



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**Kireç Taşı Kalsine Kil (LC³) Çimentosu ile
Geliştirilen Genel Amaçlı ve İnce Katmanlı Kagir
Harçlar**

SEYİT FURKAN ÖZ

YÜKSEK LİSANS

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Seyit Furkan ÖZ tarafından hazırlanan “Kireç Taşı Kalsine Kil (LC³) Çimentosu ile Geliştirilen Genel Amaçlı ve İnce Katmanlı Kagir Harçlar” adlı tez çalışması 29/12/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Ülkü S. KESKİN
(Konya Teknik Üniversitesi)

Danışman

Doç. Dr. Oğuzhan ÖZTÜRK
(Konya Teknik Üniversitesi)

Üye

Doç. Dr. Oğuzhan ŞAHİN
(Ankara Üniversitesi)

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından “Türkiye Menşeli Düşük Kaliteli ve Atık Esaslı Killerle Kireçtaşı Kalsine Kil Çimento ve Harç Geliştirilmesi” isimli 123M850 numaralı proje ve Konya Teknik Üniversitesi (KTUN) Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından 251004002 numaralı Kireç Taşı Kalsine Kil (LC³) Çimentosu ile Üretilmiş Genel Amaçlı ve İnce Katmanlı Kagir Harçlar isimli proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Seyit Furkan ÖZ

Tarih: 29.12.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

Kireç Taşı Kalsine Kil (LC³) Çimentosu ile Geliştirilen Genel Amaçlı ve İnce Katmanlı Kâgir Harçlar

SEYİT FURKAN ÖZ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Oğuzhan ÖZTÜRK

2025, 66 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Doç. Dr. Oğuzhan ÖZTÜRK
Doç. Dr. Oğuzhan ŞAHİN

Geleneksel Portland çimentosunun (PÇ) yüksek enerji tüketimi ve klinker üretimine bağlı CO₂ emisyonları, sürdürülebilir bağlayıcıların geliştirilmesini zorunlu hâle getirmiştir. Bu bağlamda kireçtaşı kalsine kil çimentosu (LC³), düşük karbon ayak izine alternatiflerden biri olarak öne çıkmaktadır. LC³ karışımlarında düşük kaliteli killerin değerlendirilmesi, maliyetler ve çevresel etkiler açısından daha faydalı çözümler sunmaktadır. Bu tez çalışmasının temel amacı, Türkiye menşeli düşük kaliteli killere üretilen LC³ bağlayıcısı ile genel amaçlı ve ince tabakalı kâgir harçlar geliştirmektir. Geliştirilen genel amaçlı ve ince tabakalı kâgir harçların ilgili standartlardaki performansı referans olarak mevcut ticari kireç katkılı çimento harçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, bağlayıcı sisteminde sadece %10 PÇ içeren ve geri kalan karışım bileşenlerinde kalsine edilmiş düşük kaliteli kil, kireçtaşı ve alçıtaşı içeren çok düşük klinkerli LC³ karışımları genel amaçlı ve ince tabakalı kâgir harçlar için geliştirilmiştir. Deneysel program hammaddeler için sırasıyla killerin öğütülmesini ve 650 °C’de kalsinasyonunu, hibrit öğütme ile incelik optimizasyonunu içermektedir. Geliştirilen genel amaçlı ve ince tabakalı LC³ kâgir harçlarının ardından TS EN standartları kapsamında taze halde yayılma, işlenebilirlik süresi, hava içeriği, klorür içeriği sertleşmiş halde ise birim hacim kütle, kapiler su emme, basınç dayanımı, başlangıç kayma dayanımı, eğilme bağ dayanımı, ısı iletkenlik, su buharı geçirgenliği ve yangına tepki performansları belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar özellikle klinker içeriğinin düşürülmesi ile istenilen performansların sağlanması arasında geniş bir ön araştırma içermektedir. Tez kapsamında geliştirilen %10 PÇ içeren genel amaçlı LC³ kâgir harçların 28 günlük basınç dayanımları (6,7 MPa-7,5 MPa aralığında), referans olarak kullanılan mevcut ticari kireç katkılı kâgir harçlarının ortalama basınç dayanımlarına (7,0 MPa) benzer performans göstermiştir. İnce katmanlı LC³ kâgir harçlarında ise yaklaşık ortalama 5,9 MPa ile 7,2 MPa aralığında 28 günlük basınç dayanımı elde edilmiş olup, referans ince katmanlı harçlarla benzer (ortalama 6,4 MPa) basınç dayanımına sahiptir. Kapiler su emme katsayıları LC³ genel amaçlı ve ince tabakalı kâgir harçlarda referans karışımlara kıyasla kısmen daha fazla olsa da eğilme bağ dayanımı ve başlangıç kayma dayanımı performansları, özellikle bazı LC³ kâgir harçları için yüksek aderans ve yük aktarımı sağladığını göstermiştir. Genel olarak bulgular, düşük kaliteli yerel killere formüle edilen, PÇ içeriği %10 seviyesine kadar düşürülmüş genel amaçlı ve ince tabakalı LC³ kâgir harçların hem mekanik hem de yapı fiziği açısından teknik gereklilikleri karşılayabilecek ve çevresel etkisi azaltılmış bir seçenek olarak uygulanabilir olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kireçtaşı kalsine kil çimentosu (LC³), Düşük klinkerli kâgir harcı, Taze harç özellikleri, Sertleşmiş harç özellikleri, Mekanik özellikler, TS EN 998-2 uyumlu harç.

ABSTRACT

MS THESIS

General-Purpose and Thin Layered Masonry Mortars Produced with Limestone Calcined Clay (LC³) Cement

Seyit Furkan ÖZ

Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Civil Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Oğuzhan ÖZTÜRK
2025, 66 Pages

Jury

Prof. Dr. Ülkü Sultan KESKİN
Assoc. Prof. Dr. Oğuzhan ÖZTÜRK
Assoc. Prof. Dr. Oğuzhan ŞAHİN

The high energy consumption and CO₂ emissions associated with clinker production in traditional Portland cement (PC) have necessitated the development of sustainable binders. In this context, Limestone Calcined Clay Cement (LC³) emerges as a prominent alternative with a low carbon footprint. The valorization of low-grade clays in LC³ mixtures offers more beneficial solutions in terms of costs and environmental impacts. The primary objective of this thesis is to develop general purpose and thin-layer masonry mortars using LC³ binders produced with low-grade clays of Turkish origin. The performance of the developed general purpose and thin-layer masonry mortars was compared with existing commercial lime-added cement mortars used as references, in accordance with the relevant standards. For this purpose, ultra-low clinker LC³ mixtures, comprising only 10% PC in the binder system with the remaining components consisting of calcined low-grade clay, limestone, and gypsum, were developed for general purposes and thin-layer masonry mortars. The experimental program included the grinding of clays, their calcination at 650 °C, and fineness optimization via hybrid grinding for the raw materials, respectively. Subsequently, the developed general purpose and thin-layer LC³ masonry mortars were tested within the scope of TS EN standards to determine fresh state properties (flow, workability life, air content, chloride content) and hardened state properties (dry bulk density, capillary water absorption, compressive strength, initial shear strength, flexural bond strength, thermal conductivity, water vapor permeability, and reaction to fire). The experimental studies involved extensive preliminary research, particularly regarding the reduction of clinker content while ensuring the desired performance levels. The 28-day compressive strengths of the general purpose LC³ masonry mortars containing 10% PC developed within the scope of the scope of the thesis (ranging from 6.7 MPa to 7.5 MPa) demonstrated similar performance to the average compressive strengths of the commercial lime-added masonry mortars used as references (7.0 MPa). In the thin-layer LC³ masonry mortars, 28-day compressive strengths were obtained in the range of approximately 5.9 MPa to 7.2 MPa, showing similar compressive strength to the reference thin-layer mortars (average 6.4 MPa). Although the capillary water absorption coefficients in the LC³ general purpose and thin-layer masonry mortars were slightly higher compared to the reference mixtures, the flexural bond strength and initial shear strength performances indicated that they provided high adhesion and load transfer, particularly for certain LC³ masonry mortars. Overall, the findings reveal that general purpose and thin-layer LC³ masonry mortars formulated with low-grade local clays, with PC content reduced to as low as 10%, are viable as an environmentally reduced-impact option capable of meeting technical requirements in terms of both mechanical properties and building physics.

