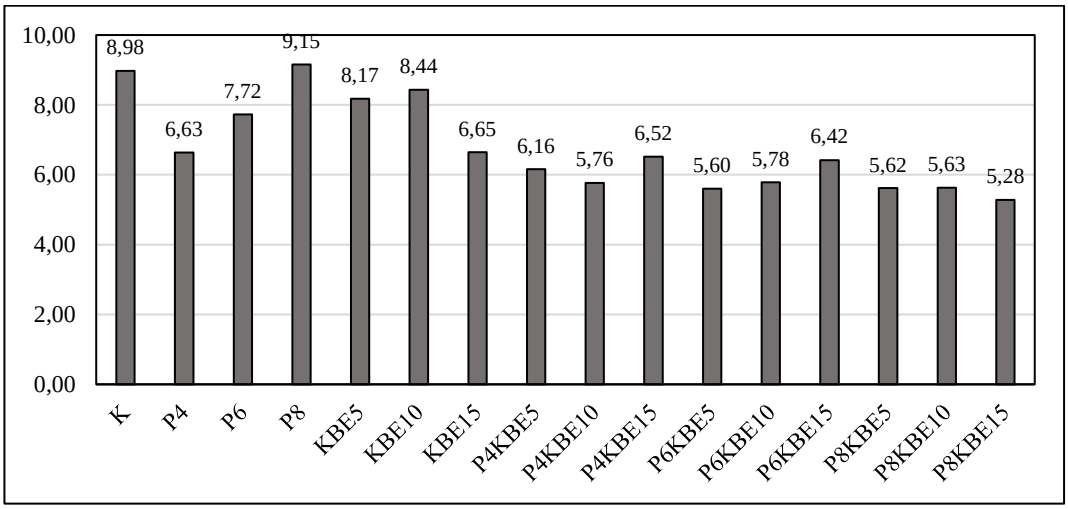
engellemektedir. Ayrıca KBE katkılar bazı durumlarda çözeltideki kristalizasyon basıncını artırarak şişmeye sebep olmaktadır (Sant ve ark 2011; Zhan ve ark 2019). Böylece KBE katkı içeren numunelerin büzülmesinin azaldığı düşünülmektedir.

Karışımlarda KBE katkı dozajının artışı, kuruma-büzülme değerlerinde beklenmedik bir artışa sebep olmuştur (Şekil 4.7b). Çalışma kapsamında kullanılan KBE katkının çözülmeyen kalıntı içerdiği ve buna bağlı olarak katkının fazla kullanılması durumunda mevcut makro boşlukların tıkanarak mikro boşluklara dönüşmesi sonucunda büzülme değerlerinin arttığı düşünülmektedir. Collins ve Sanjayan (2000), çimentolu sistemlerde gözenek boyutu dağılımının kuruma-büzülme üzerindeki etkisini inceledikleri çalışmalarında, küçük çapta boşluk yoğunluğu fazla olan karışımın büzülme miktarının daha fazla olduğunu ifade etmişlerdir.

Karışım oranlarından bağımsız olarak, polipropilen lif ve KBE katkının birlikte kullanımının, kontrol karışımına kıyasla kuruma büzülmesi değerlerinde azalma sağladığı görülmüştür (Şekil 25c). P4 karışımına KBE katkı ilavesi ile büzülme miktarının arttığı belirlenmiştir. P6 karışımı için %0,10 oranında KBE katkı dozajının büzülmeye belirgin bir etkisi gözlemlenmezken %0,05 ve 0,15 oranındaki katkı dozajı büzülmeyi P6 karışımına kıyasla artırmıştır. P8 karışımına %0,15 oranında KBE katkı ilavesi ile kuruma büzülmesi artarken diğer dozajlarda büzülmenin azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak, lif ve KBE katkı içeren karışımların sadece lif içeren karışımlara kıyasla kuruma-büzülme değerlerinde artış ve azalma görülmüştür. Bu bağlamda katkı ve lifin birlikte kullanılması büzülmede uyumsuz ve kararsız bir durum sunmuştur.

Aşınma Dayanımı

Harç numunelerinde 352 çevrim sonunda gerçekleşen kütle kaybı Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. 352 çevrim sonunda numunelerin kütle kayıpları

352 çevrim sonunda numunelerin kütle kayıpları kıyaslandığında, P4 ve P6 numunelerinin kütle kaybının kontrol numunesinden sırasıyla %26 ve 14 oranında daha az olduğu tespit edilmiştir. Ancak lif oranı %0,8 olan P8 numunesinin kütle kaybının kontrolden %1,9 daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu bağlamda %0,6 oranına kadar lif kullanımı Horasan harcının aşınma direncini iyileştirdiği görülmüştür.

Katkı oranından bağımsız olarak, KBE katkı içeren tüm numunelerin 352 çevrim sonunda kütle kayıpları kontrol numunesinden %6-26 oranında daha düşük olmuştur. KBE katkı oranının artışı numunelerin kütle kaybını azaltmıştır. KBE katkı içeren karışımlar arasında en iyi aşınma direnci KBE15 numunesi ile elde edilmiştir. Söz konusu numunenin kütle kaybı ise lifli numunelerde en yüksek aşınma direncine sahip P4 numunesinin kütle kaybıyla benzer olmuştur.

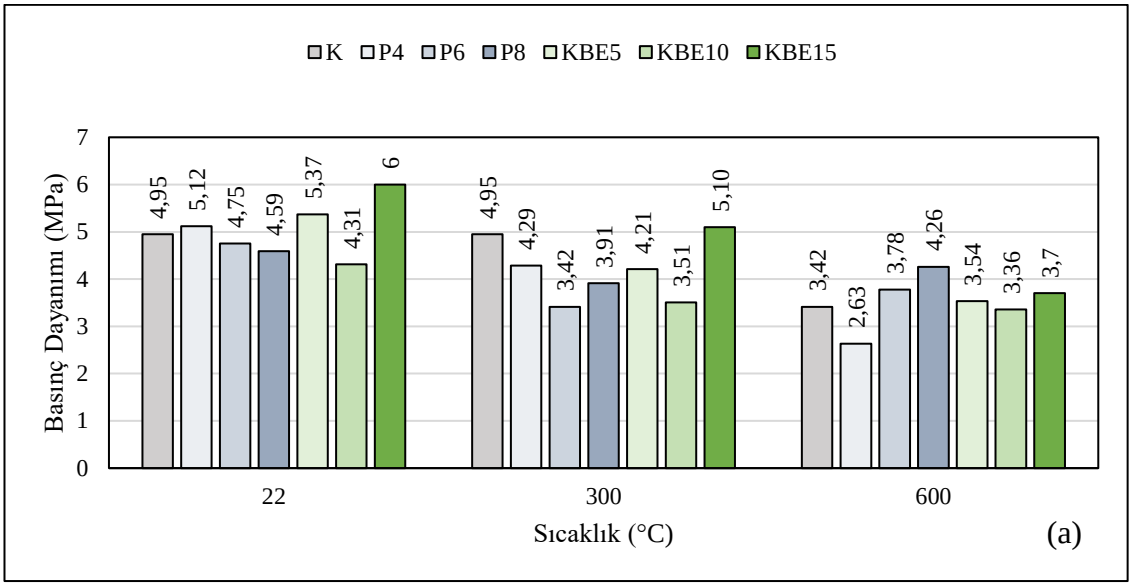
Lif ve KBE katkının birlikte kullanıldığı numunelerin kütle kayıpları ise hem kontrole göre hem de lif ve KBE katkının ayrı ayrı kullanıldığı numunelere göre daha düşük olmuştur. Bu bağlamda, lif ve KBE katkının birlikte kullanılması, Horasan harcının

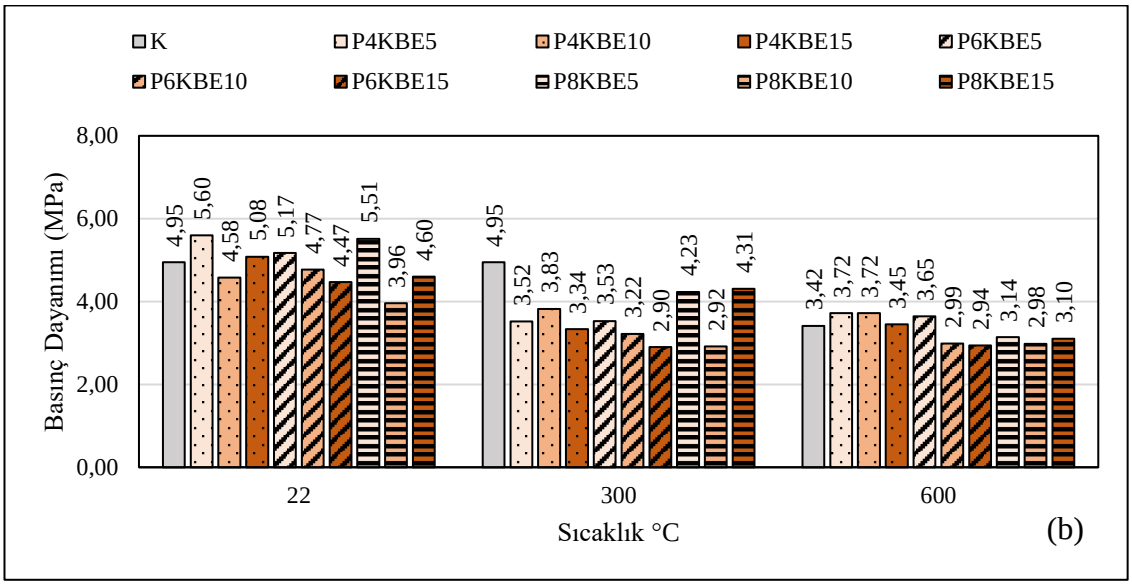
aşınmaya karşı direncini artırmıştır. Bu etki, lif içeriğinin artmasıyla daha da belirginleşmiştir.

Literatürde kireç esaslı harçların aşınma direnci üzerine yapılan çalışmaların sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. Grdic ve diğerleri (2012) ile Mardani-Aghabaglou ve diğerleri (2021) beton karışımlarında su/bağlayıcı oranının aşınma direncini önemli ölçüde etkilediğini ve su/çimento oranındaki artışın bu direnci azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, çimentolu karışımlarda polipropilen lif kullanımının numunelerin aşınma direncini artırdığı (Grdic ve diğerleri, 2012; Latifi, Biricik, Mardani-Aghabaglou ve diğerleri, 2021) ve aşınma direncinde %22'ye varan artışlar sağlayabildiği (Mardani-Aghabaglou, Özen ve Altun ve diğerleri, 2018) rapor edilmiştir.

Yüksek Sıcaklık Dayanımı

Çalışma kapsamında hazırlanan, 90 günlük kür süresini tamamlamış, 22°C'de (ortam sıcaklığı) muhafaza edilen, 300°C ve 600°C sıcaklıklara maruz bırakılan lifli, KBE katkı içeren ve hem lifli hem de KBE katkı içeren numunelerin basınç dayanımı değerleri Şekil 4.9'da sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerin basınç dayanımlarında %50'ye varan azalmalar olduğunu göstermektedir.





Şekil 4.9. 90 gün kür süresi ardından yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numenlerin basınç dayanımları a) Yalnızca lif veya KBE katkı içeren numuneler b) Hem lif hem KBE katkı içeren numuneler

Kontrol karışımı numuneleri 300°C'ye maruz kaldığında basınç dayanımlarında değişim olmazken, lifli karışımların basınç dayanımlarında (P4, P6 ve P8) %28'e kadar azalma görülmüştür. 600°C'ye maruz kalmış numuneler 300°C'ye maruz kalmış numunelerle kıyaslandığında, kontrol ve P4 numunelerinin basınç dayanımda %30 ve %39 azalma görülürken, P6 ve P8 numunelerinin dayanımlarında %10 kadar artış görülmüştür. Söz konusu dayanım artışına, harçların boşluk yapısının, buhar veya sıvı dolaşımını kolaylaştırdığından sıcaklık artışı sırasında meydana gelebilecek

reaksiyonların sebep olduğu söylenebilir. Lifli karışımların boşluk miktarının fazla olması ve yüksek sıcaklık etkisiyle liflerin eriyerek ekstra boşluk oluşturması ile buhar hareketinin kolaylaşarak reaksiyonların hızlanması ve dayanıma katkı sunan ürünlerin oluşmasına bağlı dayanımların arttığı düşünülmektedir.

KBE katkı içeren numunelerin 300°C'ye maruz bırakılması, ortam koşullarında muhafaza edilen numunelere kıyasla basınç dayanımlarında %15-22 arasında bir azalmaya neden olmuştur. 600°C'ye maruz bırakıldıklarında ise bu dayanım kayıpları %22-50 aralığında gerçekleşmiştir. Lif ve KBE katkılarının birlikte kullanıldığı numunelerde ise 300°C'ye maruz bırakılma sonucunda basınç dayanımlarında sırasıyla %6-38 oranında azalmalar gözlemlenirken, 600°C'ye maruz bırakılma sonucunda dayanım kayıpları %7-48 aralığında olmuştur. 300°C'ye maruz kalan numuneler arasında en yüksek dayanım KBE15 numunesi ile elde edilirken, en düşük dayanım F6SRA15 numunesi ile elde edilmiştir. 600°C'de ise en yüksek dayanım F8 numunesi ile, en düşük dayanım ise F4 numunesi ile elde edilmiştir.

Literatür bulgularına göre (Horszczaruk ve diğerleri, 2017; Irshidat ve diğerleri, 2018; Pachta ve diğerleri, 2018), yüksek sıcaklığa maruz bırakılan harçların özelliklerindeki değişimler en belirgin şekilde basınç dayanımı ölçümleriyle tespit edilebilmektedir. Özellikle 200°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda karışımlarda meydana gelen fiziko-kimyasal dönüşümler, mekanik özelliklerde kayda değer düşüşlere yol açmaktadır (Köksal ve diğerleri, 2015). Ancak, bazı deneysel çalışmalar (Pachta ve diğerleri, 2018), hidrate kireç ve doğal puzolan bazlı geleneksel harçların yüksek sıcaklıklara karşı olağanüstü bir durabilite sergilediğini ve 1000°C'ye kadar yapısal bütünlüğünü koruyabildiğini ortaya koymuştur.

Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerde, artan sıcaklıkla birlikte kimyasal olarak bağlı olan ve kılcal boşluklarda bulunan suyun buharlaşarak genleşmesi sonucu iç basınç oluşur. Bu durum, özellikle boşluk içermeyen yüksek dayanımlı betonlarda patlamalara/yüzey atmalarına neden olmaktadır. Kireç harçları, çimento harçlarına kıyasla yüksek poroziteye sahiptir. Ayrıca, tuğla kırığı da yüksek boşluğa sahiptir. Yüksek sıcaklık nedeniyle oluşan buhar basıncının etkisi, söz konusu boşluklar sayesinde azalır (Nežerka ve ark, 2014). Horasan harcının yüksek poroziteye sahip

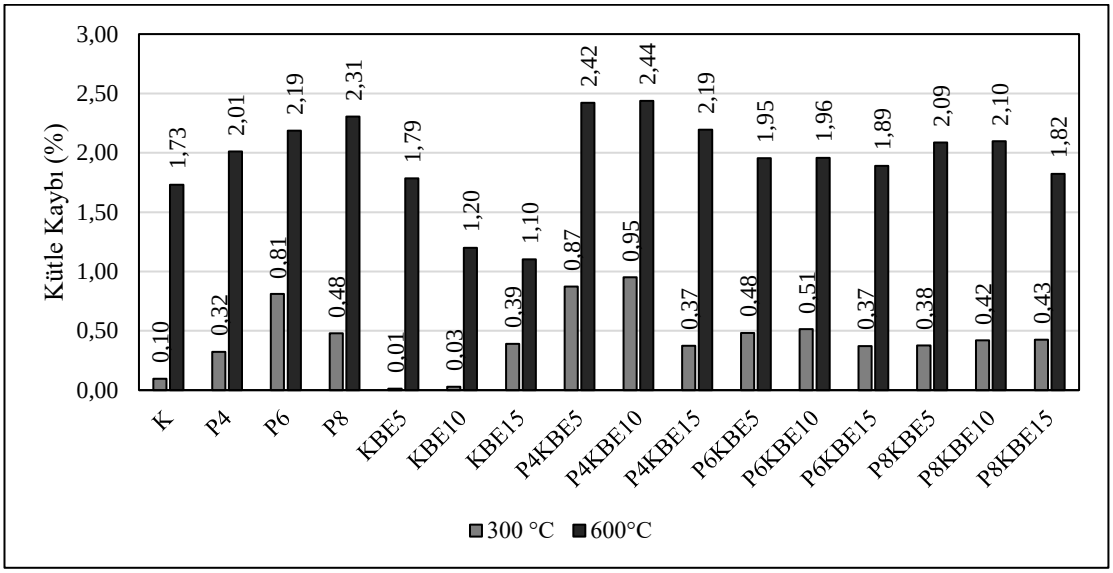
olması nedeniyle, yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin basınç dayanımları üzerinde çimento harçlarına kıyasla çok yüksek etki göstermemiştir. Benzer sonuçlar Patcha ve ark (2018; 2021) tarafından da elde edilmiştir. Ayrıca, lifin 160°C'de erimesi nedeniyle ortaya çıkan boşluk, buhar basıncının etkisinin azalmasına katkı sağlamıştır. Sonuç olarak, artan lif içeriği, aglomerasyona bağlı basınç dayanımını düşürürken, Şekil 4.9a' da görüldüğü gibi, 600°C sıcaklığa maruz kalan numunelerde basınç dayanımını iyileştirmiştir.

Literatürde, kuruma büzülme engelleyici (KBE) katkıların agrega çevresindeki büzülme kaynaklı çatlak oluşumunu azalttığı rapor edilmiştir (Grassl ve ark, 2010; Nežerka ve diğerleri, 2014). Bu sayede agrega ile kireç arasındaki arayüz bölgesi (ITZ) iyileşir ve yüksek sıcaklık etkisine karşı daha yüksek dayanım elde edilir. Şekil 4.9b' de 300 ve 600°C sıcaklığa maruz kalan numunelerde %0,15 oranında KBE kullanıldığında basınç dayanımında meydana gelen artışın, ITZ'deki iyileşmeden kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Lif ve KBE katkının birlikte kullanıldığı karışımlarda ise, yüksek sıcaklık etkisine karşı ciddi bir dayanım gözlemlenmemiştir. Eğilme ve basınç dayanımlarının yorumlanmasında detaylı şekilde anlatıldığı üzere, KBE katkının lifli karışımlar üzerindeki olumsuz etkisi, karışımların yüksek sıcaklığa karşı direncini azaltmıştır.

Yüksek sıcaklığa maruz kalan numunelerin kütle kayıpları Şekil 4.10' da gösterilmiştir. 300 ve 600°C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan P6 ve KBE5 karışımlarında kütle kaybı %1,5-2 civarlarında olmuştur. Diğer karışımlarda ise 300°C'de %0,5 civarlarında iken 600°C'ye maruz kalanlarda %1,5-3 arasında kütle kaybı meydana gelmiştir. Böke ve diğerleri (2006), kireç esaslı harçların ağırlık kaybının, 200-600°C sıcaklık aralığında kalsiyum silikat ve kalsiyum alüminahidrat gibi hidratasyon ürünlerinin dehidroksilasyonundan kaynaklandığını, 600°C'nin üzerinde ise karbon dioksit (CO_2) ayrışmasının etkili olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde, çimentolu sistemlerde de 400°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda önemli kütle kayıpları gözlemlenmektedir (Janotka ve Nurnbergerova, 2005). Navratilova ve Rovnanikova (2016), kil esaslı tuğla malzemelerinin genellikle illit minerali içerdiğini, fiziksel olarak bağlı suyun 300°C'de, kimyasal olarak bağlı suyun ise 400-450°C sıcaklık aralığında serbest bırakıldığını ve

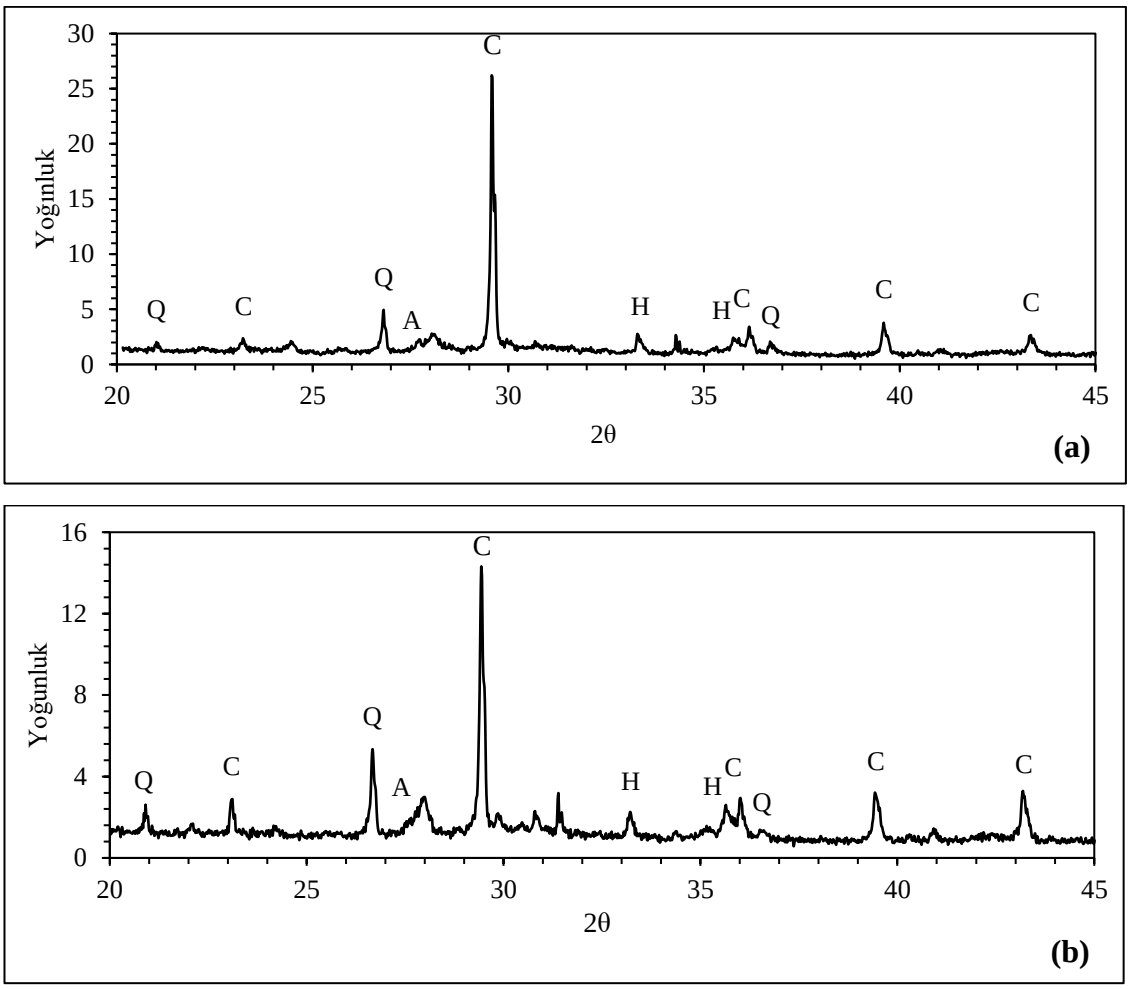
kil minerallerinin dehidroksilasyonunun 450-700°C'de gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Bu dehidroksilasyon süreci sonucunda, kristal yapının bozulmasıyla amorf bir susuz bileşik oluşmaktadır (Pachta ve diğerleri, 2021). Bu bağlamda, 600°C'deki harç numunelerinin 300°C'ye kıyasla ağırlık kaybındaki artışın, karışımlarda kullanılan tuğla tozu ve tuğla kırığının yapısındaki dönüşümlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kütle kaybındaki baskın faktörün tuğla malzemeleri olduğu göz önüne alındığında, karışımlarda lif ve KBE katkı kullanımının kütle kaybı üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.10. 300 ve 600 ˚C dereceye maruz bırakılan numunelerde oluşan kütle kayıp oranları

Mikroyapı Kimyasal Birleşim ve Termal Analiz

28 günlük Kontrol ve KBE15 numunelerinin XRD analiz sonuçları Şekil 4.11'de gösterilmiştir. XRD grafikleri değerlendirildiğinde en yüksek piklerin kalsit ve kuvartza ait olduğu görülmektedir. Hidrolik kireç harçlarında, priz aldıktan sonra bünyesine nüfuz eden karbondioksit sebebiyle karbonatlaşma meydana gelmektedir (Torraca, 2009). XRD grafiğindeki kalsit piki harcın karbonatlaşması hakkında bilgi vermektedir. Silis içerikli malzemelerin kaynağının çoğunlukla puzolan ve agrega olarak kullanılan tuğla ve bağlayıcı olarak kullanılan hidrolik kireç olduğu düşünülmektedir.

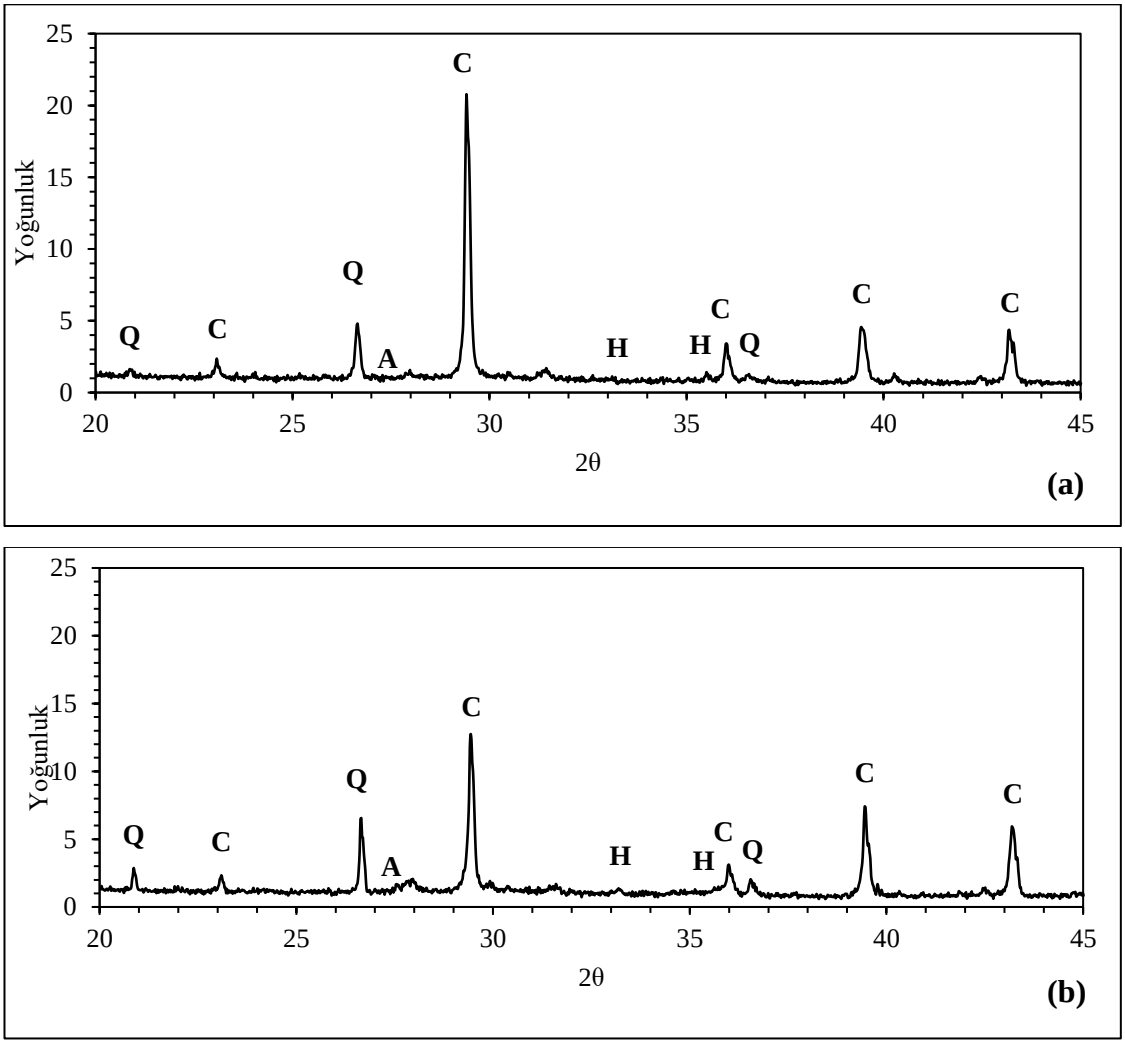


Şekil 4. 11. Kontrol ve KBE15 karışımlarına ait 28 günlük numunelerin XRD analizi (a)Kontrol; (b) KBE15 (C: $CaCO_3$ (Calcite); Q: SiO_2 (Quartz), H: Fe_2O_3 (Hematite), A: $NaAlSi_3O_8$ (Albite))

Şekil 4.11a ve b'de görüldüğü gibi KBE katkı eklenen numunede kalsit piki kontrol numunesine göre biraz düşük olmuştur. Bu sonuç KBE katkının harcın karbonatlaşmasını olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. Bu bağlamda karbonatlaşmayı sağlayacak CO_2'nin harcın bünyesine daha az nüfuz ettiği düşünülmektedir. Böylece Şekil 4.7b'de görüldüğü gibi KBE içeren harç numunesinin kuruma-büzülmesi azalmaktadır.

Şekil 4.12a ve b'de sırasıyla tuğla tozu içermeyen hidrolik kireç esaslı harç (NHL) ve tuğla tozu içeren (BP) harç numunelerine ait XRD analiz sonucu gösterilmiştir. XRD grafikleri incelendiğinde her iki numunede de kalsit, kuartz ve hematit pikleri gözlemlenmiştir. Grafikte BP numunesinin kalsit piklerinin NHL numunesine kıyasla

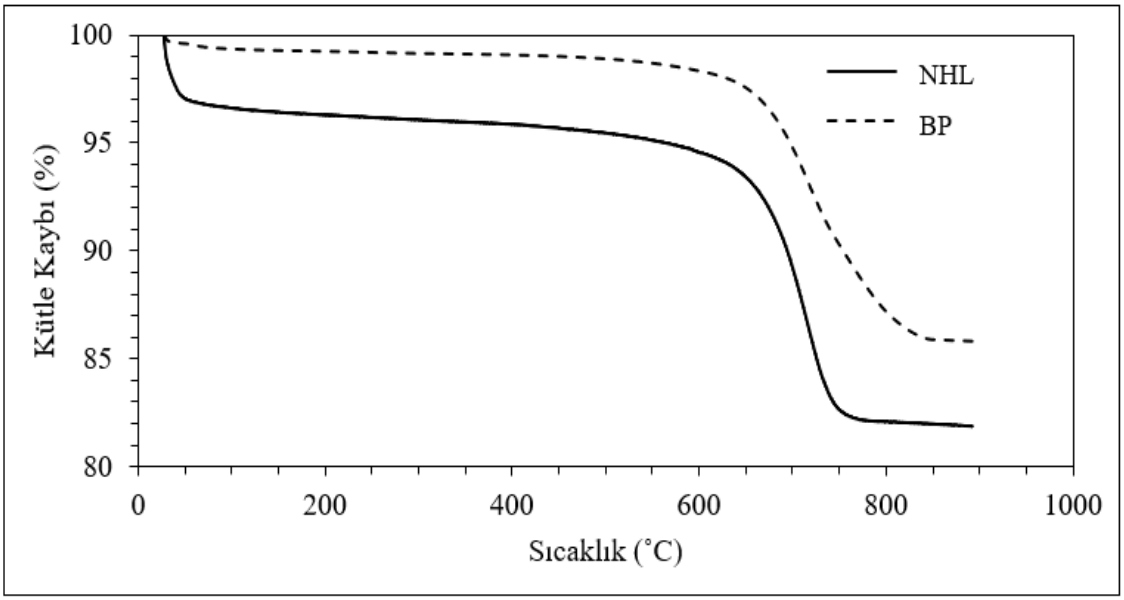
daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin BP karışımında NHL karışımına kıyasla hidrolik kireç miktarının az olmasının yanında BP karışımındaki tuğla tozu ile puzolanik reaksiyondan dolayı hidrolik kirecin bir kısmının CO_2 yerine tuğla tozundan gelen SiO_2 ile reaksiyona girmesidir. Ayrıca BP numunesinde tuğla tozundan kaynaklı olan quartz yoğunluğu fazla olmasına rağmen NHL numunesinde de doğal hidrolik kireç kaynaklı olduğu düşünülen quartz pikleri görülmüştür.



Şekil 4. 12. NHL (a) ve BP (b) karışımlarına ait numunelerin XRD desenleri (C: $CaCO_3$ (Calcite); Q: SiO_2 (Quartz), H: Fe_2O_3 (Hematite))

Çalışma kapsamında puzolan olarak kullanılan tuğla tozunun harcın hidrolik özelliğine etkisinin incelenmesi amacıyla TGA analizi yapılmıştır. 0-1000˚C aralığında dakikada 10˚C sıcaklık artışı uygulanan numunelerin ağırlık kayıplarının görüldüğü TGA grafiği

Şekil 4.13'te verilmiştir. Literatürde, 200-600˚C arasında gerçekleşen kütle kaybının kalsiyum silika hidrat ve kalsiyum alümina hidratların yapısında bulunan kimyasal su kaybı; 600-900˚C arasında ise kalsitte bulunan CO_2 in bozulması sonucu gerçekleştiği bildirilmiştir (Biscotin ve ark, 2002). Şekil 4.13'e göre 0-100 ˚C arasında her iki numune için de buharlaşabilir sudan kaynaklı kütle kaybı olduğu görülmüştür. 200-600˚C arasında belirgin bir kütle kaybı gerçekleşmemiştir. Ancak iki numune kıyaslandığında tuğla kırığı içeren numunedeki kütle kaybının daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu numunede, puzolanik aktivite sonucu fazla C-S-H yapısının oluştuğu buna bağlı olarak da bu aralıktaki kütle kaybının daha fazla olduğu düşünülmektedir (Pachta ve ark, 2021).



Şekil 4.13. NHL ve BP numunelerine ait TGA grafiği

Termogravimetrik analiz sonucu kütle kayıpları incelenen numunelerin CO_2/H_2O oranı BP ve NHL numunesi için sırasıyla 0,47 ve 1,21 olarak hesaplanmıştır. Bu oranın 10'dan küçük olması harcın hidrolik özellikte olduğunu göstermektedir (Moropoulou et al., 2000). Bu çalışmada da tuğla tozu eklenmesi ile bu oranın küçüldüğü görülmüştür. Bu durum, tuğla tozunun sebep olduğu puzolanik reaksiyon sonucu NHL numunesinde C-S-H oluşumunu arttırdığı görüşünü desteklemektedir.

4.2. Aşama 2

4.2.1. Taze hal

Tez çalışmasının ikinci aşmasında hazırlanan harç karışımlarının taze hal özelliklerinin belirlenmesi kapsamında, karışımların yayılma değerleri ve su azaltıcı katkı ihtiyaçları belirlenmiştir. Bu bağlamda elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Harç karışımlarının su azaltıcı katkı ihtiyacı ve yayılma değerleri

	Karışım	**Su Azaltıcı Katkı (gr)**	**Yayılma değeri (cm)**
1.Seri	K	0	17,1
2.Seri	TT20	0	16,7
3.Seri	UK20	0	18,0
	UK30	0	17,6
	UK40	0	17,2
4.Seri	YFC20	0	17,5
	YFC30	0	17,0
	YFC40	0	16,5
5.Seri	MK10	0,7	15,5
	MK20	1,1	15,1
	MK30	2	15,0

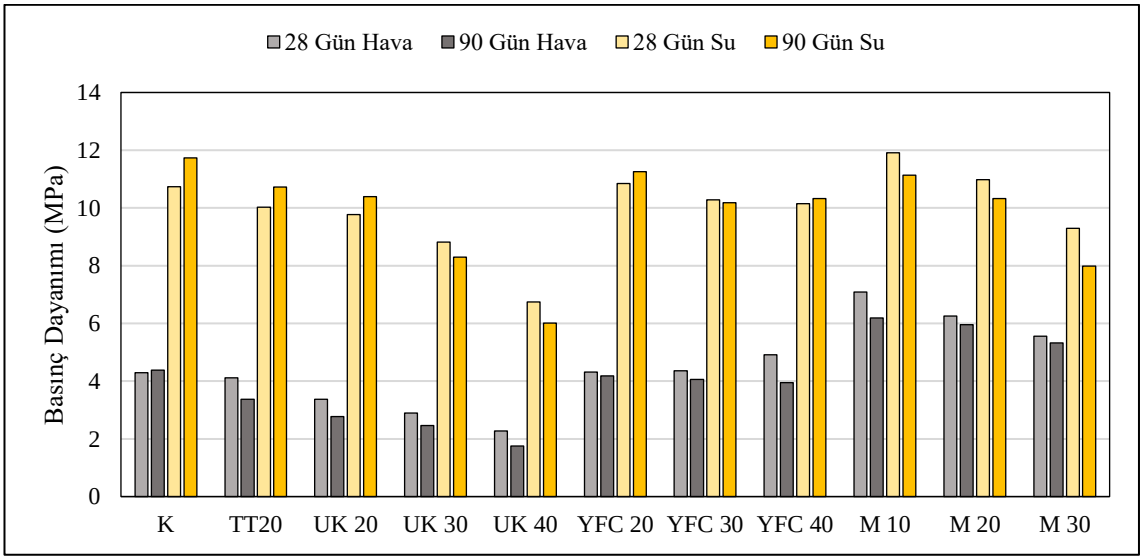
Çizelge 4.3'ten görüldüğü üzere metakaolin içeren karışımlar hariç tüm karışımlar su azaltıcı katkı kullanımına gerek kalmadan hedeflenen 160±20 mm yayılma değerini sağlamıştır. Ayrıca beklenildiği üzere puzolan ikame oranının artışı ile karışımların su ihtiyacı artmış ve yayılma değerlerinde düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan puzolanların incelik değeri en fazla olanının metakaolin olduğu görülmüştür (146000 cm^2/g). Metakaolini sırasıyla yüksek fırın cürufu (4880 cm^2/g), uçucu kül (4300 cm^2/g) ve tuğla tozu (4150 cm^2/g) izlemektedir. Metakaolinin taze harcın işlenebilirlik performansını, diğer puzolanik malzemelere kıyasla daha fazla olumsuz etkilemesinin temel nedeninin, metakaolinin yüksek incelik değerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı şekilde yüksek fırın cürufu içeren harç karışımlarının uçucu kül içerenlere oranla daha az yayıldığı Çizelge 4.3'te görülmektedir. Ancak, aynı oranda tuğla tozu, uçucu kül, yüksek fırın cürufu içeren

karışımların yayılma değerleri incelendiğinde tuğla tozu içeren karışımların yayılma değerinin beklenenin aksine daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda, tuğla tozunun, diğer puzolanlara kıyasla, yüksek özgül ağırlığının sebep olduğu negatif performansı açısından düşük incelik değerinin sağladığı avantajdan baskın geldiği söylenebilir.

4.2.3. Sertleşmiş hal

Çalışma kapsamında hazırlanan harç numunelerinin 28 ve 90 günlük basınç dayanımları sırasıyla Şekil 14'te verilmiştir. Hava kürü ifadesi 20±2°C'de, %65±5 bağıl nemli ortamı, su kürü ifadesi ise 20±2°C'de kirece doygun suda kürlemeyi temsil etmektedir.



Şekil 4.14. Farklı kür şartlarında kürlenen harç numunelerinin 28 ve 90 günlük basınç dayanımları

Şekil 4.14'te sunulan veriler incelendiğinde, kür koşullarındaki farklılıkların harçların basınç dayanımı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Özellikle bazı karışımlarda, suda kürlenen numunelerin basınç dayanımının, havada kürlenen numunelere kıyasla yaklaşık 3,5 kat daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Hidrolik kirecin su varlığında hidratasyon reaksiyonları aracılığıyla dayanım kazanan bir bağlayıcı olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte, havayla temas etmesi durumunda karbonatlaşma reaksiyonlarının meydana geldiği de literatürde belirtilmektedir (Torraca,

2009). Deneysel bulgular değerlendirildiğinde, suda kürlenen numunelerde gerçekleşen hidratasyon reaksiyonlarının, havada kürlenen numunelerde meydana gelen karbonatlaşma reaksiyonlarına kıyasla daha etkin bir dayanım artışı sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Şekil 4.14'te görülebildiği üzere, kontrol karışımına kıyasla puzolan içeren karışımlara ait numunelerin basınç dayanımlarının genel olarak daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Harç karışımlarına eklenen puzolanların, kireç ile gerçekleştirdikleri puzolanik reaksiyon sayesinde harcın dayanım özelliklerini olumlu yönde etkilemesi beklenmektedir. Ancak, harç karışımlarına ait basınç dayanımları incelendiğinde beklenilen iyileşmenin her karışımda sağlanamadığı görülmüştür. Bu duruma sebep olabileceği düşünülen mekanizma aşağıda açıklanmıştır;

Hidrolik kirecin su ile etkileşimi sonucunda iki temel kimyasal reaksiyon meydana gelmektedir. Bunlardan ilki, bünyesinde yer alan serbest kirecin (CaO) su ile reaksiyona girerek kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) oluşturmasıdır. İkinci reaksiyon ise, kireç içerisinde bulunan kalsiyum silikat (C_2S) ve kalsiyum alüminat (C_3A) fazlarının su ile etkileşerek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum alüminat hidrat (C-A-H) jel fazlarını oluşturmasıdır. Özellikle C-S-H jelinin oluşumu, bağlayıcının mekanik dayanım kazanmasında temel belirleyici etmen olarak öne çıkmaktadır (Şekil 2.3).

$Ca(OH)_2$ ise, ortamda bulunan karbondioksit (CO_2) ile karbonatlaşma reaksiyonuna girerek kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) oluşumunu sağlar ve bu süreç, harcın nihai dayanım gelişimine katkıda bulunur. Ayrıca, sistemde reaktif puzolanların varlığı durumunda, $Ca(OH)_2$ bu katkılarla etkileşime girerek ikincil bağlayıcı fazlar olan C-S-H ve C-A-H jellerinin oluşmasına da olanak tanır (Şekil 2.4).

Hidrolik kireç esaslı harçlarda hem hidratasyon hem de puzolanik reaksiyonlar ile dayanım gelişimi sağlanmakta olup, bu mekanizmaların verimli bir şekilde işlemesi için ortamda yeterli miktarda $Ca(OH)_2$ bulunması kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, deneysel çalışmada kullanılan bazı puzolanların beklenen düzeyde dayanım artışı sağlayamamasının temel nedeni, kireç ikamesi nedeniyle sistemde oluşan $Ca(OH)_2$ miktarının puzolanik reaksiyonları sürdürebilecek seviyede olmamasıdır.

ASTM C618 Standardında çimento esaslı harçlara ikame edilecek puzolanların aktiviteleri hakkında bazı kriterler bildirilmiştir. Bu kriterler göz önünde bulundurularak çalışma kapsamında elde edilen basınç dayanımı sonuçları incelenip karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda, bazı puzolan takviyeli karışımların basınç dayanımında meydana gelen düşüşün istenmeyen bir durum olsa da standardın belirlediği sınırlar içerisinde olduğu görülmüştür.

Şekil 4.14'te verilen basınç dayanımları incelendiğinde puzolan kullanımının hidrolik kireç esaslı harç karışımının 28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları için her iki kür şartında da en iyi sonucun %10 oranında metakaolin kullanımı ile elde edildiği görülmüştür. Bu durumun, metakaolinin kullanılan en ince puzolan olması ve buna bağlı olarak da puzolanik açıdan daha reaktif olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Day ve Shi (1994) doğal puzolanları inceledikleri çalışmalarında, puzolanın blaine incelik değeri ve basınç dayanımı arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu, puzolanın incelik değerinin artışıyla özellikle erken dönemde mukavemet dayanım kazanma hızını arttırdığını belirtmişlerdir.