Keywords Limestone Calcined Clay Cement (LC³), Low clinker masonry mortar, Fresh mortar properties, Hardened mortar properties, Mechanical properties, TS EN 998-2 compliant mortar.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamın konusunun belirlenmesinden sonuçlandırılmasına kadar geçen tüm süreçte, engin bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, akademik gelişimime vizyon katan ve her aşamada desteğini ve güvenini hissettiğim kıymetli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Oğuzhan ÖZTÜRK'e en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Tez kapsamında yürütülen deneysel çalışmalarda kullanılan killerin teminindeki değerli katkılarından dolayı ETİLER Madencilik San. ve Tic. A.Ş. Ar-Ge Müdürü Sayın Şevket TAŞIBAŞI'na; çalışmamda ihtiyaç duyduğum kimyasal katkıların temini ve teknik destekleri için Onbiron Endüstriyel Kimyasallar yetkilisi Sayın Semile KAYA'ya teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim süresince laboratuvarında omuz omuza çalıştığımız hem akademik paylaşımları hem de dostluğu ile her zaman yanımda olan kıymetli mesai arkadaşım İmirza Okay ALTUNTAŞ'a katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Laboratuvar süreci boyunca teknik bilgi ve tecrübeleriyle yardımlarını gördüğüm Konya Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Laboratuvarı personelleri Sayın Selçuk SOMUNCU ve Sayın Alper Yakup YALÇIN'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca aldığım her kararda arkamda duran, maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen, bugünlere gelmemde büyük emekleri olan fedakâr aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Son olarak, bu yoğun ve yorucu süreçte gösterdiği büyük sabır, anlayış ve sonsuz sevgisiyle en büyük motivasyon kaynağım olan biricik eşime teşekkür ederim.

Seyit Furkan ÖZ
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	13
3.1. Malzemeler	13
3.2. Yöntem.....	16
3.2.1. Killerin Öğütme ve Kalsinasyonu.....	16
3.2.2. LC ³ Katkılı Kagit Harçların Üretilmesi.....	18
3.2.3 Kagit Harçların Taze Özelliklerinin Belirlenmesi.....	20
3.2.3.1. Taze Harç Kıvamının (Yayılma) Tayini	21
3.2.3.2 İşlenebilirlik Süresinin Tayin Testleri	22
3.2.3.3. Klorür İçeriği Belirleme Testi.....	23
3.2.3.4. Hava İçeriği Belirlenmesi Testi	25
3.2.4. Kagit Harçların Sertleşmiş Özelliklerinin Belirlenmesi	26
3.2.4.1. Basınç Dayanım Testi	27
3.2.4.2. Su Emme Parametresi Belirleme	27
3.2.4.3 Isıl İletkenlik Testi	28
3.2.4.4. Başlangıç Kayma Dayanım Testi	29
3.2.4.5. Su Buharı Geçirgenliği Testi	31
3.2.4.6. Eğilme Bağ Dayanım testi	32
3.2.4.7. Yoğunluk Belirleme Deneyi	33
3.2.4.8. Yangına Tepki Tespiti	34
4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA	35
4.1. Taze Harç Özelliklerine Ait Bulgular	35
4.1.1. Taze Harç Yayılma Değerleri	35
4.1.2. Kagit Harçların İşlenebilirlik Tayini	38
4.1.3. Kagit Harçların Hava İçeriği	40
4.1.4. Klorür İçeriği Analiz Sonuçları	41
4.2. Sertleşmiş Harç Özelliklerine Ait Bulgular	43
4.2.1. Birim Hacim Kütle (Yoğunluk) Sonuçları.....	43
4.2.2. Kagit Harçların Kapiler Su Emme Davranışları.....	44
4.2.3. Basınç Dayanım Sonuçları.....	45
4.2.4. İnce Katmanlı Kagit Harçlarla Hazırlanan Kagit Birimlerin Kayma Dayanımı.....	49
4.2.5. Kagit Harçların Eğilme Bağ Dayanımı Sonuçları	52

4.2.6. Kagit Harçların Isıl İletkenlik ve Su Buharı Geçirgenliği Sonuçları.....	53
4.2.7. Kagit Harçların Yangına Tepki Sınıflandırması.....	55
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	56
KAYNAKLAR	59



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

g : Gram
kg : Kilogram
m : Metre
mm : Minimetre.
 σ : Basınç / Normal gerilme
 τ : Kayma gerilmesi
f : Basınç dayanımı / kuvvet
fc : Beton basınç dayanımı
 ε : Birim şekil değiştirme
 γ : Özgöl ağırlık / birim hacim ağırlığı
 λ : Isı iletkenlik katsayısı
 μ : Su buharı difüzyon direnci katsayısı
 ρ : Yoğunluk

Kısaltmalar

ASTM: American Society for Testing and Materials
Al₂O₃: Alüminyum Oksit
AS₂, AS₄: Alümina Silikat Fazları
CaCO₃: Kalsiyum Karbonat
CaO: Kalsiyum Oksit
CaSO₃: Kalsiyum Sülfat
CH: Kalsiyum Hidroksit
C₃S: Trikalsiyum Silikat
CO₂: Karbondioksit
C-A-S-H: Kalsiyum Alümina Silikat Hidrat
C-S-H: Kalsiyum Silikat Hidrat
DKK-1: Düşük Kalite Kil 1
DKK-2: Düşük Kalite Kil 2
EN: European Norm
GCCA: Global Cement and Concrete Association
PC: Portland Çimentosu
TÇM: Tamamlayıcı Çimento Malzemeleri
TS: Türk Standartları
XRF:X-Işınları Floresans Spektroskopisi
XRD:X-Işını Kırınımı

1. GİRİŞ

Portland çimentosu (PÇ), insanlığın ihtiyaç duyduğu çeşitli altyapılar ve barınma inşasında çok önemli bir rol oynamıştır. Günümüzde dünya genelinde inşaat sektöründe en yaygın kullanılan yapı malzemeleri arasında Portland çimentosu (PÇ) yer almaktadır. Küresel ölçekte bakıldığında örneğin beton malzemesi insanlar tarafından en çok tüketilen maddelerden biridir. Beton, çimentonun su ve agregalar ile karıştırılmasıyla elde edilen kompozit bir yapı malzemesi olup bileşeninde kullanılan PÇ, kireç taşı, kil ve diğer hammaddelerin öğütülmesi ve yüksek sıcaklıklarda pişirilmesiyle üretilen hidrolik bir bağlayıcıdır (Gümüşsoy, 2019).

Ancak, modern dünyanın inşasında vazgeçilmez olan bu PÇ üretimi, ciddi çevresel etkileri ve maliyetleri de beraberinde getirmektedir. PÇ üretimi, küresel ölçekte insan kaynaklı CO₂ emisyonlarının yaklaşık %8'inden sorumludur (Gilfillan ve Marland, 2021). Özellikle 20. yüzyıldan sonra dünya genelinde hızla artan sanayileşme ve kentleşme, PÇ üretimini çok arttırmış ve bu durum çeşitli çevresel emisyonlarda aşırı bir yükselişe neden olmuştur (Andrew, 2018). Türkiye özelinde incelendiğinde, 2018 yılı verilerine göre ülkemizin çimento üretiminde dünyada dördüncü sırada yer alması ve genel olarak PÇ ihracatçısı konumunda olması konunun ulusal çevre politikaları açısından da ne denli önemli olduğunu göstermektedir (Argin, 2019).

Çimento üretimi sırasındaki CO₂ salınımı temel olarak iki ana mekanizmadan meydana gelmektedir. İlk olarak, üretimin gerektirdiği yüksek sıcaklıkları (yaklaşık 1450 °C) sağlamak için kullanılan yakıtlar bu emisyonlara neden olmaktadır. İkinci olarak ise hammaddelerin kimyasal dönüşümüdür. PÇ üretimi sırasında, kireç taşının yüksek sıcaklıkta pişirilmesi işlemi gerçekleştirilmekte ve bu süreçte kalsiyum karbonatın (CaCO₃) kalsiyum okside (CaO) dönüşmesiyle büyük miktarda CO₂ açığa çıkmaktadır (Wang ve diğ., 2020; Scrivener ve Zunino, 2022). Ortalama olarak, üretilen her bir ton PÇ için atmosfere yaklaşık 0.7-1 ton arasında CO₂ salınımı gerçekleşmektedir (Benhelal ve diğ., 2013). Atmosferde biriken bu sera gazları, "sera etkisi" olarak tanımlanan etki ile küresel ısınma, iklim değişikliği, deniz seviyelerinin yükselmesi ve ekstrem hava olaylarının artması gibi geri dönülemez çevresel sorunlara yol açmaktadır (Kadioğlu, 2008). Ayrıca yüksek CO₂ seviyeleri hava kalitesini düşürerek solunum yolu hastalıkları riskini artırmaktadır. Bunun yanında çevresel etki olarak biyolojik çeşitlilik önemli bir kayba uğramaktadır (Bayraç, 2010). Bu nedenle, sera gazı emisyonlarının azaltılması ve

sürdürülebilir üretim uygulamalarının benimsenmesi çimento endüstrisi için artık çeşitli regülasyonlarla zorunluluk haline gelmiştir (Özdemir ve diğ., 2017).

Çimento endüstrisinde karbon ayak izini düşürmek amacıyla enerji verimliliğini artırma çalışmaları yapılsa da günümüz modern klinker fırınlarının büyük bir kısmı termodinamik olarak mümkün olan maksimum verimliliğe yakın seviyelerde faal haldedir. Bu nedenle, emisyonları azaltmanın en gerçekçi ve etkili yolu, yüksek enerji ve karbon yoğunluğuna sahip klinker miktarını azaltmak amaçlı uygulanabilecek seçeneklerdir (Scrivener ve diğ., 2018). Çimento ve beton sektöründe bu amacı gerçekleştirmek için klinkere ikame olarak kullanılabilecek "Tamamlayıcı Çimento Malzemeleri (TÇM)" (Supplementary Cementitious Materials- SCM) kullanımı yaygınlaşmıştır. Geleneksel olarak kullanılan mineral katkıları arasında uçucu kül (UK), granüle yüksek fırın cürufu (GYFC), silis dumanı ve doğal puzolanlar yer almaktadır. Bu malzemelerin kullanımı, çimentonun çevresel etkisini azaltmakta (Gettu ve diğ., 2016) ve belirli oranlarda kullanıldığında betonun dayanıklılığını da iyileştirebilmektedir. Ancak, 2000'li yılların başlarındaki araştırmalar, mevcut endüstriyel yan ürünlerle klinker oranının daha fazla azaltılmasının mümkün olmadığını ortaya koymuştur (Antoni ve diğ., 2012). UK gibi malzemeler geniş bir kaynağa sahip olsa da zaman zaman yapısal farklılıklarından dolayı düşük reaktiviteleri nedeniyle klinkerin yerini sınırlı ölçüde alabilmektedir (Santhanam ve diğ., 2020). Ayrıca, kömürle çalışan termik santrallerin kapatılmasına yönelik küresel eğilimler nedeniyle uçucu kül arzının gelecekte çok daha azalacağı beklenmektedir (Benhelal ve diğ., 2013; Her ve diğ., 2024). Benzer şekilde, GYFC daha yüksek ikame oranlarına izin verse de üretimi demir-çelik endüstrisine bağlıdır ve miktarı küresel çimento talebinin ihtiyaç duyduğu ikame oranlarını karşılamaktan uzaktır (Scrivener ve diğ., 2018).

Çevresel kaygılar ve hammadde kısıtlılıkları ülkemizde yasal düzenlemelerde de yer almaktadır. Türkiye'de 16 Mart 2024 tarihli Resmî Gazete de yayımlanan "Kamu İhale Sözleşmelerinde Düşük Karbon Emisyonuna Sahip Yeşil Çimento Kullanımının Yaygınlaştırılmasına İlişkin Tebliğ" ile sektörde önemli bir değişikliğe gidilmiştir. Bu tebliğ uyarınca, 2025 yılından itibaren kamu ihalelerinde CEM I Portland çimentosu yerine, daha düşük klinker miktarına ve karbon ayak izine sahip yeşil çimentoların kullanımı zorunlu hale getirilmeye çalışılmaktadır. İlgili düzenlemede "Yeşil Çimento", içeriğinde %95'ten daha az klinker ve %5'ten fazla mineral katkı barındıran çimentolar olarak tanımlanmıştır. Bu yasal çerçeve, alternatif ve sürdürülebilir bağlayıcı teknolojilerinin önemini ülkemizde çok daha fazla artırmıştır (Altuntaş, 2024).

Mevcut TÇM kaynaklarının yetersizliği ve yasal zorunluluklar karşısında, dünyada en bol bulunan ve rezerv sorunu en az olan, kil ve kireçtaşı çözüm olarak öne çıkmaktadır (Scrivener ve diğ., 2018). Bu malzemelerin kullanımıyla geliştirilen en umut verici bağlayıcı bileşenlerinden birisi, "Kireçtaşı Kalsine Kil Çimentosu" (Limestone Calcined Clay Cement) veya kısaca LC³ olarak adlandırılan bağlayıcılardır (Phung ve diğ., 2021). LC³, klinkerin %50 veya daha fazlasının, kalsine kil (%30) ve kireçtaşı (%15) karışımı ile ikame edildiği, geri kalan %5'lik kısmın ise alçıtaşıdan oluştuğu üçlü bir bağlayıcı sistemdir (Avet ve Scrivener, 2018). Bu bileşenin temel avantajı, PÇ üretimine kıyasla CO₂ emisyonlarını %30-%40 oranında azaltma potansiyeline sahip olmasıdır (Scrivener ve diğ., 2018). Bu azaltma, klinker miktarının yarıya indirilmesi ve kilin kalsinasyon sıcaklığının (700-850 °C), klinker üretim sıcaklığına (1450 °C) göre çok daha düşük olmasıyla sağlanmaktadır (Antoni ve diğ., 2012; Vance ve diğ., 2013). LC³ sisteminin başarısı, kalsine kil ve kireçtaşı arasındaki puzolanik, dolgu etkisi ve karboalüminat gelişimlerine dayanmaktadır. Kalsine kilden gelen reaktif alümina ile kireçtaşıdan gelen karbonat iyonları hidrasyon sürecinde "karboalüminat" fazlarını oluşturmaktadır (Li ve diğ., 2023; Sabir ve diğ., 2001). Bu fazlar, betonun boşluk yapısını doldurarak mikroyapıyı iyileştirmekte ve mekanik dayanımı arttırmaktadır. Yapılan çalışmalar, kaolin kili kullanılarak üretilen LC³ harçlarının, 7. günden itibaren geleneksel PÇ harçları ile benzer dayanım değerlerine ulaşabildiğini göstermiştir (Zunino ve Scrivener, 2022).

LC³ bağlayıcılarının performansını belirleyen en kritik faktör, kullanılan kilin mineralojik yapısı ve uygulanan ısıtma işlemlerdir. Kil mineralleri, tetrahedral silika ve oktahedral alümina tabakalarının tabakalanmasıyla oluşan kristal yapılardır (Alujas ve diğ., 2015; Sabir ve diğ., 2001). Literatürde killer kaolinit, illit ve montmorillonit olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılmaktadır. Bu mineraller arasında kaolinit, 1:1 tabaka diziliminde bir silikat ve bir alüminat tabakası olmak üzere diğerlerinden ayrılmaktadır (Gruner, 1932). İllit ve montmorillonit ise iki silikat tabakası arasında bir alüminat tabakasının yer aldığı 2:1 dizilime sahiptir. Isıtma işlem uygulandığında en yüksek puzolanik reaktiviteyi gösteren tür ise kaolinit tabanlı killer olduğu rapor edilmiştir (Fernandez ve diğ., 2011). Kilin reaktif hale gelmesi için uygulanan kalsinasyon süreci hassas bir sıcaklık kontrolü gerektirmektedir. Kaolinit ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) yaklaşık 400-650 °C sıcaklık aralığında ısıtıldığında, kristal yapısındaki suyu kaybederek (dehidroksilasyon) "metakaolin" adı verilen amorf ve derece reaktif bir yapıya dönüşmektedir. Endüstriyel uygulamalarda, reaktiviteyi maksimize etmek için kalsinasyon genellikle 700-800 °C

aralığında gerçekleştirilmektedir (Gutiérrez ve diğ., 2008). Sıcaklığın bu optimum aralığın üzerine çıkması durumunda ise malzemenin yapısında istenmeyen kristal değişimler meydana gelmektedir. Bu nedenle 925-1050 °C aralığında genellikle Al-Si kübik spinel yapılar oluşmaya başlar (Altuntaş, 2024). Sıcaklık 1050 °C'yi aştığında ise mullit adı verilen oldukça kararlı kristal yapılar oluşur (Chen ve diğ., 2004). 1200 °C üzerinde ise amorf silika dahi, kristobalit adı verilen forma dönüşerek kristallenmektedir (Zunino ve Scrivener, 2024). Literatürde aşırı kalsinasyon (over-calcination) olarak tanımlanan bu yüksek sıcaklık işlemlerinde kil partiküllerinin sinterleşmesi sonucu yüzey alanı azalmaktadır ve puzolanik reaktivite ciddi oranda düşmektedir (Rocha ve Klinowski, 1990; Fernandez ve diğ., 2011).