Pavlík ve Užáková (2016) çalışmalarında zeolit ve metakaolin ilavesinin hidrate kireç harcına etkilerini incelemişlerdir. Çalışma sonunda metakaolin içeren harç numunelerinin dayanım açısından daha iyi performans sergilediği tespit edilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında hazırlanan numuneler farklı kür koşullarında kürlenmiştir. Bu sayede, puzolan tipinden bağımsız olarak, suda kürlenen harç numunelerinin dayanımlarının havada kürlenenlere oranlara daha yüksek olduğu görülmüştür.

Gür ve Özgünler (2021) çalışmalarında, tüf, genleştirilmiş perlit ve metakaolin ikame edilmiş doğal hidrolik kireç esaslı harç numuneler 7, 28ve 90 günlük periyotlarda ortam şartlarında ve suda kürlenmiştir. Çalışma sonucunda, puzolan ikamesinden bağımsız olarak suda kürlenen numunelere ait basınç dayanımlarının, tüm kür süreleri için, daha yüksek olduğu görülmüştür.

Grilo ve arkadaşları (2014) tarafından yürütülen çalışmada, metakaolin içeren kireç esaslı harçların farklı kür şartlarında değişen dayanım değerlerini incelenmiştir. Çalışma

sonucunda, metakaolin içeren harçların dayanım değerlerinde metakaolin içermeyen karışımlardan daha yüksek oranda bir düşüş olduğunu belirlemiştir. Bu durumun, metakaolin ve kireç arasında gerçekleşen puzolanik reaksiyon sonucu oluşan kararsız bileşiklerden kaynaklandığını öne sürülmüştür.

Vavricuk ve arkadaşları (2018), çalışmalarında kullanılan metakaolin incelik değeri ve ikame oranının kireç esaslı harçların taze ve sertleşmiş hal özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, metakaolin kullanımının harçların sertleşmiş özellikleri zerinde olumlu etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, kullanılan metakaolinin incelik değerine bağlı olarak kireç ile girdiği reaksiyon sonucu oluşturduğu bileşiklerin farklılık gösterdiği belirlenmiştir.

Yüksek fırın cürufunun agrega ve bağlayıcı olarak kireç esaslı harçlara ikame edildiği ve harcın dayanım ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirdiğini belirten çalışmalar literatürde mevcuttur (Çavuş ve ark., 2023; Pavía & Aly, 2016; Işıkdağ & Topçu, 2013). Shang etal., (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, NHL harçlarına eklenen BFS Yüksek fırın cürufu oranının, harçların basınç ve eğilme dayanımını belirli bir noktaya kadar artırdığı belirlenmiştir. Yüksek fırın cürufunun puzolanik reaksiyonları sonucu oluşan C-S-H jelinin miktarındaki artış, harçların mekanik özelliklerini iyileştirmiştir. Ancak, aşırı Yüksek fırın cürufu ilavesi, reaksiyonlar için yeterli kalsiyum hidroksit bulunmaması nedeniyle dayanımda düşüşe neden olduğu vurgulanmıştır.

4.3.Aşama 3

4.3.1. Taze Hal

Üçüncü aşamada hazırlanan karışımlara ait yayılma değerleri Çizelge 4.4’te verilmiştir.

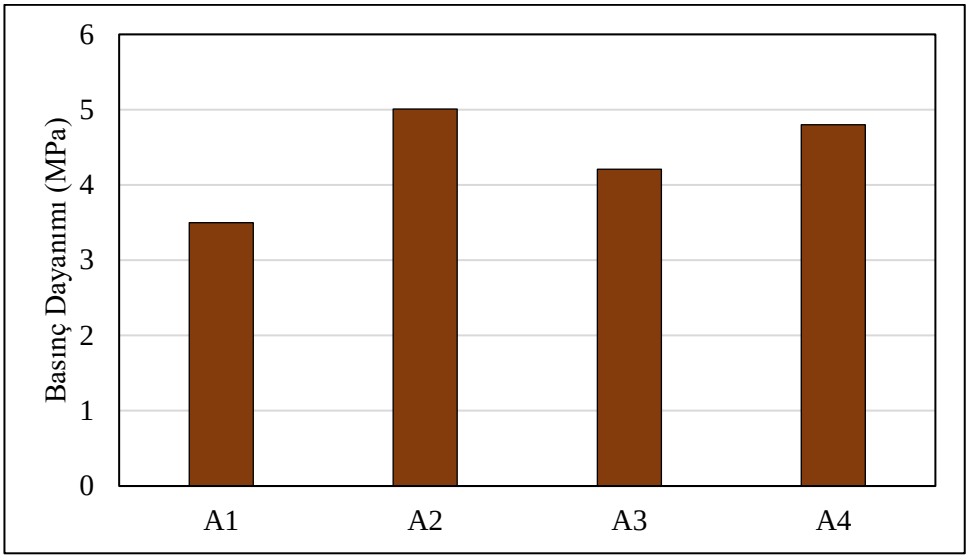
Çizelge 4.4. Harç karışımlarına ait yayılma değerleri

Karışım	Yayılma değeri (cm)
A1	16,9
A2	18
A3	16,4
A4	17,2

Agrega tipinden bağımsız olarak, tuğla kırığının farklı tip agregalar ile ikame edilmesi sonucu karışımların akış performansının olumsuz etkilendiği Tablo 5'ten anlaşılmıştır. Bu durumun, ikame edilen agregaların kil ve toz içeriğinin fazla olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Kullanılan tuğla kırığının toz malzemeden arındırılarak kullanılması, işlenebilirlik performansı üzerinde etkili olmuştur. Literatürde, agregaların toz içeriğinin ve şeklinin işlenebilirlik performansı üzerinde önemli etkilerinin olabildiği bildirilmiştir. Agrega ikameli karışımlarda, yayılma davranışı açısından dere kumu içeren karışımın en üstün performansı sergilediği anlaşılmıştır. Bu bağlamda, mermer ikameli karışımın, en düşük yayılma performansına sahip olduğu tespit edilmiştir. Dere kumunun, diğer agrega tiplerine kıyasla daha küresel tanelerden oluşmasından dolayı en yüksek yayılmayı sağladığı düşünülmektedir.

4.3.2. Sertleşmiş Hal

Tez çalışmasının üçüncü aşamasında hazırlanan harç karışımlarına ait numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri Şekil 4.15'te gösterilmiştir.

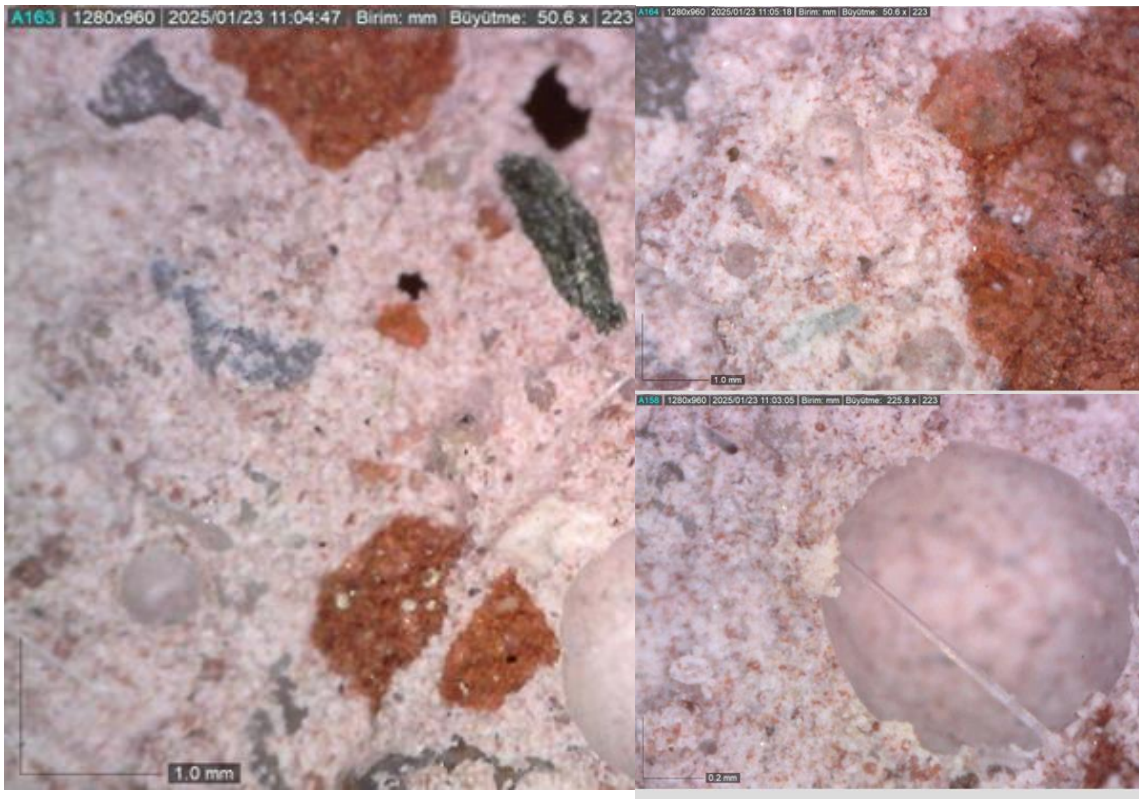


Şekil 4. 15. Harç karışımlarına ait numunelerin 28 günlük basınç dayanımı değerleri

Karışımlarda kullanılan agrega içeriğinin dayanım üzerindeki etkisi incelendiğinde agrega içeriğindeki tuğla kırığının yüzdesinin düşürülmesiyle tüm karışımlarda dayanım performansı olumlu etkilenmiştir. Tuğla kırığının, dere kumu agregasına kıyasla daha fazla boşluk içerdiği, daha düşük dayanımda olduğu ancak daha köşeli tanelerden oluştuğu bilinmektedir. Lanas ve diğerleri (2004) ile Arizzi ve Cultrone'nin (2012) çalışmalarında, agregaların şeklinin harçların mukavemeti üzerindeki önemli rolünü ortaya koyulmuştur. Yuvarlak agregaların, harçlarda daha büyük gözenekler oluşturarak mukavemeti azaltırken, köşeli ve pürüzlü agregaların, bağlayıcı ile daha iyi bir etkileşim sağlayarak mukavemeti arttırdığı vurgulanmıştır.

Harç karışımlarının içeriğine bağlı olarak, hamur fazının dayanım performansına göre dere kumu ve tuğla kırığı içeriğinin etkisi değişebilmektedir. Yüksek dayanımlı matrislerde tuğla kırığı kullanıldığında, agrega fazının zayıf kalmasından dolayı kırılmalar agrega fazında gerçekleşmektedir. Ancak, düşük dayanımlı karışımlarda, agrega fazının hamur fazı ile yakın dayanımda olması söz konusu durumu ortadan kaldırmaktadır. Bu durumda da, daha güçlü agrega kullanımının dayanım üzerinde olumlu etki gösterdiği düşünülmektedir. Horasan harcında hamur fazının dayanımının düşük olması nedeniyle tuğla kırığının dayanımı düşürme etkisi daha az ön plandadır.

Geleneksel Horasan harcı karışımları incelendiğinde özellikle nemli bölgelerde kireç-tuğla tozu/kırığı karışımlarının kullanıldığı görülmektedir. Amorf kil mineralleri içeren tuğla agregalar, kireç bağlayıcı ile reaksiyona girerek harç ve sıvalarda ek bağlar oluşturduğu, buna bağlı olarak da harcın mekanik özelliklerinin iyileştirildiği bilinmektedir (Böke et al., 2006; Nežerka etal., 2015). Çalışma kapsamında, 0-2 mm elek aralığında agrega kullanıldığı için agrega pürüzlülüğünün ITZ'i güçlendirmesinin yanında koheziviteyi arttırarak karışıma hava sürükleme durumu öne çıkmaktadır. Dolayısıyla, tuğla kırığı içeriği yüksek olan karışımların dayanımının düşük olmasının bundan kaynaklandığı düşünülmektedir.



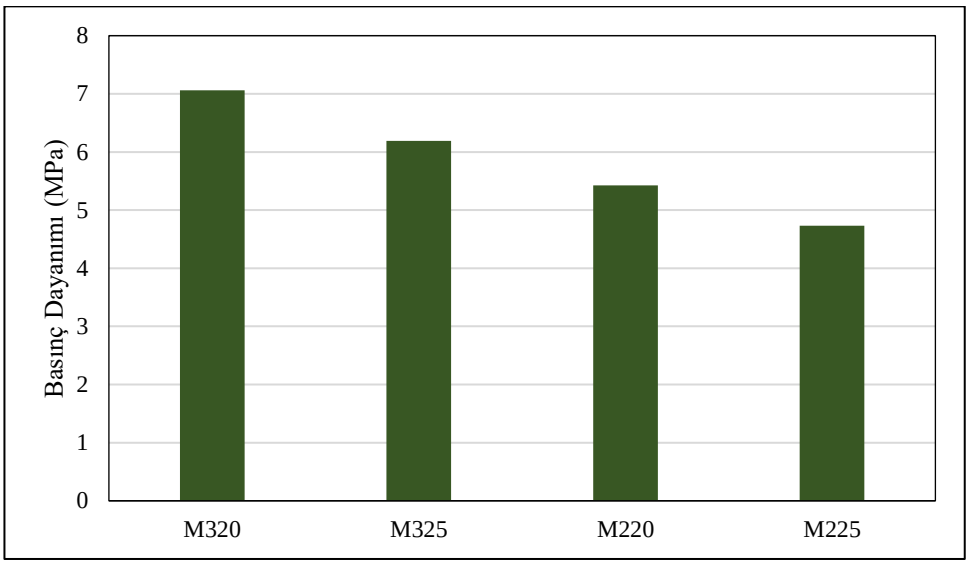
Şekil 4.16. Harç numunesinin mikroskop ile çekilmiş görüntüleri a) Harç agrega arayüzü b) Tuğla kırığı agregası ile harç arayüzü detayı c) Boşlukta bulunan lif

Bu aşamada harç karışımlarına dere kumu ve tuğla kırığı agregasına maksimum tane boyutu 1 mm olan silisli kum ve mermer tozu ikame edilerek harç numunelerinin basınç dayanımlarının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Ancak Şekil 4.15'te görüldüğü üzere, bu karışım oranlarına sahip numuneler istenilen dayanım performansını göstermemiştir.

Üçüncü aşamada elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde harç karışımlarında en iyi dayanım performansının, %50 dere kumu ve %50 tuğla kırığının birlikte kullanılması sonucunda elde edildiği belirlenmiştir.

4.4. Aşama 4

Bu aşamada daha önceki aşamalarda elde edilen veriler doğrultusunda hazırlanan harç karışımlarının basınç dayanımı performansları incelenmiştir.