Yüksek saflıkta kaolinit içeren killeri ile üstün performanslı LC³ çimentoları üretilbilse de saf kaolin aynı zamanda kâğıt, porselen, tarım gibi endüstrilerde talep edilen ve maliyeti yüksek bir hammaddedir (Dill, 2016; Avet ve diğ., 2016). Bu nedenle, çimento endüstrisi için sürdürülebilir ve ekonomik çözüm, diğer sektörlerle rekabet yaratmayan, düşük kaliteli (low-grade) ve karışık mineralli killerin kullanımıdır (Blouch ve diğ., 2023). Düşük kaolinit içeriğine sahip killerin LC³ üretiminde kullanılabilirliği, bu malzemelerin mineralojik kompozisyonu ve üretim teknikleriyle çok yakından ilişkilidir. Bu noktada, hibrit öğütme yöntemi kritik bir öneme sahiptir. Klinker, kalsine kil ve kireçtaşının ayrı ayrı öğütülüp karıştırılması yerine bir arada öğütülmesi, malzemeler arasında daha iyi bir partikül dağılımı ve sinerjisi sağlamaktadır (Altuntaş, 2024). Hibrit öğütme sırasında, daha yumuşak olan kalsine kil ve kireçtaşı partikülleri, daha sert olan klinker taneciklerinin arasına yerleşerek paketleme yoğunluğunu arttırmaktadır. Ayrıca, kilin sertliğinin artmasıyla su emme kapasitesinin düştüğü ve bunun da harç kıvamı iyileştirdiği tespit edilmiştir.

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasının amacı; inşaat mühendisliği alanına giren yapıların yük taşıyan ve taşımayan kâgir kısımları için kullanılacak hazır kâgir harçlarına örme, derz oluşturma ve derz doldurma işleri için kullanılan gereklilikleri LC³ bağlayıcıları ile geliştirmektedir. Bu sayede ülkemizden temin edilen düşük kaliteli killeri kireç taşı kalsine kil çimento harçlarının (LC³) geliştirilmesi ile hammadde kaynaklarının temini ve üretim sırasındaki çevresel etkilerin azaltıldığı yapı bileşenlerinin üretilmesi amaçlanmıştır. Genel amaçlı ve ince katmanlı LC³ kâgir harçlarda geleneksel kâgir harçlardan farklı olarak matris

içerisinde kalsine kil, kalker ve alçı kullanılmış ve bu kâgir harçlarının taze ve sertleşmiş özellikleri incelenmiştir. Geliştirilen LC³ kagir harçlarda hammadde temininden başlamak üzere ve malzemelerin kagir harç üretimi için uygun hale getirilmesi amacıyla çeşitli işlemler uygulanmıştır. Bu işlemler sırasıyla hammadde temini, çimento ikame malzemelerinin hibrit olarak öğütülmesi, çimento ikame malzemelerinin yeterli inceliğe getirilmesi, killerin kalsinasyonu ve kagir harçlar üretilmesi şeklindedir. Tez kapsamında yürütülen deneylerde, çimento içerisinde bulunan klinkerin ton fiyatından daha düşük maliyetli olması amaçlanan killere tercih edilmiş ve bu killere herhangi bir zenginleştirme veya süzme işleminden geçirilmeden olduğu gibi laboratuvarında kullanılmıştır. Tez kapsamı LC³ kâgir harçlarının piyasada satılan referans kagir harçların taze ve sertleşmiş özelliklerinin benzerlik gösterecek şekilde geliştirmeyi amaçlamaktadır. Ön çalışmalarda killere uygulanmış olan testler ile belirlenmiş olan bir sıcaklıkta (650°C) kalsinasyon işlemi yapılmıştır. Aşağıda belirlenen hedefler kapsamında deneysel çalışmalar yürütülmüştür:

- 1) LC³ kâgir harçlarını referans kagir harçların performansları ile kıyaslayarak kullanılabilecek en düşük seviyede klinkerin yer almasını sağlamak;
- 2) Kireçtaşı kalsine kil sisteminde düşük kaliteli ve işlem görmemiş killeri LC³ kâgir harçlarına uygun hale getirmek,
- 3) Killere için ön araştırmalara göre belirlenen sıcaklıkta kalsinasyon işlemi gerçekleştirmek,
- 4) Hibrit öğütme işlemleri ile hammaddeleri (kil, kalker, alçıtaşı) LC³ kagir karışımları için daha iyi hale getirmek,
- 5) Üretilen kagir harçların standartlarda yer alan taze ve sertleşmiş özelliklerini referans kagir harçlarla karşılaştırmak.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Çimento esaslı bağlayıcı malzemelerin çevresel etkilerinin azaltılması, günümüzde en kritik araştırma alanlarından biri hâline gelmiştir. Özellikle kalsine killer ve kireçtaşı tozu gibi doğal ve yaygın bulunan hammaddelerin kullanılması, çevresel etkilerin düşürülerek daha sürdürülebilir çimento üretim stratejilerinin geliştirilmesi adına oldukça önemlidir. PÇ'ye alternatif TÇM malzeme arayışları, yüksek enerji tüketimi ve klinker üretimi sırasında açığa çıkan CO₂ emisyonları nedeniyle hız kazanmıştır (Moropoulou ve diğ., 2001). Klinker üretimi sırasında kireçtaşı tozu yaklaşık 900 °C sıcaklıkta ayrışması sonucunda yüksek oranda CO₂ ortaya çıkmakta ve bu durum çimento sektörünü küresel ölçekte en yüksek CO₂ salınımı yapan endüstrilerden biri hâline getirmiştir. Bu nedenle uluslararası çalışmalar, sürdürülebilir çimento bileşimleri için yol haritaları geliştirmektedir ve TÇM olarak adlandırılan mineral katkıların üretimlerde daha yüksek oranlarda kullanılması teşvik edilmektedir (GCCA, 2021). Literatür, puzolanik özellik taşıyan malzemelerin PÇ hidratasyon ürünleriyle reaksiyona girerek ek C-S-H oluşumunu sağladığını ve böylece hem dayanımı hem de mikro yapıyı iyileştirdiğini kanıtlamıştır (He ve diğ., 1995).

Portland Çimentosu (PÇ); kireçtaşı ve kilin yaklaşık 1400°C sıcaklıkta döner fırınlarda kalsine edilmesiyle elde edilen klinkerin, %3–5 oranında alçıtaşı ile birlikte öğütülmesi sonucu üretilen hidrolik bir bağlayıcıdır (Li, 2011). PÇ modern inşaat sektörünün temel yapı taşı olarak kabul edilmektedir (Newman ve diğ., 2003). Çimento üretiminde ortaya çıkan toplam CO₂ salınımı başlıca, kireçtaşı tozunun ısıl ayrışmasıyla ortaya çıkan emisyonlar (yaklaşık %45) ile üretimde kullanılan fosil yakıtların neden olduğu enerji kaynaklı emisyonlardır (yaklaşık %40). Bunun yanı sıra, kırma ve öğütme işlemleri ile nakliye aşamalarına bağlı enerji tüketimi de emisyonların (yaklaşık %15) önemli bir bölümünü oluşturmaktadır (Sousa ve diğ., 2021). Bu dağılımın güncel literatürde benzer şekilde hala devam etmekte olduğu görülmektedir (Izumi ve diğ., 2021). Bu yüksek emisyon yükü nedeniyle çimento sektörü, karbon azaltımı hedefleri doğrultusunda alternatif yakıtlar, mineral katkıları, düşük klinkerli çimentolar ile karbon yakalama ve depolama teknolojileri gibi çok yönlü uygulamalara yönelmiştir. Bu bağlamda kalsine killer ve kireçtaşı tozu malzemeleri hem düşük çevresel etkiye sahip hem de yüksek performanslı çimento sistemleri için kritik malzemeler olarak öne çıkmaktadır.

TÇM literatürde, su ile doğrudan hidratasyona girmemelerine rağmen Portland çimentosu hidratasyon ürünlerinden kalsiyum hidroksit (CH) ile reaksiyona girerek ek C-S-H fazları oluşturan katkılar olarak tanımlanmaktadır (He ve diğ.,1995). Puzolanik aktivite, malzemenin CH tüketme kapasitesine bağlı olup amorf faz oranı yüksek malzemelerde reaktivitenin arttığı bilinmektedir (Ramezaniapour ve diğ., 2013). Puzolanik aktivite, fiziksel, mekanik ve kimyasal olmak üzere üç ana yöntemle değerlendirilmektedir (Askarinejad ve diğ., 2012). Fiziksel yöntemlerde XRD ile kireç tüketimi izlenebilmekte, mekanik yöntemlerde dayanım aktivite indeksi testi kullanılabilir ve kimyasal yöntemlerde ise asitte çözünen aktif silika ve alümina miktarı belirlenebilmektedir. Bunun yanında TÇM tabanlı karışımlarda aynı zamanda hidratasyon kinetikleri izotermal kalorimetre testleri ile de izlenebilmektedir.

Killerin mineraloji ve reaktivitesine odaklanan çalışmalar, literatürde en yaygın incelenen kil türlerinin kaolinit (1:1), illit (2:1) ile smektit/montmorillonit (2:1) olduğunu göstermektedir (Scrivener ve diğ., 2019). Örneğin, montmorillonit su ile temas ettiğinde hacimsel olarak şişmesi nedeniyle çimento sektöründe sınırlı şekilde kullanılmaktadır (Fernandez ve diğ., 2011). Kaolinitin illit ile karışımı durumunda, su kaybı miktarının kaolinit oranına bağlı olarak arttığı raporlanmıştır (Scrivener ve diğ., 2019). Metakaolin içeren çimento hamurlarında jel gözenekliliği ile hidratasyon derecesi arasında yüksek bir korelasyon bulunmaktadır (Zunino, 2020). Bu bulgular, LC³ gibi çok bileşenli çimento sistemlerinde kil mineralojisinin oldukça kritik bir rol oynadığını göstermektedir.

LC³ bağlayıcıları özelinde kireçtaşı tozu kalsine kil karışımlarına odaklanan çalışmalar, bu sistemin düşük karbonlu çimentolar arasında en umut verici bağlayıcılardan biri olarak değerlendirildiğini ortaya koymaktadır. École Polytechnique Fédérale de Lausanne tarafından geliştirilen yaklaşımda özellikle %30 kalsine kil, %15 kireçtaşı tozu, %5 alçıtaşı ve %50 klinker içeren karışımlar en çok tercih edilen LC³ karışımı olmuştur (Zhao ve Zhang, 2023). LC³ sisteminin performansını belirleyen temel mekanizmalar arasında metakaolin ile kireçtaşı tozuyla arasındaki sinerji ve hidratasyon ürün mekanizması öne çıkmaktadır. Metakaolin içeriğinden gelen alümina, kireçtaşı tozuyla reaksiyona girerek hemikarbonat ve monokarbonat gibi karboalüminat fazlarını oluşturmaktadır (Ramezaniapour, 2013). Bu fazlar dayanımı artıran C-A-S-H jel oluşumunu da desteklemektedir (Antoni ve diğ., 2012). Kalsine killerin Si ve Al fazları, CH ile reaksiyona girerek C-S-H, C-A-H ve karboalüminat hidratları meydana getirmekte

(Overmann ve diğ., 2024) ve bu mekanizmalar sayesinde erken yaş dayanımı da artmaktadır.

Hidratasyon ısısı ve ısı yayılım gelişimi davranışlarına ilişkin çalışmalar, çimento reaksiyonlarının hızını ve dayanım gelişimini değerlendirmede önemli bir göstergedir. Avet ve Scrivener (2018) tarafından yürütülen çalışmalarda, LC³ sistemlerinde hidratasyon ısısının daha çok katkı miktarı, kaolinit içeriği, kireçtaşı tozunun oranı ve süperakışkanlaştırıcı kullanımı gibi parametrelerden etkilendiğini göstermiştir (Krishnan ve diğ., 2020). LC³-50 karışımlarında kaolinit miktarının artmasıyla hidratasyon ısı eğrisindeki silikat ve alüminat piklerinin daha belirgin hâle geldiği görülmüştür. Süperakışkanlaştırıcı ilavesinin ise LC³ sistemlerinde ilk aşamalarda yer alan bekleme periyodunu geciktirdiği ve hidratasyon ısısının zirve yaptığı zamanı ileriye taşıdığı da ayrıca rapor edilmiştir (Krishnan ve diğ., 2020).

Hidratasyon ürünlerinin oluşumu ve faz değişimlerine yönelik çalışmalar, hidratasyon sürecinde ortaya çıkan fazların çimento sisteminin kimyasal dayanımını ve uzun vadeli performansını belirlediğini göstermektedir. LC³ sistemlerinde başlıca hidratasyon ürünleri olarak C-S-H, C-A-S-H, hemikarboalüminat, monokarboalüminat, etrenjit, hemietrenjit ve portlandit fazları gözlenmektedir. Kalsine kilin puzolanik reaksiyonları nedeniyle LC³ çimentolarında portlandit miktarı, klasik Portland çimentosuna göre daha düşük seviyelerdedir. Buna karşılık karboalüminat fazlarının oluşumu belirgin biçimde artmaktadır. Bu fazların gelişimi, LC³ çimentolarının klorür penetrasyonuna karşı dayanımını yükseltmekte, daha yoğun bir mikro yapı oluşmasına ve mekanik özelliklerin zamana bağlı olarak daha kararlı biçimde gelişmesine katkı sağlamaktadır (Antoni ve diğ. 2012). Scrivener ve diğ. 2018 yılında yayımladıkları çalışmada, yaklaşık %40–50 kaolinit içeren killerin LC³ sistemleri için optimum kabul edilebileceğini belirtmiştir. Bu aralığın üzerindeki kaolinit oranlarının ise faz oluşumunda ilave bir avantaj sağlamamaktadır.

Hidratasyon ürünlerinin mikro yapı üzerindeki etkisine ilişkin çalışmalar, mikro yapı karakterizasyonunun LC³ gibi hibrit çimento sistemlerinde kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Dhandapani ve diğ., (2018) tarafından yapılan çalışmada LC³ sistemlerinin PC'ye kıyasla daha yoğun, daha homojen ve daha düşük toplam gözenekliliğe sahip olduğu ortaya konmuştur. LC³ çimentosu, PC'ye göre daha fazla mikro yapı gelişimi oluşturmuş ve bu durum özellikle karboalüminat jel oluşumu ile

ilişkili bulunmuştur. Bu bulgu, LC³'ün özellikle dayanıklılık gerektiren altyapı uygulamalarında uygun bir bağlayıcı sistemi olduğunu desteklemektedir.

Killerin sınıflandırılması, termal aktivasyonu ve LC³ içindeki işlevi üzerine yapılan çalışmalar, killerin çimento ve beton teknolojisinde hem mineral katkı hem de sürdürülebilir çimento sistemlerinin geliştirilmesi açısından kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Daha önce bahsedildiği üzere, mineralojik olarak 1:1 veya 2:1 tabaka yapısına sahip olan killer, reaktivite, yüzey alanı, katyon değişim kapasitesi ve termal dönüşüm davranışları bakımından birbirinden önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar LC³ çimentolarında kullanılan kalsine kilin verimliliğini etkilemektedir. Kaolinit, 1:1 tabakalı yapıda olup kristal yapısının kararlı olması nedeniyle şişme özelliği göstermemektedir. Genellikle beyaz veya açık tonlarda olup metakaolin formu yüksek reaktiviteye sahiptir (Fernandez ve diğ., 2011). Düşük plastisite, yüksek termal kararlılık ve uygun kimyasal dönüşüm gibi özellikleri nedeniyle LC³ tasarımlarında en çok tercih edilen kil türü kaolinitir. İllit, 2:1 tabakalı kil ailesine ait olup tabakalar arasında yer alan K⁺ iyonları sayesinde genişlemeyen bir yapı gösterir. Jeolojik olarak oldukça yaygın olan illit, ülkemizde ve Dünyada deniz ve göl tortullarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Kaolinite göre daha düşük puzolanik aktiviteye sahip olan illitin yüksek sıcaklıklarda dahi reaktivitesi sınırlı kalmaktadır (Ihekwe me ve diğ., 2020). İllitin LC³ içinde kullanılabilmesi için termal bozunma davranışının iyi anlaşılması, optimal kalsinasyon prosedürünün belirlenmesi ve metakaolin kadar yüksek reaktivite göstermediğinin de dikkate alınması gerekmektedir (Fernandez ve diğ., 2011). Smektit grubu killer (montmorillonit vb.) ise 2:1 tabakalı ve yüksek şişme kapasitesine sahip minerallerdir. Montmorillonit su ile temas ettiğinde hacmini artırdığı için çimento teknolojisinde kullanılmaktadır. Ancak kimyasal açıdan uygun yapısı, yüksek kalsinasyon sıcaklıklarında belirli düzeyde puzolanik özellik gösterebilmesine imkân tanımaktadır (Zunino ve Scrivener, 2019).

Termal aktivasyon süreci, kil minerallerinin kristal yapısının bozulduğu, amorflaşmanın gerçekleştiği ve puzolanik reaktivitenin arttığı kritik bir işlemdir. Kaolinit için optimum kalsinasyon sıcaklığının genellikle 650–800 °C aralığındadır. Bu aralık literatürde en yüksek reaktivitenin elde edildiği bölge olarak raporlanmıştır (Mermerdaş ve diğ., 2012). Kalsinasyonun kil üzerindeki etkileri; kristalin yapının bozulmasıyla amorf faz artışı, yüzey alanında artış, reaktif silika ve alümina oluşumu, gözeneklilikte artış ve bağlı suyun uzaklaşması şeklinde özetlenmektedir. Bu dönüşüm, LC³

sistemlerinde karboalüminat fazlarının oluşumunu hızlandırmaktadır ve C-A-S-H jelinin gelişmesini desteklemektedir. Kaolinitin metakaoline dönüşümü, literatürde yaklaşık 550–650 °C aralığında dehidroksilasyon ve 650–800 °C aralığında amorf metakaolin oluşumu şeklinde tanımlanmıştır. Frias ve Cabrera'nın (2000) çalışmasına göre, metakaolin içeren çimento pastalarında CH tüketimi 7. günden itibaren belirgin şekilde artmaktadır. Bu durum yüksek puzolanik aktivitenin bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir.