Şekil 4. 17. Harç karışımlarına ait numunelerin 28 günlük basınç dayanımları

Tez çalışmasının dördüncü aşamasında, harç karışımlarının bağlayıcı/agrega ve su/toplam kuru malzeme oranlarının basınç dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Şekil 4.17'den görülebildiği üzere, agrega/bağlayıcı oranının 3'ten 2'ye düşürülmesi, harç numunelerinin dayanım performansını olumsuz yönde etkilemiştir. Bu durumun, nispeten daha yüksek dayanımlı agrega fazının karışım içindeki hacimsel oranının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Stefanidou ve Papayanni (2006), farklı bağlayıcı/agrega oranının kireç esaslı harçların dayanımı inceledikleri çalışmalarında optimum bağlayıcı/agrega oranının 1:1,5, 1:2,5 1:3 olarak tespit etmişlerdir. Ayrıca harç karışımlarında 0-2 mm aralığında agrega kullanılan karışımlarda çatlakların ve gözeneklerin harç fazında oluştuğunu

belirtmişlerdir. 0-4 mm agregaların kullanıldığı karışımlarda ise agregaların etrafında boşuklar oluştuğu bununla birlikte oluşan çatlakların agregalar sayesinde bloke edildiği vurgulanmıştır. Harç yapısındaki mikro çatlakların agrega tarafından bloke edilmesi durumu çalışma kapsamındaki harç numunelerinde de gözlemlenmiştir.

Şekil 4. 18. a) Dere kumu agregası tarafından çatlağın engellenmesi b) Tuğla kırığı agregasında meydana gelen çatlak

Piyasada bulunan kireç, puzolan ve nehir kumunun standart kaliteye sahip olmaması, dayanım-gözeneklilik ilişkilerinin incelenmesini zorlaştırsa da, laboratuvar ortamındaki sıkı kalite kontrol ve testler sayesinde kireç-puzolan harçlarının tasarımına yönelik değerli veriler elde edilmiştir; bu doğrultuda, su/bağlayıcı oranının gözeneklilik üzerinde en belirleyici parametre olduğu tespit edilmiştir (Papayanni ve Stefanidou, 2006).

Kireç esaslı harç sistemlerinde su/bağlayıcı oranı, harçların mekanik özellikleri ve uzun ömürlülüğü üzerindeki etkileri bakımından kritik bir parametredir. Literatürdeki çalışmalar, bu oran ile hidratasyon kinetiği, gözeneklilik ve mikroyapı arasındaki doğrudan ilişkiyi ortaya koymaktadır. Örneğin, Xu ve arkadaşları (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, su/bağlayıcı oranının hidratasyon reaksiyonu üzerindeki etkisi incelenmiş ve belirli bir aralıkta hidratasyonun hızlandığı belirtilmiştir. Papayianni ve

Stefanidou (2006) ise su/bağıcı oranının, harçların gözeneklilik yapısını doğrudan etkileyen en önemli faktör olduğunu vurgulamışlardır.

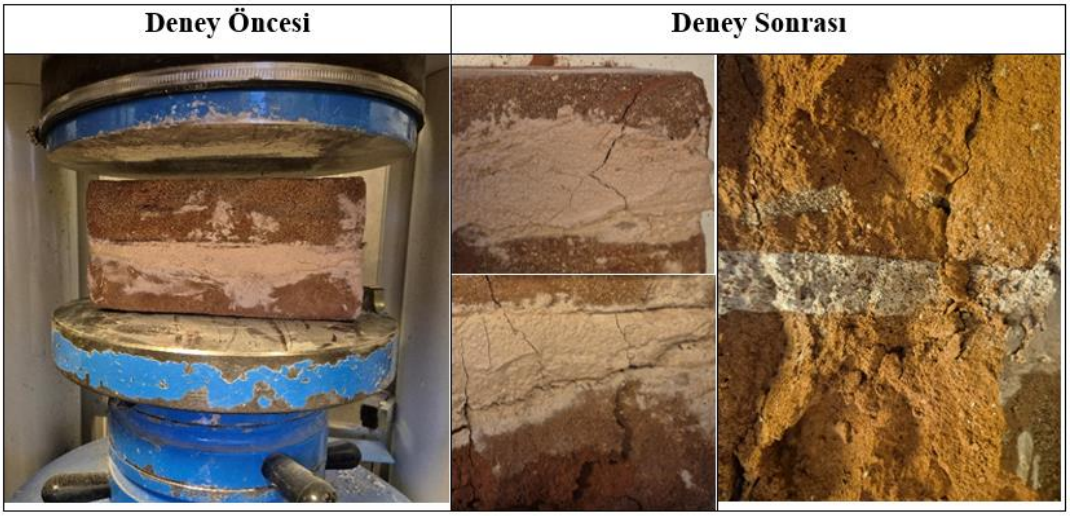
Çalışma kapsamında hazırlanan harç karışımlarında su/bağlayıcı oranı yerine su/kuru malzeme oranı kullanılmıştır. Bu bağlamda elde edilen sonuçlar incelendiğinde ise beklenildiği gibi su içeriğinin artışı ile dayanım performansı olumsuz etkilenmiştir.

4.5. Aşama 5: Yığma Numunelerde Mekanik Performans Değerlendirmesi

4.5.1. Yığma prizma numunelerinde gerçekleştirilen testler

Tez çalışması kapsamında geliştirilen Horasan harcı ile geleneksel pişmiş kil tuğlalar kullanılarak üretilen yığma prizma numunelerinin mekanik davranışı basınç ve kesme testleri ile detaylı olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen dayanım verileri Çizelge 4.5'te sunulmuş olup, deney öncesi ve sonrasındaki numune durumları sırasıyla Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de görselleştirilmiştir.

Şekil 4.19. Yığma prizma numuneleri üzerinde kesme dayanımı deneyinin gerçekleştirilmesi



Şekil 4. 20. Yığma prizma numuneleri üzerinde basınç dayanımı deneyinin gerçekleştirilmesi

Çizelge 4.5. Yığma prizma numunelerine ait dayanım özellikleri

Basınç Dayanımı Deneyi		**Kesme Dayanımı Deneyi**	
Dayanım (MPa)	Kırılma Yükü (kN)	Dayanım (MPa)	Kırılma Yükü (kN)
5,25	124,39	1,06	23,37

Basınç testleri sonuçlarına göre, yığma numunelerin ortalama basınç dayanımı 5,25 MPa olarak belirlenmiş olup, kırılma anındaki ortalama taşıma kapasitesi 124,39 kN olarak ölçülmüştür. Kırılma modları analizinde, çoğunlukla harcın yatay derzleri boyunca gelişen çatlaklar gözlemlenmiş, bunun yanında bazı numunelerde tuğla gövdesinde kırılmalar tespit edilmiştir (Şekil 4.19). Bu gözlemler, harç ve tuğla bileşenleri arasında dengeli bir yük aktarımının sağlandığını göstermektedir.

Kesme deneyleri sonucunda ise ortalama 1,06 MPa, kesme dayanımı ve 23,37 kN kırılma yükü elde edilmiştir. Kırılma modları incelendiğinde, temel olarak harç-tuğla arayüzeyinde yapışma kaybı şeklinde hasar geliştiği belirlenmiştir (Şekil 4.20). Bu bulgular, yığma sistemlerin mekanik performansında bağ dayanımının kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Literatür taraması, kireç esaslı örgü harçlarla yapılan yığma sistem çalışmalarının sınırlı sayıda olduğunu göstermektedir. Mevcut deneysel çalışmalar, bu tür sistemlerin basınç ve kesme dayanımı açısından sınırlı, ancak restorasyon uygulamaları için kabul edilebilir düzeyde mekanik performans sergilediğini göstermektedir. Harç-tuğla ara yüzey bağ dayanımı, yük taşıma kapasitesinin yanı sıra yapısal deformasyon yeteneği ve malzeme uyumu açısından da belirleyici öneme sahiptir (Pavía & Hanley, 2010; Sarhosis vd., 2015).

Özellikle kesme yükleri altında elde edilen bağ dayanımı değerleri, literatürdeki sınırlı sayıdaki kireç esaslı harç verileriyle uyum içindedir ve bu malzemelerin kendine özgü mekanik davranışını yansıtmaktadır.

Çalışmanın önemli bir bulgusu, düşük bağ dayanımının sadece bir zayıflık göstergesi olmadığı, aynı zamanda tarihi yığma sistemler için gerekli olan esneklik, deformasyon kapasitesi ve özgün malzemelere uyum açısından avantaj sağlayabileceğidir. Harç dayanımının tuğlaya göre daha düşük olması, enerji sönümleme kapasitesini artırmakta ve çatlak ilerlemesini kontrol ederek yapısal bütünlüğün korunmasına katkıda bulunmaktadır (Kumble vd., 2023; Sarangapani vd., 2005). Ancak, bağ dayanımının kritik bir eşik değerin altına düşmesi durumunda, sistemin yanal yükler ve sismik etkiler karşısındaki stabilitesi olumsuz etkilenmekte ve taşıyıcı performans yetersiz kalabilmektedir (Sarangapani vd., 2005).

Kireç esaslı harçların mekanik performansını etkileyen temel parametreler incelendiğinde, su tutma kapasitesi, işlenebilirlik ve kıvam gibi fiziksel özelliklerin kritik rol oynadığı görülmektedir. Bu özellikler, harç-tuğla ara yüzeyinde oluşan mikro yapıyı doğrudan etkilemekte ve bağ dayanımı üzerinde belirleyici olmaktadır. Groot (1993), Lawrence ve Cao (1987) gibi araştırmacılar da bu ilişkiyi çalışmalarında vurgulamışlardır. Ayrıca, kullanılan pişmiş kil tuğlaların yüzey pürüzlülüğü ve su emme kapasitesi gibi özelliklerinde bağ dayanımına önemli katkı sağladığı deneysel olarak gösterilmiştir (Sarhosis vd., 2015).

Elde edilen bulgular, kireç esaslı harçlar ve geleneksel tuğlalardan oluşan sistemlerde bağ dayanımının çok yönlü bir öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu

parametre sadece yapısal kapasite açısından değil, aynı zamanda nem hareketleri, uzun vadeli dayanıklılık ve restorasyon uyumluluğu gibi faktörler açısından da kritik önem taşımaktadır.

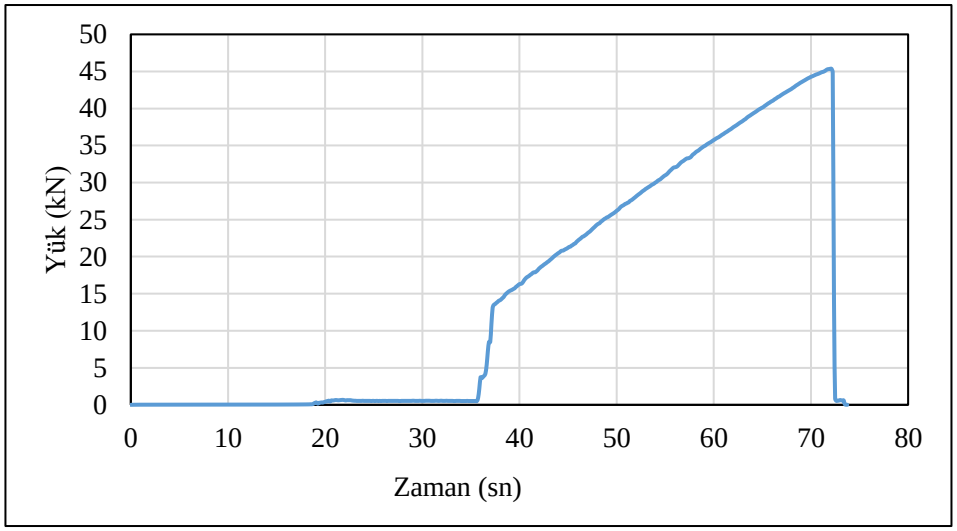
Özellikle tarihi yapıların korunması bağlamında, kireç esaslı harçların düşük mukavemetli olması geleneksel olarak bir zayıflık gibi görülse de bu özellik aslında özgün malzemelerle uyum, enerji sönümleme yeteneği ve kontrollü çatlak oluşumu gibi önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu nedenle, modern restorasyon uygulamalarında kireç esaslı harçlar, tarihi dokuyu korurken yapısal bütünlüğü de sağlayabilen optimal malzemeler olarak değerlendirilmelidir. Malzeme seçiminde sadece yüksek dayanım değil, malzeme uyumu ve uzun vadeli performans gibi kriterlerin de dikkate alınması gerekmektedir.

4.5.2. Yığma duvar numunesi üzerinde gerçekleştirilen testler

Harman tuğlası ve tez çalışması kapsamında geliştirilen Horasan harcı kullanılarak hazırlanan yığma duvar numunesinin kesme dayanımı performansı diyagonal basınç deneyi ile incelenmiştir. Çalışma kapsamında, ASTM E519 Standardına göre 3 adet duvar numunesi hazırlanmış ancak teknik nedenlerle iki adet duvar numunesinden veri elde edilememiştir (Şekil 4.21). Diyagonal basınç testinin gerçekleştirildiği numuneden elde edilen sonuçlar aşağıda açıklanmıştır.

Şekil 4.2119. Taşıma ve yükleme esnasında kırılan duvar numuneleri

Şekil 4.22. Diyagonal basınç deneyi uygulanan yığma duvar numunesi ve meydana gelen hasar detayları



Şekil 4.23. Diyagonal basınç deneyi sırasında duvar numunesine uygulanan yükün zamana bağlı değişim grafiği

Başarılı şekilde test edilen numunede, sabit yükleme altında duvarın 75 saniye içinde boyutsal stabilitesini kaybettiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.20'de görülebildiği gibi, diyagonal basınç kuvvetine maruz bırakılan yığma duvar numunesi, tipik yığma davranışı sergileyerek 45 kN maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşmış ve gevrek kırılma göstermiştir

ASTM E519 Standardına göre gerçekleştirilen diyagonal basınç deneyi sonucunda elde edilen veriler, ilgili standartta belirtilen formül kullanılarak analiz edilmiş ve duvarın kayma gerilmesi hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda deneye tabi tutulan yığma duvar numunesinin kayma dayanımı 0,58 MPa olarak bulunmuştur.

Literatürde gerçekleştirilen benzer çalışmalar incelendiğinde, yığma duvar numunelerinin taşıma kapasitesinin; kullanılan yığma birimin türü ve boyutları (örneğin tuğla, taş vb.), örgü harcının kalınlığı ve bileşimi (kireç harcı, çimento harcı, çimento-kireç karışımı vb.) ile örgü düzeni gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak önemli ölçüde farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır. Çizelge 4.6'da, harman tuğlası kullanılarak hazırlanmış ve ASTM E519 standardına uygun şekilde diyagonal basınç testine tabi tutulmuş yığma duvar numunelerine ilişkin, farklı araştırmacılar tarafından elde edilen deneysel bulgular ve numune özellikleri derlenmiştir.