Farklı ülkelerde kalsine kil kaynakları ve üretim potansiyeli incelendiğinde Türkiye'nin jeolojik çeşitliliği nedeniyle önemli kaolin ve kil rezervlerine sahip olduğu görülmektedir. Dünya kaolin üretiminde Çin 6,4 milyon ton, ABD 5,06 milyon ton, Almanya 4,76 milyon ton ve Türkiye 1,28 milyon ton şeklinde bir sıralama raporlanmaktadır (Altuntaş, 2024). Bu veriler, LC³ gibi düşük klinkerli çimento tasarımlarında Türkiye'nin önemli bir hammadde potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir.

LC³ sistemlerinde işlenebilirliğin sağlanması açısından süperakışkanlaştırıcı kullanımı da kritik öneme sahiptir. Metakaolinin yüksek özgül yüzey alanı su talebini artırmaktadır. Kaolinit içeriğinin artması işlenebilirliği azaltmakta ve kireçtaşı tozunun filler etkisi bu durumu kısmen dengelemekle birlikte çoğu durumda yeterli olmamaktadır. Bu nedenle LC³-50 karışımlarında süperakışkanlaştırıcı kullanımı yaygın ve neredeyse standart bir uygulama halindedir (Krishnan ve Bishnoi, 2020).

LC³ sistemlerinde klorür ve sülfat dayanıklılığının, geleneksel Portland çimentosuna göre daha iyi derecede olduğu rapor edilmektedir. Mikro gözenek hacminin azalması, karboalüminat fazlarının klorürü bağlama kapasitesi ve C-A-S-H jelinin daha yoğun olması bu dayanıklılık artışının temel nedenleri arasındadır. Özellikle Scrivener ve diğ., (2018), yaklaşık %40-%50 kaolinit içeren killere sahip LC³ sistemlerinde klorür geçirimsizliğinin önemli ölçüde azaldığını belirtmiştir. Bu nedenle LC³ çimentoları deniz yapıları, köprü altyapıları ve klorür saldırısına açık yapı elemanları için uygun bir bağlayıcı alternatifi olarak değerlendirilmektedir. Öte yandan, enerji tüketimi ve çevresel etki karşılaştırmalarında LC³ çimentosunun, Portland çimentosuna göre belirgin avantajlar sunduğu görülmektedir. Kireçtaşı tozu, kilin öğütülmesi ve kilin düşük sıcaklıklarda kalsine edilmesi sayesinde enerji tüketimi azalmakta, klinker miktarının %50 seviyesine düşmesi ise toplamda CO₂ emisyonunu önemli ölçüde azaltmaktadır.

Sülfat optimizasyonu, LC³ sistemlerinde hem hidratasyon dengesi hem de mekanik özellikler açısından kritik bir öneme sahiptir. LC³ karışımlarında sülfat iyonlarının erken tüketimi mekanik özellikleri düşürebildiği için ek alçıtaşı kullanımının gerekli olduğu belirtilmektedir (Hay ve diğ., 2022; Sharma ve diğ., 2021; Zunino ve Scrivener, 2019; Zunino, 2020). Eklenen sülfat miktarı, alüminat piki konumunu, karboalüminat oluşum hızını, etrenjit dengesini, dayanım gelişimini ve çatlak oluşum riskini doğrudan etkilemektedir. Çok düşük sülfat içeriği erken yaş dayanım gelişiminde eksikliğe, aşırı sülfat ise gecikmiş etrenjit oluşumu riskine yol açabilmektedir. Bu nedenle optimum sülfat seviyesi LC³ tasarımının ana noktalardan biri olarak kabul edilmektedir.

Endüstriyel üretim uygulamaları ve sahadan elde edilen geri bildirimlerde, LC³ çimentosunun laboratuvar ölçeğinden gerçek ölçekli üretimlere kadar başarıyla aktarıldığı görülmektedir. Hindistan'da yapılan pilot üretimlerde %50 klinker, %30 kalsine kil, %15 kireçtaşı tozu ve %5 alçıtaşı kullanılarak yüksek performanslı LC³ karışımları elde edilmiştir. Bu üretimlerde ekipman değişikliğinin gerekmediği, çalışanların yeniden eğitilmesine ihtiyaç duyulmadığı ve geleneksel PÇ ile aynı işlemlerle LC³ üretiminin mümkün olduğu rapor edilmiştir (Zhao ve Zhang, 2023). Bu bulgular LC³'ün endüstriyel açıdan uygulanabilirliğini ve hızlı adaptasyon potansiyelini güçlendiren önemli hususlar arasında yer almaktadır.

Ekonomik ve çevresel değerlendirmelerde Berriel ve diğ., (2016) tarafından yapılan kapsamlı analizde PÇ, PPÇ (Portland puzolan çimentosu) ve LC³ üç farklı senaryo altında karşılaştırılmıştır. LC³'ün enerji tüketimi açısından PÇ'den daha düşük değerlere sahip olduğu, çevresel etki (CO₂ eşdeğeri) bakımından LC³ sistemlerinde önemli ölçüde azalma sağlandığı ve hammaddelerin bol ve düşük maliyetli olmasına bağlı olarak üretim maliyetleri açısından da avantajlı olduğu belirlenmiştir. Sánchez ve diğ., (2020) ise analizlerinde LC³'ün cüruf çimentolarına kıyasla daha geniş coğrafi uygulanabilirliğe sahip olduğunu, hammadde kıtlığından daha az etkilendiğini ve küresel üretim için daha esnek bir çözüm sunduğunu belirtmişlerdir.

Bu kapsamlı literatür değerlendirmesiyle kalsine kil ve kireçtaşı tozu esaslı bağlayıcı sistemler olan LC³ çimentolarının kimyasal davranışı, hidratasyon mekanizması, dayanım gelişimi, mikro yapısal özellikleri ve sürdürülebilirlik potansiyeli incelenmiştir. İncelenen tezler ve makaleler kapsamındaki deneysel çalışmalar LC³ çimentosunun hem çevresel hem de mekanik performans açısından geleneksel PÇ'ye

güçlü bir alternatif sunduğunu göstermektedir. Literatür özetlenirse, öncelikle PÇ üretim süreçlerinin yüksek enerji tüketimi ve CO₂ emisyonu yarattığı vurgulanmaktadır ve özellikle klinker üretimindeki kireçtaşı ayrışmasının toplam emisyonların yaklaşık yarısını oluşturduğu belirtilmektedir (Moropoulou ve diğ., 2001). Bu nedenle sürdürülebilir bağlayıcı sistemlerinin geliştirilmesi çimento endüstrisinin öncelikleri arasına girmiştir. TBM'lerin bu noktada kritik bir rol üstlendiği, puzolanik reaksiyonların CH tüketerek ilave C-S-H oluşturduğu ve böylece dayanımı artırdığı ifade edilmektedir (He ve diğ., 1995). Killerin mineralojik özelliklerinin bu süreçte belirleyici olduğu vurgulanmaktadır. Ayrıca kaolinit içeriği yüksek killerin kalsinasyon sonrası amorf metakaoline dönüşerek LC³ sistemlerinde yüksek reaktivite sağladığı, optimum kaolinit oranının ise %40–50 aralığında olduğu belirtilmiştir (Scrivener ve diğ., 2018). İllit ve smektit türü killerin daha sınırlı reaktivite göstermesi nedeniyle LC³ tasarımlarında kaolinit ağırlıklı killerin tercih edildiği vurgulanmaktadır. Sonuç olarak literatür, LC³ çimentosunu karbon emisyonu düşürülmüş, yüksek mekanik performansa ve dayanıklılığa sahip, hammadde açısından geniş uygulanabilirlik potansiyeli olan, ekonomik ve endüstriyel olarak erişilebilir bir çimento sistemi olarak değerlendirmektedir. Kaynak araştırmaları, LC³ bağlayıcılarının çevresel ve mekanik açıdan önemli bir alternatif oluşturduğunu göstermektedir. Bu kapsamda tez, ülkemizde yaygın olarak bulunan düşük kaliteli killerin LC³ bağlayıcı sistemlerinde kullanılabilirliğini araştırmayı amaçlamaktadır. Tez çalışması ile çok düşük klinker içerikli LC³ esaslı kâgir harçların TS EN 998-2 (Anonim, 2017) kapsamında taze ve sertleşmiş özellikleri incelenmiştir. Böylece kaynak araştırmaları sonucu özetlenen bulgularla uyumlu, ulusal hammadde rezervine dayalı, sürdürülebilir genel ve ince katmanlı kâgir harç alternatifi geliştirilmesi hedeflenmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Malzemeler

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar için LC^3 karışımlarında kullanılmak üzere, Konya’da bulunan Konya Çimento A.Ş.’den temin edilen CEM I 42,5R sınıfı Portland çimentosu (PÇ) tercih edilmiştir. Bu çimentonun özgül ağırlığı 3,06 olup Blaine özgül yüzeyi $325 \text{ m}^2/\text{kg}$ ’dır. Çizelge 3.1’de çimentoya ait kimyasal bileşenler sunulmuştur. Çizelge 3.1’de ayrıca bu tez kapsamında kullanılan iki tip düşük kaliteli kil (DKK), DKK-1 ve DKK-2 olarak isimlendirilmiş olup X-Işını Floresans Analizi (XRF) testleri sonucu elde edilen kimyasal kompozisyonları verilmiştir. Ayrıca DKK-1 ve DKK-2 killerine ait mineralojik veriler X-Işını Kırınımı Yöntemi (XRD) ile elde edilmiş olup Çizelge 3.2’de sunulmuştur.

Bu çalışmada hazırlanan kagir harç numunelerinde, karışım içinde en yüksek oranda yer alan bileşen ince agregalardır. Harç bileşiminde yüksek oranda paya sahip olması sebebiyle, kullanılan kumun dayanım, işlenebilirlik ve benzeri performans özellikleri üzerinde belirleyici bir etkisi bulunmaktadır. Bu doğrultuda, tezde üretilen ince katmanlı ve genel kâgir harçlar için piyasada yaygın şekilde kullanılan standart harç kumu tercih edilmiş olup aynı tip ve oranlarda referans harç karışımlarında da kullanılmıştır. Kullanılan kumun tane dağılımı Çizelge 3.3’de detaylı olarak verilmiştir.

LC^3 kagir harçlar bileşiminde, kalsine kilin ardından matris içinde en yüksek oranda bulunan ikame bağlayıcı malzeme kalker taşıdır. Kullanılan kireçtaşı tozunun temel kimyasal yapısı $\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ formundadır. Çalışmada kullanılan mikronize kireçtaşı tozu, Ankara Gölbaşı’nda faaliyet gösteren Ankara Alçı A.Ş.’den temin edilmiştir. LC^3 kagir harç karışımlarında yer alan bir diğer bileşen ise alçıtaşı tozudur. Bu malzeme karışımında priz süresini düzenleyicisi olarak kullanılmaktadır. Kullanılan alçı, aynı firmaya ait tesislerden mikronize halde sağlanmış olup kimyasal bileşimi $\text{CaSO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ’dur. Genel amaçlı ve ince katmanlı kagir harçların hazırlanmasında, Konya Teknik Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarı’nda bulunan şebeke suyu karışım suyu olarak kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan kil örnekleri, tez kapsamındaki düşük kaliteli killeri (DKK) tanımına karşılık gelmesi sebebiyle İstanbul Şile’de bulunan bir maden sahasından temin edilmiştir. Düşük kaliteli kil tanımı tez kapsamında açık olarak tanımlanmış olup herhangi bir zenginleştirme, arıtma veya eleme işlemine tabi tutulmamış, selektif madencilik yöntemleriyle ayrıştırılmamış ve maliyet açısından da dökme klinker maliyetinin altında birim fiyata sahip olması anlamına gelmektedir. Harçlarda kullanılan tüm PÇ ikame bileşenleri ve PÇ uygun ve standart halde bir bağlayıcı formunda olması amacıyla ASTM E-11 (Anonymous, 2024) standardına uygun şekilde 200 numaralı (75 µm açıklıklı) elekten geçecek incelikte öğütülüp elenmiştir. PÇ, ince agrega, kireçtaşı tozu, alçıtaşı tozu, DKK-1, DKK-2 killeriine ait görüntüler Şekil 3.1 (a-f)’de sunulmuştur.

Çizelge 3.1 CEM I 42,5 R Tipi Portland çimentosunun kimyasal kompozisyonu

Bileşen	PÇ	DKK-1	DKK-2
SiO ₂	20,77	57,66	68,8
Al ₂ O ₃	5,55	26,88	19,41
Fe ₂ O ₃	3,35	8,58	6,91
MgO	2,49	0,81	0,46
CaO	61,43	0,4	0,28
Na ₂ O	0,19	-	-
K ₂ O	0,77	2,91	2,18
TiO ₂	-	1,1	1,23
P ₂ O ₅	-	0,1	-
SO ₃	-	0,25	-
Kızdırma Kaybı	2,2	-	-

Çizelge 3.2. DKK-1 ve DKK-2 killeriine ait XRD analizi sonuçları

Mineral	Kil Tipi	
	DKK-1	DKK-2
Kuvars	22,40	49,8
Kaolinit	46,8	40,7
Mika	-	3,70
Ferrosilit	-	5,60
Hematit	-	-
Muskovit	18,30	-
Klinoklor	12,10	-

Çizelge 3.3. Agrega granülometrisi

Genel amaçlı kagir harç	Elek Boyutları (mm)	4	2	1	0,6	0,3	0,15	0,075
	Kümülatif Elekte Kalan (%)	0	40	67	79	86	92	95
İnce katmanlı kagir harç	Elek Boyutları (mm)	4	2	1	0,6	0,3	0,15	0,075
	Kümülatif Elekte Kalan (%)	0	0	46	65	78	87	92

Bu tez kapsamında kagir harçların üretiminde kullanılan kimyasal toz katkı, modifiye polikarboksilat esaslı bir polimer bileşiminden oluşmaktadır. Katkı, beyaz ile sarımsı tonlar arasında değişen renkte, ince toz formunda olup, uygulama ve dozaj açısından homojen karışmaya elverişli bir fiziksel görünüme sahiptir. Kimyasal özellikler açısından katkının nem oranı %5'in altında olup, bu durum depo ve kullanım koşullarında stabilitesini desteklemektedir. 50 g/L derişimli sulu çözeltide pH değeri 4 ± 1 aralığında ölçülmüştür ve katkının bir miktar asidik karakterde olduğunu göstermektedir. Kimyasal katkının yoğunluğu $0,7 \pm 0,1$ g/mL olup bu özellik karışım tasarım hesaplamalarında dikkate alınmıştır. Sözü edilen katkı 40 g/L'nin üzerindeki konsantrasyonlarda suda tamamen çözünmemekte ve bu da harç sistemine homojen dağılmasını ve etkin bir polimerik etkileşim sağlamasını mümkün kılmaktadır. Katkının iyonik yükü non-iyonik olup diğer malzemelerle uyumlu çalışabildiği üretici beyanına göre belirtilmiştir. Bu özellik daha çok farklı kimyasal katkıların birlikte kullanıldığı sistemlerde etkileşim riskini azaltmaktadır. Bu nedenle geliştirilen LC³ esaslı kâgir harçlar farklı katkılarla farklı amaçlarla tekrar edilebilir niteliktedir.



(a) PC



(b) Standart kum



(c) Kireçtaşı tozu



(d) Alçıtaşı tozu



(e) (DKK-1)



(f) (DKK-2)

Şekil 3.1. Deneyisel çalışmalar kapsamında kullanılan malzemeler

3.2. Yöntem

Bu bölümde, LC³ katkılı kâgir harçların üretiminde kullanılan malzemelerin hazırlanması ve hazırlanan harçların performansını değerlendirmek amacıyla yapılan deneysel çalışmalar ve analitik testler detaylı olarak sunulmuştur.

3.2.1. Killerin Öğütme ve Kalsinasyonu

Bu çalışmada LC³ katkılı kâgir harçların hazırlanmasında çimento dışındaki tüm bağlayıcı bileşenler, kaynaklarından işlenmemiş halde temin edilmiştir ve kâgir harçlar için hazırlanmıştır. İlk olarak, hibrit öğütme sürecinin gerçekleştirilebilmesi için malzemelerin öğütme besleme sırası ile bekleme süreleri belirlenmiştir. Çimento ikame malzemelerinin öğütülmesinde, Liya marka bond tipi bilyalı değirmen kullanılmıştır ve Şekil 3.2 (a)'da verilmiştir. Bu cihaz hem yaş hem de kuru öğütmeye uygun şekilde tasarlanmış olup 22 L kapasiteli silindirik bir hazneye sahiptir. Maksimum çalışma hızı 70 devir/dakika olmakla birlikte araştırmada uygun bir kuru harman karışım elde etmek için çalışma hızı 40 devir/dakika seviyesinde tutulmuştur. Bu durumda cihaz her bir karışım üretimi sonunda yaklaşık 1,5 A – 225 V enerji tüketmiştir. Öğütme işleminde değirmenle birlikte farklı çaplarda bilyalar (38,1 mm: 43 adet; 31,75 mm: 67 adet; 25,40 mm: 10 adet; 19,05 mm: 71 adet; 15,87 mm: 94 adet) kullanılmıştır (Şekil 3.2 (b)). Bilyaların tümü hazneye yerleştirilmiş olup malzemenin sertliğine bağlı değişmekle birlikte daha kısa sürede hedeflenen inceliğe (<150 µm) ulaşılması amaçlanmıştır. Öğütme işlemlerine başlamadan önce, maden sahasından ham halde getirilen killerin değirmen yüzeyine yapışmasını önlemek için numuneler 24 saat boyunca 104 °C'de etüvde kurutulmuştur. Böylece malzemedeki bulunan serbest suyun öğütme süresini etkilemesi engellenmiştir. Ön araştırmalar sonucu her malzeme bireysel olarak 150 µm

göz açıklığına sahip elekten tamamen geçene kadar öğütülmüştür. Öğütme sırasında dakika başı işlem durdurularak incelik kontrolü yapılmıştır ve malzemenin tamamı elekten geçtiğinde deney sonlandırılmış olup öğütme süreleri kaydedilmiştir. Ardından bütün hammaddeler bireysel olarak belirlenen öğütme sürelerine göre besleme yoluyla sırasıyla öğütme cihazına eklenerek hibrit bir öğütme sistemi takip edilmiştir.