Çizelge 4.6. Literatürde harman tuğlası kullanılarak hazırlanmış ve diyagonal basınç deneyi uygulanmış yığma duvar numunelerine özellikler ve test sonuçları

Yığma Birim Türü ve Boyutları	Örgü Harcı Türü ve Kalınlığı	Örgü Şekli	Kür Süresi	Göçme Yükü Kayma Dayanımı	Kaynak
Harman tuğlası 95x45x25 mm	Kireç esaslı harç-10mm kalınlık	1/2 şaşırtmalı	90 gün	4-7 kN 0,23-0,4 MPa	Alhan Şimşek (2018)
Harman tuğlası 190x90x60 mm	Çimento esaslı harç (10, 20, 30 mm)	Düz, 1/2 ve 1/3 şaşırtmalı	28 gün	3,75-23,21 kN 3,4-21x10^{-2} MPa	Yetkin vd. (2024)
Harman tuğlası	Kireç esaslı harç			13,32 kN 0,18 MPa	Casacci vd. (2019)
Harman tuğlası	Çimento ve kireç karışımlı harç	1/2 şaşırtmalı	28 gün	19,3 kN 0,16 MPa	Lin vd. (2014)
Harman tuğlası	Çimento esaslı harç (10 mm)	1/2 şaşırtmalı	28 gün	0,63 MPa 45,1 kN	Dehghani vd. (2015)
Harman tuğlası	Çimento ve kireç karışımlı harç (15 mm)	1/2 şaşırtmalı	28 gün	52kN 0,56 MPa	Bustos-Garcia vd. (2019)
Harman tuğlası	Kireç esaslı harç	1/2 şaşırtmalı		120,6 kN 0,14 MPa	Antonio Borri vd. (2019)
Harman tuğlası	Kireç esaslı harç (15mm)	Çift cidarlı	28 gün	147 kN 0,26 MPa	Garcia-Ramonda vd. (2020)
Harman tuğlası 310x 145x 45 mm	Kireç esaslı harç (15 mm)	Çift cidarlı flamen bağı	28 gün	151 kN 0,27 MPa	Segura vd. (2021)
Harman tuğlası 120x250x55 mm	Kireç esaslı harç	1/2 şaşırtmalı	28 gün	154 kN 0,56MPa	Ferretti ve Mazzotti (2021)

Çizelge 4.5’te sunulan veriler, deney numunelerine ait özelliklerin mekanik dayanım üzerinde önemli ölçüde etkili olduğunu ve sonuçların oldukça geniş bir aralıkta değişebildiğini ortaya koymaktadır. Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar, Dehghani vd. (2015) ve Bustos-Garcia vd. (2019) tarafından çimento esaslı harçlarla yapılan çalışmalardaki değerlerle karşılaştırılabilir düzeydedir. Özellikle dikkat çekici olan, 1 cm harç kalınlığındaki çimento harcı ile 1,5 cm kalınlığındaki çimento-kireç karışımı harçlarda elde edilen değerlere yakın sonuçlar alınmış olmasıdır. Bu bulgular, geliştirilen Horasan harcının, çimento esaslı harçlara alternatif olabilecek mekanik performans sergilediğini göstermekte ve elde edilen verilerin literatürle uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır.

5. SONUÇLAR

Bu doktora tez çalışmasında, tarihi yapıların özgün malzeme özellikleriyle uyumlu ve mekanik performansı iyileştirilmiş bir kireç esaslı onarım harcı geliştirilmesi hedeflenmiş ve bunun için beş aşamalı kapsamlı bir deneysel program yürütülmüştür. Çalışmanın temel bulguları aşağıda özetlenmiştir.

Kuruma büzülmenin kontrolü kapsamında yürütülen çalışmalarda;

Polipropilen lif ilavesinin harç karışımının taze hal özellikleri üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu tespit edilmiştir. Deneysel bulgular, lif ilavesinin özellikle işlenebilirlik üzerinde olumsuz bir etki yarattığını ve bu etkinin lif oranının artmasıyla daha da belirginleştiğini ortaya koymuştur. Lif miktarındaki artış, karışımın su ihtiyacını artırmış ve bu durum, su azaltıcı katkı kullanımını kaçınılmaz hale getirmiştir. Öte yandan, polipropilen lif ilavesinin kuruma büzülmesi üzerinde olumlu etkiler sağladığı, özellikle erken yaşlardaki büzülme değerlerinde anlamlı azalmalar meydana getirdiği belirlenmiştir. Ancak lif oranının hacimce %0,4'ün üzerine çıkması durumunda bu olumlu etkinin zamanla azaldığı deneysel verilerle ortaya konmuştur.

Kuruma-büzülme engelleyici (KBE) katkı maddelerinin etkileri ayrıntılı olarak incelenmiş ve %0,05 oranında KBE ilavesinin büzülme miktarlarını en etkin şekilde azalttığı belirlenmiştir. Ancak, bu optimal dozajın üzerindeki katkı oranlarının, beklentilerin aksine, büzülme davranışı üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Mekanik test sonuçları, polipropilen lif kullanımının harç özellikleri üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymuştur. Artan lif oranı, harç matrisinde boşluk oluşumunun artırarak lif-matris aderansını zayıflatmış ve bu durum, eğilme dayanımında %15–20, ve basınç dayanımında ise %10–15 oranında azalmaya yol açmıştır. 28 günlük kür süresi sonunda tüm numunelerde beklenen dayanım artışları elde edilmiş, ancak, 90 günlük kür sonunda, kontrol grubunda %8–12 oranında dayanım kaybı gözlemlenmiştir. Buna karşılık, lif katkısı içeren numunelerde bu kayıp %3–5 düzeyinde sınırlı kalmıştır. Bununla birlikte, lif oranının %0,4'ü aşması durumunda, artan boşluk oluşumunun bu olumlu etkiyi zayıflattığı tespit edilmiştir.

Aşınma direnci testleri, KBE katkılı karışımların performansını açıkça ortaya koymaktadır. 90 günlük kür sonunda, KBE içeren numuneler kontrol grubuna göre %15-20 daha az kütle kaybı göstermiştir. Düşük oranlarda (%0,4'e kadar) polipropilen lif ilavesi, kontrollü gözenek oluşumu sağlayarak aşınma direncini %10-12 artırmıştır. Ancak, %0.08 lif oranında aşırı boşluk oluşumu nedeniyle basınç dayanımı %18-22, aşınma direnci ise %25-30 oranında azalmıştır. Bu sonuçlar, optimum performans için %0,05 KBE ve %0,4'ü geçmeyen lif oranlarının uygun olduğunu göstermektedir.

Yüksek sıcaklık etkisine yönelik yapılan deneylerde dikkat çekici bir davranış gözlenmiştir., %0,6 ve %0,8 lif içeren karışımlarda, sıcaklık 300°C'den 600°C'ye çıkarıldığında basınç dayanımında %15-20 oranında bir artış tespit edilmiştir. Ancak, bu davranışın sadece belirli lif oranlarında (%0,6-0,8) ve 300-600°C aralığında geçerli olduğu, diğer koşullarda standart termal bozulma eğiliminin devam ettiği belirlenmiştir.

Puzolanik katkıların etkisinin incelenmesi kapsamında yürütülen çalışmalarda;

Metakaolin dışındaki tüm karışımlar, su azaltıcı katkı kullanılmaksızın hedeflenen yayılma değerine ulaşabilmiş olup, ancak puzolan ikame oranındaki artışa bağlı olarak yayılma değerlerinde belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Özellikle, metakaolinin yüksek inceliği ve özgül yüzey alanı nedeniyle, harç karışımının işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir.

Harç numunelerinin basınç dayanımları sonuçları değerlendirildiğinde, en yüksek performansın metakaolin içeren karışımlarda elde edildiği görülmüştür.

Agrega türü ve granülometri etkisinin incelendiği çalışmalarda;

Tuğla kırığına ikame edilen agregaların artan toz içeriği, karışımların yayılma performansını olumsuz yönde etkilemiştir. Yayılma performansı açısından en iyi sonuçlar ise dere kumu içeren karışımlarda elde edilmiştir.

Karışımlarda tuğla kırığı oranının azaltılması, genel dayanım performansını olumlu yönde etkilemiştir. En yüksek basınç dayanımı, eşit oranlarda dere kumu ve tuğla kırığı içeren karışımlarda gözlemlenmiştir.

Karışım oranlarının optimizasyonu kapsamında yürütülen çalışmalarda;

Agrega/bağlayıcı oranının 3'ten 2'ye düşürülmesi ve su/ toplam kuru malzeme oranının artırılması, harç numunelerinin dayanım performansını olumsuz yönde etkilemiştir. Bu doğrultuda hazırlanan karışımılar için optimum agrega/bağlayıcı oranı 3, su/toplam kuru malzeme oranının ise 0,20 olduğu belirlenmiştir.

Yığma numuneler üzerinde mekanik performansın incelenmesi kapsamında;

Yığma prizmaların basınç dayanımı 5,25 MPa, kesme dayanımı ise 1,06 MPa olarak ölçülmüştür.

Yığma duvar numunesi üzerinde gerçekleştirilen diyagonal basınç deneyi sonucunda, numunenin yük taşıma kapasitesi 45 kN olarak ölçülmüş ve kesme dayanımı 0,58 MPa olarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada yalnızca harman tuğlası kullanılarak deneysel uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Ancak tarihi yapılarda, yığma birim olarak kesme taş, küfeki taşı, vb. gibi farklı yapı malzemeleri bir arada bulunabilmektedir. Bu nedenle, ilerleyen çalışmalarda geliştirilen farklı yığma birim türleriyle olan mekanik ve kimyasal uyumunun incelenmesi, harç-yığma birim etkileşiminin kapsamlı bir biçimde anlaşılmasına ve farklı malzeme kombinasyonlarının uzun vadeli performanslarının değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır. Öte yandan, bu tez kapsamında harçların dayanımı, kısa ve orta vadeli kür koşulları altında ele alınmıştır. Gelecek çalışmalarda, geliştirilen harçların uzun vadeli dayanım ve durabilite özelliklerinin ortaya konulabilmesine yönelik çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

Ahunbay, Z. “Tarihi Çevre Koruma ve Restorasyon”, Yem Publication, Istanbul, Turkey, 2009.

Akman, M., Güner, A., Aksoy, İ., “The history and properties of khorasan mortar and concrete”, In: Turkish and Islamic Science and Technology in the 16th Century, ITU Research Centre of History of Science and Technology (1), İstanbul, Turkey, 1986, pp. 101-112.

Alberti, L. B. “Ten books on architecture”, Transatlantic Arts, New York, USA, 1966.

Alhan Şimşek, E. T. (2018). Tarihi yapılarda tuğla duvarların çelik hasır ve tekstil donatılı horasan harcı ile güçlendirilmesinin deneysel olarak incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye)

Altaş, G.K., Özgünler, S.A., Güldal, E. “İstanbul'daki Roma Dönemi Saray Yapılarının Horasan Harçlarının İncelenmesi”, (Khorasan mortar investigation in the roman palace structures in Istanbul), Foundation Restoration Annual, 4, pp. 41-49, 2012.

Altun, M. G., Özen, S., & Mardani-Aghabaglou, A. (2021). Effect of side chain length change of polycarboxylate-ether–based high-range water–reducing admixture on properties of cementitious systems containing fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *33*(4), 04021015.

Altun, M. G., Özen, S., Aghabaglou, A. M. “Polipropilen Lif Kullanımının Doğal Hidrolik Kireçli Harçların Kuruma Büzülmesine Etkisi”. (The effect of using polypropylene fiber on drying shrinkage of natural hydraulic lime mortars), Sakarya University Journal of Science, 22(2), 427–435, 2018. (in

Aly, T., Sanjayan, J. G., & Collins, F. (2008). Effect of polypropylene fibers on shrinkage and cracking of concretes. Materials and Structures, 41(10), 1741-1753.

Andrejkovičová, S., Velosa, A. L., Ferraz, E., & Rocha, F. (2014). Influence of clay minerals addition on mechanical properties of air lime–metakaolin mortars. Construction and Building Materials, 65, 132-139.

Antonio Borri, Giulio Castori, Marco Corradi, Romina Sisti,Masonry wall panels with GFRP and steel-cord strengthening subjected to cyclic shear: An experimental study,Construction and Building Materials,Volume 56,2014

Arizzi, A., & Cultrone, G. (2012). The difference in behaviour between calcitic and dolomitic lime mortars set under dry conditions: The relationship between textural and physical–mechanical properties. Cement and Concrete Research, 42(6), 818-826.

Atahan, H. N., Carlos Jr, C., Chae, S., Monteiro, P. J. M., Bastacky, J. “The morphology of entrained air voids in hardened cement paste generated with different anionic surfactants”, Cement and Concrete Composites, 30(7), pp. 566-575, 2008.https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.02.003

Barbero-Barrera, M. M., & Medina, N. F. (2018). The effect of polypropylene fibers on graphite-natural hydraulic lime pastes. Construction and Building Materials, 184, 591-601.

Baronio, G., Binda, L., Lombardini, N. “The role of brick pebbles and dust in conglomerates based on hydrated lime and crushed bricks”, Construction and Building Materials, 11(I), 33-40, 1997.

Benchiheub D, Amouri C, Houari H, et al. Effect of natural pozzolana and polypropylene fibers on the performance of lime mortar for old buildings restoration. J Adhesion Science and Technology. 2018;32(12):1324–1340.

Bentz, D. P., Snyder, K. A., Cass, L. C., & Peltz, M. A. (2008). Doubling the service life of concrete structures. I: Reducing ion mobility using nanoscale viscosity modifiers. Cement and Concrete Composites, 30(8), 674-678.

Binal, A., Kasapoğlu, K. E., Gökçeoğlu, C. “The surficial physical deterioration behaviour of Neogene volcano-sedimentary rocks of Eskişehir-Yazılıkaya, NW Turkey” Engineering Geology and The Environment, Greece, 3065-3069, 1997.

Biscontin, G., Birelli, M.P. ve Zendri, E., (2002). "Characterization of binders employed in the manufacture of Venetian historical mortars", Journal of Cultural Heritage, 3(1): 31–37.

Böke, H., Akkurt, S. & İpekoğlu, B. (2004). Tarihi yapılarda kullanılan Horasan harcı ve sıvalarının özellikleri. Yapı Dergisi, 269, 90-94.

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(6), 1115-1122.

Böke, H., Akkurt, S., Ipekoglu, B., & Uğurlu, E. (2007). Onarım Amaçlı Horasan Harç ve Sıvaların Hazırlanması. Mimarlıkta Malzeme, 3, 68–72.

Brandt, A. M. (2008). Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. Composite Structures.

Brooks, J. J., Johari, M. M., & Mazloom, M. (2000). Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete. Cement and concrete Composites, 22(4), 293-301.

Bulut, Ü. “Perlitin puzolanik aktivitesi”, Doctoral dissertation, Istanbul Technical University, Istanbul, 2007.

Bustos-García, A., Moreno-Fernández, E., Zavalis, R., & Valivonis, J. (2019). Diagonal compression tests on masonry wallets coated with mortars reinforced with glass fibers. Materials and Structures, 52, 1-13.

Canbaz, M., Güler, E. “Kireç türünün horasan harcı özelliklerine etkisi”, 6th International Symposium on Conservation and Strengthening of Historical Buildings, Trabzon, Turkey, 2017, pp. 543–548.

Cao J, Chung DD. “Carbon fiber reinforced cement mortar improved by using acrylic dispersion as an admixture”, Cement and Concrete Research, 31(11), pp. 1633–1637, 2001.

Casacci, S., Gentilini, C., Di Tommaso, A., & Oliveira, D. V. (2019). Shear strengthening of masonry wallettes resorting to structural repointing and FRCM composites. Construction and Building Materials, 206, 19-34.

Çavuş, M., Dayı, M., Dağcı, Y., & Ulusu, H. (2023). The usability of the brick dust and blast furnace slag in zeolite-based lime mortars in different curing environments. Ceramics International, 49(3), 4046-4054.

Chandra, S. “History of Architecture and Ancient Building Materials in India”, Tech Books International, New Delhi, India, Part ,2003.

Chawla K.K. “Fibrous Materials”, “Cambridge University Press”, Cambridge, United Kingdom, 1998.

Chunxiang, Q., Fei, G., & Li, L. (2006). Mechanism and effect of shrinkage-reducing agent used in cement mortar. Journal of Functional Materials, 37(2), 287.

Cinemre, M. “Kesme Taş Duvarlarda Kullanılan Tarihi Horasan Harçlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Master thesis, Sakarya University of Applied Sience, Sakarya, 2009.

Collins, F., & Sanjayan, J. G. (2000). Effect of pore size distribution on drying shrinking of alkali-activated slag concrete. Cement and Concrete Research, 30(9), 1401-1406.

Cultrone, G., Sebastian, E., Huertas, M. O. “Durability of masonry systems: A laboratory study”, Construction and Building Materials, 21(1), 40-51, 2007.

Cultrone, G., Sebastián, E., Huertas, M. O. “Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives: Mineralogical and textural changes”, Cement and Concrete research, 35(12), 2278-2289, 2005.

Day, R. L., & Shi, C. (1994). Influence of the fineness of pozzolan on the strength of lime natural-pozzolan cement pastes. Cement and Concrete Research, 24(8), 1485-1491.

Dayı M. “Tarihi Yapılarda Kullanılan Horasan Harçlarının İncelenmesi ve Alternatif Horasan Harçlarının Üretilmesi”, Doctoral Dissertation, Gazi University, 2017.

Debes, G. (1949). Kagir Beton Betonarme, Çev.Akil Muhtar Şuvak, İTÜ Matbaası, İstanbul.

Dehghani, A., Fischer, G., & Nateghi Alahi, F. (2015). Strengthening masonry infill panels using engineered cementitious composites. Materials and Structures, 48, 185-204.

Demircan, R. K., Kaplan, G. "Yüksek Fırın Cürufu ve Bazalt Lifi Takviyeli Restorasyon Harçlarının Sülfat Dayanıklılığının İncelenmesi", , 6th International Symposium on Conservation and Strengthening of Historical Buildings, Trabzon, Turkey, pp. 123–132, 2017.

Di Bella, G., Fiore, V., Galtieri, G., Borsellino, C., Valenza, A. "Effects of natural fibres reinforcement in lime plasters (kenaf and sisal vs. Polypropylene)". Construction and Building Materials, 58, pp. 159–165, 2014.

Diker, H. F., (2010), "Belgeler Işığında Fosatti'nin Ayasofya'da Yokettiği İzler ve Ayasofya'da Kullanılan Harç Üzerine Etimolojik ve Deneysel Bir Araştırma", 28th Research Results Meeting, T. R. Ministry of Culture and Tourism, General Directorate of Cultural Assets and Museums, Volume 2, Istanbul, 2010.

Durgun, M. Y., Özen, S., Karakuzu, K., Kobya, V., Bayqra, S. H., & Mardani-Aghabaglou, A. (2022). Effect of high temperature on polypropylene fiber-reinforced mortars containing colemanite wastes. Construction and Building Materials, 316, 125827.

Edison, M., Lausberg, C. "Improvements to Freeze-Thaw Resistance of Replication Mixes for Historic Mortars", APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology, 50(2/3), 46-58, 2019.

Elert, K., Sánchez, R. M. G., Benavides-Reyes, C., Ordóñez, F. L. "Influence of animal glue on mineralogy, strength and weathering resistance of lime plasters", Construction and Building Materials, 226, pp. 625-635,

Erdoğan, S. T., Erdoğan T.Y. ,Bağlayıcı Malzemelerin ve Betonun Onbin Yıllık Tarihi, METU Press Publishing, Ankara, Turkey, 2007.

Erdoğan, T. "Materials of Construction (3rd edition.)", METU Press Publishing, Ankara, Turkey. 2009

Erdoğan, T. Y. "Beton", (Concrete), METU Press Publishing, Ankara, Turkey, 2003.

Erdoğdu, Ş., Nas, M., Nayır, S., & Kandil, U. (2017). Uçucu Kül ve Polipropilen Lifli Kireç Harçlarının Çimento Takviyesi ile Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi. 6th International Symposium on Conservation and Strengthening of Historical Buildings, 247–256.

Eriç, M. (2010). *Yapı Fiziği ve Malzemesi (3. Baskı.)*. İstanbul: Literatür Yayıncılık.

Ersen, A., Gürdal, E., Güleç, A., Alkan, N., Ersan, H. Ö., Eruş, M., … Akıncı, G. (2016). Geleneksel Harçlar ve Koruma Harçları. Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi, (16), 36–50.

Faria, P., Fernando H., Rato V. "Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation." Journal of Cultural Heritage, 9(3), pp. 338-346, 2008.

Fernández, J. M., Duran, A., Navarro-Blasco, I., Lanas, J., Sirera, R., & Alvarez, J. I. (2013). Influence of nanosilica and a polycarboxylate ether superplasticizer on the performance of lime mortars. Cement and Concrete Research, 43, 12-24.

Ferretti, F., & Mazzotti, C. (2021). FRCM/SRG strengthened masonry in diagonal compression: Experimental results and analytical approach proposal. Construction and Building Materials, 283, 122766.

Gameiro, A., Silva, A. S., Veiga, R., & Velosa, A. (2012). Hydration products of lime–metakaolin pastes at ambient temperature with ageing. Thermochimica Acta, 535, 36-41.

Gani, M. S. J. “Cement and concrete”, CRC Press, Florida, USA, 1997.

Gao, S., Wang, Z., Wang, W., & Qiu, H. (2018). Effect of shrinkage-reducing admixture and expansive agent on mechanical properties and drying shrinkage of Engineered Cementitious Composite (ECC). Construction and Building Materials, 179, 172-185.

Garcia-Ramonda, L., Pela, L., Roca, P., & Camata, G. (2020). In-plane shear behaviour by diagonal compression testing of brick masonry walls strengthened with basalt and steel textile reinforced mortars. Construction and Building Materials, 240, 117905.

Grassl, P., Wong, H. S., & Buenfeld, N. R. (2010). Influence of aggregate size and volume fraction on shrinkage induced micro-cracking of concrete and mortar. Cement and concrete research, 40(1), 85-93.

Grdic, Z. J., Curcic, G. A. T., Ristic, N. S., & Despotovic, I. M. (2012). Abrasion resistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers. Construction and Building Materials, 27(1), 305-312.

Grilo, J., Faria, P., Veiga, R., Silva, A. S., Silva, V., & Velosa, A. (2014). New natural hydraulic lime mortars–physical and microstructural properties in different curing conditions. Construction and Building Materials, 54, 378-384.

Grilo, J., Silva, A. S., Faria, P., Gameiro, A., Veiga, R., & Velosa, A. (2014). Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions. Construction and Building Materials, 51, 287-294.

Groot, C. J. W. P. (1993). *Effects of water on mortar-brick bond* (pp. 57-70). Technische Universiteit Delft.

Gulbe, L., Vitina, I., Setina, J. “The Influence of Cement on Properties of Lime Mortars”, Procedia Engineering, 172, pp. 325-332, 2017.

Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Mohamadameen, A., Alzeebaree, R., Algın, Z., & Mermerdaş, K. (2014). Enhancement of shrinkage behavior of lightweight aggregate concretes by shrinkage reducing admixture and fiber reinforcement. Construction and Building Materials, 54, 91-98.

Gür, D., (2019). Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılmak Üzere Puzolan Katkılı Hidrolik Kireç Esaslı Onarım Harcı Üretilme Olanaklarının Araştırılması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Gür, D., & Özgünler, S. A. (2021). A Comperative Study on the Influence of Mineral Additives to the Physicomechanical Properties of NHL Mortars Cured in Water. Gazi University Journal of Science, 34(3), 611-628.

Gürdal, E., Özgünler, S. A., Kahraman, G. "Anemas Zindanları' nın Restorasyonunda Kullanılacak Onarım Harcının Üretimi İçin Yapılan Deneysel Çalışmalar", Journal of Restoration and Conservation Studies, 3, pp. 22–34, 2009.

Horszczaruk, E., Sikora, P., Cendrowski, K., & Mijowska, E. (2017). The effect of elevated temperature on the properties of cement mortars containing nanosilica and heavyweight aggregates. Construction and Building Materials, 137, 420-431.

İnce, İ. (2013). Donma-çözülme döngüsünün kayaçların mühendislik parametreleri üzerine etkisi.

Ingham, J. P. (2009) Diagnosing Defects in Lime-Based Construction Materials, Journal of Architectural Conservation, 15:3, 59-80.

Irshidat, M. R., & Al-Saleh, M. H. (2018). Thermal performance and fire resistance of nanoclay modified cementitious materials. Construction and Building Materials, 159, 213-219.

Işıkdağ, B., & Topçu, İ. B. (2013). The effect of ground granulated blast-furnace slag on properties of Horasan mortar. Construction and Building Materials, 40, 448-454.

Işıkdağ, B., Topçu, I. B. "Improvement of Khorasan mortar with fly ash for restoration of historical buildings", Science and Engineering of Composite Materials, 21(3), pp. 359–367, 2014.

Iucolano, F., Liguori, B., Colella, C. "Fibre-reinforced lime-based mortars: A possible resource for ancient masonry restoration", Construction and Building Materials, 38, pp. 785–789, 2013.

Izaguirre, A., Lanas, J., Alvarez, J. I. "Ageing of lime mortars with admixtures: Durability and strength assessment", Cement and Concrete

Izaguirre, A., Lanas, J., Alvarez, J. I. "Behaviour of a starch as a viscosity modifier for aerial lime-based mortars", Carbohydrate polymers, 80(1), pp. 222-228, 2010.

Izaguirre, A., Lanas, J., Alvarez, J. I. “Effect of a polypropylene fibre on the behaviour of aerial lime-based mortars”, Construction and Building Materials, 25(2), pp. 992–1000, 2011.

Izaguirre, A., Lanas, J., Alvarez, J. I. “Effect of water-repellent admixtures on the behaviour of aerial lime-based mortars”, Cement and concrete research, 39(11), pp. 1095-1104, 2009.

Janotka, I., & Nürnbergerová, T. (2005). Effect of temperature on structural quality of the cement paste and high-strength concrete with silica fume. Nuclear Engineering and design, 235(17-19), 2019-2032.

Kumble, P., Prashant, S., & Achar, N. (2023). Bond strength of alkali-activated flyash based masonry system for sustainable construction. SN Applied Sciences, 5(12), 360.

Lachemi, M., Hossain, K. M. A., Lambros, V., Nkinamubanzi, P. C., Bouzoubaa, N. “Performance of new viscosity modifying admixtures in enhancing the rheological properties of cement paste”, Cement and Concrete Research, 34(2), pp. 185-193, 2004

Lanas, J., & Alvarez-Galindo, J. I. (2003). Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior. Cement and concrete research, 33(11), 1867-1876.

Lanas, J., Bernal, J. P., Bello, M. A., & Galindo, J. A. (2004). Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. Cement and concrete research, 34(12), 2191-2201.

Lanas, J., Sirera, R., & Alvarez, J. I. (2005). Compositional changes in lime-based mortars exposed to different environments. Thermochimica Acta, 429(2), 219-226.

Lange D.A, Ouyang C., Shah S.P. “Behavior of cement based matrices reinforced by randomly dispersed microfibers”, Advanced Cement Based Materials, 3(1), pp. 20–30, 1996.

Latifi, M. R., Biricik, Ö., & Mardani Aghabaglou, A. (2021). Effect of the addition of polypropylene fiber on concrete properties. Journal of Adhesion Science and Technology, 1-25.

Lawrence, S. J., & Cao, H. T. (1987, August). An experimental study of the interface between brick and mortar. In Proc., 4th North American Masonry Conf (pp. 1-14).

Lin, Y. W., Wotherspoon, L., Scott, A., & Ingham, J. M. (2014). In-plane strengthening of clay brick unreinforced masonry wallettes using ECC shotcrete. Engineering Structures, 66, 57-65.

Malinowski R. Ancient mortars and concretes, durability aspects. Mortars, cements and grouts used in conservation of historic buildings. In: Proceedings of the symposium, ICCROM, Rome; 1981. p. 341–50

Maltese, C., Pistolesi, C., Lolli, A., Bravo, A., Cerulli, T., & Salvioni, D. (2005). Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars. Cement and concrete research, 35(12), 2244-2251.

Mardani-Aghabaglou, A., Ilhan, M., & Ozen, S. (2019). The effect of shrinkage reducing admixture and polypropylene fibers on drying shrinkage behaviour of concrete. Cement Wapno Beton, 24(3), ss. 227-238.

Mardani-Aghabaglou, A., Özen, S., & Altun, M. G. (2018). Durability performance and dimensional stability of polypropylene fiber reinforced concrete. Journal of Green Building, 13(2), 20-41.

Mardani-Aghabaglou, A., ve İlhan, M. (2018). Büzülme engelleyici katkıların su azaltıcı katkı varlığında harç karışımlarının basınç dayanımına, su emmesine ve kuruma-büzülmesine etkisi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22(2), 417-426.

Margalha, M.G., Veiga, M.R. De Brito, J. “The Time Factor in Lime Quality”, 7th International Brick Masonry Conference Proceedings, London, UK, 2006, pp. 1-19.

Mavioğlu, Ü. A. “Farklı Puzolanik Katkılar ile Hazırlanan Horasan Harçlarının Değişen Parametrelerinin İncelenmesi”, Master Thesis, İstanbul Technical University, 2011.

Mehta, P.K., Monteiro, P.J. “Concrete; Microstructure, Properties and Materials”, McGraw-Hill Publishing, New York City, USA, 2006.

Memiş, S., Kaplan, G., Yılmazoğlu, M. U., Yaprak, H., Mütevelli, İ. G. Farklı Sıcaklık ve Sürelerde Kalsine Edilmiş Killerin Kireç Harcına Etkisi, 6th International Symposium on Conservation and Strengthening of Historical Buildings, Trabzon, Turkey, 2018, pp. 133–142.

Moropoulou, A., Bakolas, A. ve Bisbikou, K., (2000). "Investigation of the technology of historic mortars", Journal of Cultural Heritage, 1(1): 45–58.

Navrátilová, E., & Rovnaníková, P. (2016). Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. Construction and Building Materials, 120, 530-539.

Newman, J., Choo, B. S. “Advanced concrete technology 3”, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2003.

Nežerka, V., Slížková, Z., Tesárek, P., Plachý, T., Frankeová, D., & Petráňová, V. (2014). Comprehensive study on mechanical properties of lime-based pastes with additions of metakaolin and brick dust. Cement and concrete research, 64, 17-29.

Nmai C, Tomita R, Hondo F, Buffenbarger J. (1998). Shrinkage-reducing admixtures. Concr Int.1998;20(4):31–7.

Nogueira, R., Pinto, A. P. F., & Gomes, A. (2018). Design and behavior of traditional lime-based plasters and renders. Review and critical appraisal of strengths and weaknesses. Cement and Concrete Composites, 89, 192-204.

Ouyang, X., Guo, Y., Qiu, X. "The feasibility of synthetic surfactant as an air entraining agent for the cement matrix", Construction and Building Materials, 22(8), pp. 1774-1779, 2008.

Özgen, Ö. "Horasan Harcı Üzerine Deneysel Çalışmalar, Culture and Tourism Ministry, Ankara, 2012.

Pachta, V., Triantafyllaki, S., & Stefanidou, M. (2018). Performance of lime-based mortars at elevated temperatures. Construction and Building Materials, 189, 576-584.

Pachta, V., Tsardaka, E. C., & Stefanidou, M. (2021). The role of flame retardants in cement mortars exposed at elevated temperatures. Construction and Building Materials, 273, 122029.

Papayianni, I., & Stefanidou, M. (2006). Strength–porosity relationships in lime–pozzolan mortars. Construction and Building Materials, 20(9), 700-705.

Pascal, S., Alliche, A., Pilvin, P. "Mechanical behaviour of polymer modified mortars", Materials Science and Engineering :A, 380(1-2), pp.1–8, 2004.

Pavlík, V., & Užáková, M. (2016). Effect of curing conditions on the properties of lime, lime–metakaolin and lime–zeolite mortars. *Construction and Building Materials*, *102*, 14-25.

Pekmezci, I. P. (2014). Kireç Esaslı Malzemelerde Görülen Bozulma Sebepleri ve Onarım Yöntemleri. Kargir Yapılarda Koruma ve Onarım Semineri, 126–144.

Pérez-Nicolás, M., Duran, A., Navarro-Blasco, I., Fernández, J. M., Sirera, R., & Alvarez, J. I. (2016). Study on the effectiveness of PNS and LS superplasticizers in air lime-based mortars. Cement and Concrete Research, 82, 11-22.

Pinto, A. P. F., Gomes, A., Silva, B., Candeias, A., & do Vale, F. (2017). Influence of water reducers on the early age properties of aerial lime mortars. In 3rd International Conference on Protection of Historical Constructions (pp. 337-338).

Postacıoğlu, B. (1981). Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri-İç Yapı ve Mekanik Özellikler, Cilt 1, İTÜ Matbaası, İstanbul.

Pozo-Antonio, J. S. (2015). Evolution of mechanical properties and drying shrinkage in lime-based and lime cement-based mortars with pure limestone aggregate. Construction and Building Materials, 77, 472–478.

Prince, W., Castanier, G., Giafferi, J. "Similarity between alkali-aggregate reaction and the natural alteratin of rocks", Cement and Concrete Research, 31, 271-276, 2001.

Puertas, F.,Amat, T., Fernandez-Jimenez, A. and Vazquez, T. (2003) Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres. Cement and Concrete Research, 33. 2031–2036

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

Ribeiro, A.B., Gonçalves, A. & Carrajola, A. Effect of shrinkage reduction admixtures on the pore structure properties of mortars. Mater Struct 39, 179–187 (2006).

Rosato, L., Stefanidou, M., Milazzo, G., Fernandez, F., Livreri, P., Muratore, N., & Terranova, L. M. (2017). Study and evaluation of nano-structured cellulose fibers as additive for restoration of historical mortars and plasters. Materials Today: Proceedings, 4(7), 6954-6965.

Sánchez, J. A., Barrios, J., Barrios, A., & Arellano Agudo, A. R. (1997). The shrinkage in lime mortars. Materiales De Construcción, 47(245), 17–28.

Sant, G., Lothenbach, B., Juilland, P., Le Saout, G., Weiss, J., & Scrivener, K. (2011). The origin of early age expansions induced in cementitious materials containing shrinkage reducing admixtures. Cement and concrete research, 41(3), 218-229.

Sarangapani, G., Venkatarama Reddy, B. V., & Jagadish, K. S. (2005). Brick-mortar bond and masonry compressive strength. Journal of materials in civil engineering, 17(2), 229-237.

Sarhosis, V., Garrity, S. W., & Sheng, Y. (2015). Influence of brick–mortar interface on the mechanical behaviour of low bond strength masonry brickwork lintels. Engineering Structures, 88, 1-11.

Seabra, M. P., Paiva, H., Labrincha, J. A., & Ferreira, V. M. (2009). Admixtures effect on fresh state properties of aerial lime based mortars. Construction and Building Materials, 23(2), 1147-1153.

Segura, J., Pelà, L., Saloustros, S., & Roca, P. (2021). Experimental and numerical insights on the diagonal compression test for the shear characterisation of masonry. Construction and Building Materials, 287.

Shah, S. P., Karaguller, M. E., & Sarigaphuti, M. (1992). Effects of shrinkage-reducing admixtures on restrained shrinkage cracking of concrete. Materials Journal, 89(3), 289-295.

Shang, H., Xiao, Z., Wang, X., Lu, Z., Xu, S., & Dong, P. (2024). Study on modification of natural hydraulic lime historical building repair mortar. Journal of Building Engineering, 97, 110583.

Sickels, L.B. “Organic additives in mortars”. Edinburgh Architecture Research, 8, pp. 7-20, 1981.

Silva, B. A., Ferreira Pinto, A. P., Gomes, A. “Influence of natural hydraulic lime content on the properties of aerial lime-based mortars”. Construction and Building Materials, 72, pp. 208–218, 2014.

Silva, B. A., Ferreira Pinto, A. P., Gomes, A. “Natural hydraulic lime versus cement for blended lime mortars for restoration Works”. Construction and Building Materials, 94, pp. 346–360, 2015.

Silva, B. A., Pinto, A. F., Gomes, A., Candeias, A. “Suitability of different surfactants as air-entraining admixtures for lime mortars”. Construction and Building Materials, 256, 118986, 2020.

Silva, B., Pinto, A. P. F., Gomes, A., & Candeias, A. (2019). Fresh and hardened state behaviour of aerial lime mortars with superplasticizer. Construction and Building Materials, 225, 1127-1139.

Soliman, A. M., & Nehdi, M. L. (2014). Effects of shrinkage reducing admixture and wollastonite microfiber on early-age behavior of ultra-high performance concrete. Cement and Concrete Composites, 46, 81-89.

Tekin, Ç., & Kurugöl, S. (2012). Impacts of Various Organic Additives on Carbonization of Lime, Journal of the Faculty of Engineering and Arcchitecture of Gazi University, 27(4).

Tokyay, M. “Cement and concrete mineral admixtures”. CRC Press. London, 2016.

Toledo Filho, R. D., & Sanjuan, M. A. (1999). Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age. Cement and concrete research, 29(10), 1597-1604.

Topçu, İ. B., Göbel, S., Işıkdağ, B. “Genleştirilmiş perlitin horasan harçlarında kullanılması”, 2nd International Sustainable Building Sympodium, Ankara., Turkey, 2015, pp. 133–137.

Torraca, G. (2009). Lectures on materials science for architectural conservation.

Torraca, G. “Porous building materials: materials science for architectural conservation” International Centre for The Study of The Preservation and The Restoration of Cultural Property, Rome, Italy, 1982.

Uğurlu, E., Böke, H.,Koruma amaçlı üretilecek horasan harç ve sıvalarda kullanılacak kirecin ve tuğlaların özellikleri, National Building Materials Congress and Exhibition, Istanbul, Turkey, pp. 385-396, 2010.

Vakıflar Genel Müdürlüğü “Yurt İçi Taşınmaz Vakıf Kültür Varlıklarına Örnekler”www.vgm.gov.tr, Available at https://www.vgm.gov.tr/faaliyetler/restore-edilen-tasinmaz-vakif-kultur-varliklari/yurt-ici-tasinmaz-vakif-kultur-varliklarina-ornekler, Access: 06.03.2025,

Vavričuk, A., Bokan-Bosiljkov, V., Kramar, S. “The influence of metakaolin on the properties of natural hydraulic lime-based grouts for historic masonry repair”. Construction and Building Materials, 172, 706–716, 2018. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.007

Ventolà, L., Vendrell, M., Giraldez, P., & Merino, L. (2011). Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics. Construction and Building Materials, 25(8), 3313-3318.

Wang, J. Y., Chia, K. S., Liew, J. Y. R., & Zhang, M. H. (2013). Flexural performance of fiber-reinforced ultra lightweight cement composites with low fiber content. Cement and Concrete Composites, 43, 39-47.

Wehbe, Y., & Ghahremaninezhad, A. (2017). Combined effect of shrinkage reducing admixtures (SRA) and superabsorbent polymers (SAP) on the autogenous shrinkage, hydration and properties of cementitious materials. Construction and Building Materials, 138, 151-162.

Weiss, W. J., Borischevsky, B. B., & Shah, S. P. (1999). The influence of a shrinkage reducing admixture on the early-age behavior of high performance concrete. In Fifth International Symposium on the Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Sandefjord, Norway (Vol. 2, pp. 1418-1428).

Xu, S., Wang, J., & Sun, Y. (2015). Effect of water binder ratio on the early hydration of natural hydraulic lime. Materials and Structures, 48, 3431-3441.

Yetkin, M., Calayır, Y., & Alyamaç, K. E. (2024). The effect of mortar and bond type on mechanical parameters of masonry walls. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 39(1), 621-634.

Yılmaz, C. Portland Çimentosu Kullanımının Horasan Harcı Özelliklerine Etkisi., Master Thesis, Gazi University, Ankara, 2010.

Yoo, D. Y., Kim, J., Zi, G., & Yoon, Y. S. (2015). Effect of shrinkage-reducing admixture on biaxial flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Construction and Building Materials, 89, 67-75.

Yüzer, N., Doran, B., Berilgen, M.M., Hazar, A.B., Tuncer, Ö.F., Köksal, H.O., Büyükpınar, Ç., Tarihi yapıların tuğla duvar özgün malzeme özelliklerinin belirlenmesi ve yük altında davranışının model deneylerle araştırılması,TUBITAK, Ankara, Turkey, 2015. (in [Turkish])

Záleská, M., Pavlíková, M., Vyšvařil, M., & Pavlík, Z. (2021). Effect of aggregate and binder type on the functional and durability parameters of lightweight repair mortars. *Sustainability*, *13*(21), 11780.

Zappia, G., Sabbioni, C., Riontino, C., Gobbi, G., & Favoni, O. (1998). Exposure tests of building materials in urban atmosphere. Science of the total environment, 224(1-3), 235-244.

Zhan, P. M., & He, Z. H. (2019). Application of shrinkage reducing admixture in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, *201*, 676-690.

Zhang, Z., Xu, L., & Tang, M. (2009). Effect of shrinkage reduing admixture on hydration and pore structure of cement-based materials. Journal of the Chinese Ceramic Society, 37(7), 1244-1248.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Tuğçe Kaya
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa/ 17.06.1994
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu
Lise : Bursa Atatürk Anadolu Lisesi
Lisans : Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Yüksek Lisans :-

Çalıştığı Kurum(lar) :

İletişim (e-posta) :tugce.isafca@gmail.com

Akademik çalışmalar* :

1. İsafça, T., Karakuzu, K., Özen, S., Doğangün, A., & Mardani-Aghabaglou, A. (2021). Effects of material properties on the mechanical and durability behaviors of Khorasan mortar mixtures: a review. *Journal of Adhesion Science and Technology*, *35*(23), 2507-2528
2. İsafça-Kaya, T., Karakuzu, K., Özen, S., Mardani, A., & Doğangün, A. (2024). Effects of shrinkage reducing admixture and polypropylene fiber utilization on some fresh state, mechanical and durability properties of khorasan mortar. International Journal of Architectural Heritage, 18(1), 1-20.
3. İsafça-Kaya, T., Kaya, Y., Mardani, N., Mardani, A., & Doğangün, A. (2025). Improving Lime-Based Restoration Mortars: Effect of Type and Utilization Rate of Binder and Aggregate. Materials, 18(5), 96
4. Kaya, T. İ., Karakuzu, K., Özen, S., Doğangün, A., & Aghabaglou, A. M. (2022). Effect of polypropylene fiber and shrinkage reducing admixture utilization on water absorption of Khorasan mortar. Materials Today: Proceedings, 57, 730-733
5. Kaya, Y., Aytekin, B., Kaya, T., & Mardani, A. (2023). Investigation of pozzolanic activity of recycled concrete powder: effect of cement fineness, grain size distribution and water/cement ratio. Materials Today: Proceedings
6. Kaya, T. İ., Karakuzu, K., Mardani, A., & Doğangün, A. (2022). Yüksek sıcaklığın polipropilen lif takviyeli horasan harcının bazı özelliklerine etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (37), 96-101
7. İsafça, T.,&Doğangün, A., Bursa Ulu Cami'nin Taşıyıcı Sisteminin Yapısal Olarak İrdelenmesi, I. Uluslararası Bilim ve İnovasyon Kongresi, Denizli, Türkiye, 2019/8, 660-665.
8. Kaya, T. İ. & Doğangün, Major Damages In Turkish Hıstorıcal Mosques, 6. Uluslararası Erciyes Bilimsel Araştırmalar Kongresi. 2021.

9. İsafça-Kaya, T., Kaya, Y., Mardani, A., & Doğangün, A., Effect of Aggregate Type on Compressıve Strength Performance of Khorasan Mortar Mıxtures, UMTEB – XIV International Scientific Research Congress September 14-15, 2023 / Naples, Italy, 559-564.
10. Kaya T., Mardani A., Doğangün A., Kaya Y.(2023), Yüksek Dayanımlı Horasan Harcı Karışımı, Patent, Buluşun Başvuru Numarası: 2023/018412,
11. BAP , BURSİYER, Kuruma Büzülmesi Önleyici Katkı ve Sentetik Lif Kullanımının Horasan Harcının Reolojik, Mekanik ve Bazı Durabilite Özelliklerine Etkisi, Yürütülen Kuruluş: BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ, (Haziran 2020-Haziran 2022)
12. BAP, ARAŞTIRMACI, Tarihi Yapıların Onarımında Kullanılmak Üzere Onarım Harçlarının Geliştirilmesi, Yürütülen Kuruluş: BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ (Devam ediyor).