Killerin doğal halleriyle puzolanik özellik göstermedikleri ancak belirli sıcaklıklarda uygulanan ısı işlem sonucunda puzolanik karakter kazandıkları bilinmektedir. Tez kapsamında yapılan ön denemeler neticesinde tüm killer için uygun kalsinasyon sıcaklığı 650 °C olarak belirlenmiştir. Kalsinasyon işleminden önce, daha önce belirtildiği gibi, her bir kil (DKK-1 ve DKK-2) 24 saat boyunca 104 °C’de kurutulmuştur. Ardından bond tipi değirmende belirlenen inceliğe gelmesi için belirli sürelerde ön öğütme gerçekleştirilmiştir. Bu işlemin ardından killerin yeterli bir amorf forma dönüştürülmesi için laboratuvar tipi kül fırını kullanılmıştır (Şekil 3.2 (c)). Bu cihaz 10 L hacme sahip olup 1100 °C’ye kadar çıkabilen kontrollü sıcaklık artışına sahip (± 2 °C hassasiyette) bir fırındır. Fırına yerleştirilen üç yüksek ısıya dayanıklı özel kaplar ile tek bir işlemde yaklaşık 1 kg kalsine kil elde edilebilmektedir (Şekil 3.2 (d)). Fırın, oda sıcaklığından 650 °C’ye yaklaşık 30 dakika içinde çalıştırılmıştır. Kalsinasyon tamamlandıktan sonra malzeme kapak açık şekilde yaklaşık 8 saatte oda sıcaklığına inmiş ve bu süreçten sonra işleme alınmıştır. Kalsine edilen DKK-1 ve DKK-2 killer herhangi bir sinterleşme riskine karşı tekrar 0.15 mm göz açıklığına sahip elekten elenmiş halde kullanılmıştır.



(a) Bond tipi değirmen



(b) Malzemelerin öğütülmesi



(c) Kül tipi fırın



(d) DKK-1 ve DKK-2 killerin kalsinasyon işlemleri

Şekil 3.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan ekipmanlar ve malzemeler

3.2.2. LC³ Katkılı Kagir Harçların Üretilmesi

Bu tez çalışmasında, hem genel amaçlı (0–4 mm) hem de ince tabakalı (0–2 mm) kâgir harçlarda Portland çimentosu esaslı ticari referans karışımlar ile LC³ bağlayıcı sistemleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın temel amacı, mevcut referans ticari karışımlardaki daha yüksek Portland çimentosu (PÇ) oranını azaltarak, bunun yerine daha düşük klinker içeren ve çevresel etkisi azaltılmış LC³ harçlarının benzer veya daha iyileştirilmiş taze ve sertleşmiş özellikler gösterebileceğini ortaya koymaktır. Bu doğrultuda oluşturulan bağlayıcı sistemlerine göre referans genel amaçlı hazır sıva harcı bileşenleri %40 PÇ ve %60 kalker tozu içeren iki bileşenli bir sisteme oluşturulmuştur (Çizelge 3.4). Tasarlanan genel amaçlı LC³ kagir harç bağlayıcılarında ise PÇ oranı %10'a kadar düşürülmüş olup kalan bileşenler ise kalsine kil (DKK-1 veya DKK-2), kalker tozu ve alçıtaşı bileşenleriyle dengelenmiştir. Bu kapsamda LC³ bağlayıcılarında tipik olarak %10 PÇ, %29 kalker tozu, %3 alçıtaşı ve geri kalan %58'in kalsine kil olarak belirlenmesi LC³ üzerine elde edilen bilgi birikimi ile uyumlu (2 birim kil, 1 birim kalkertaşı tozu) ve düşük klinkerli bağlayıcı tasarımı sunmaktadır.

İnce katmanlı harçlarda ticari referans karışımı temsil eden bağlayıcı sistemi daha yüksek çimento içermektedir. Hazır sıva harcı olarak temin edilen referans ince katmanlı harç içerisinde bağlayıcı dağılımı sırasıyla %62,5 PÇ, %12,5 kireç ve %25 kalsit şeklindedir (Çizelge 3.4). Bu karışım oranları halihazırda ticari ince tabakalı karışımların karakteristik bağlayıcı dağılımını yansıtmaktadır. Buna karşın LC³ ince katmanlı harçlarda %10 PÇ, %29 kalker, %3 alçı ve %58 kalsine kil olarak genel amaçlı harçlardaki gibi düşük PÇ muhtevasıyla üretilmiştir.

Tüm karışımlar için su/bağlayıcı oranı 0,50 olarak sabit tutulmuştur. Kum/bağlayıcı oranları belirlenirken ise mevcut uygulamalar ve genel amaçlı harç türleri dikkate alınmıştır. Saha uygulamalarını temsil etmesi amacıyla, sadece referans genel amaçlı harçta kum/bağlayıcı oranı 7,5 olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, referans ince tabakalı harç ve üretilen tüm LC³ katkılı harçlarda (genel ve ince amaçlı) bu oran 4 olarak seçilmiştir. Kimyasal katkı yaklaşımı harç türlerine göre farklı olması referans olarak seçilen karışımların hazır sıva harçları olmasıdır. Ticari ince tabakalı referans harcın karakterine uygun olarak bağlayıcı bileşende %0,5 redispersible polimer tozu (RDP) ve %0,2 selüloz eter tipi kıvam düzenleyici bulunmaktadır. RDP, yapışma dayanımı ve ince tabaka uygulamalarındaki esneklik üzerine etkili olmakla birlikte LC³ kagir harçlarda kullanılan toz süperakışkanlaştırıcı (SP) katkılara kıyasla oldukça pahalı bir polimerdir. Bu nedenle, LC³ ince harçlarında çevresel ve ekonomik sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda RDP kullanılmamış yalnızca referans ince katmanlı kagir harçlarda ticari ürün karakteristiğini yansıtmak amacıyla yer verilmiştir (Çizelge 3.5.) Genel amaçlı harçların tamamında ise kimyasal katkı olarak toz süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Tercih edilen karışım parametreleri ile referans ticari hazır sıvalarda daha yüksek olan PÇ bileşeni LC³ kagir harçlarda düşük PÇ içeren karışımlarla, kalsine kil ve kireçtaşı tozu ile birlikte sistematik bir karşılaştırmaya olanak sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Böylece hem ince katmanlı hem de genel amaçlı kâgir harçlarda, kalsine killer yüksek miktarlarda kullanılarak daha düşük karbon ayak izine sahip LC³ kagir bağlayıcı sistemlerin geliştirilmesi ve bu sistemlerin performansının standartlara uygun olarak (EN 998-2: Genel amaçlı kagir harç ve EN 998-2: İnce katmanlı kagir harç) değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Farklı mineralojik özelliklere sahip kalsine killerin su ihtiyacı ve reolojik davranışları birbirinden farklı olduğundan, işlenebilirliği en düşük karışım (LC³/DKK-1/İnce) üzerinden toz süperakışkanlaştırıcı miktarına karar verilmiş olup toz süperakışkanlaştırıcı bu karışım üzerinden diğer bütün karışımlarda sabit tutulmuştur. Yapılan yayılma tablası deneylerinde en elverişsiz karışım için (LC³/DKK-1/İnce) en az 12 cm yayılma çapı hedeflenmiş ve ön deneyler sonucunda LC³ ve referans harçların tamamında kullanılmak üzere toz süperakışkanlaştırıcı katkı oranı bağlayıcı ağırlığının %2,5'i olarak sabitlenmiştir (Çizelge 3.5). Ancak karışımlarda sadece genel amaçlı referans hazır sıva harcı ince tane yapısına sahip yoğun miktarda kalkertaşı tozu miktarı içerdiğinden bağlayıcı ağırlığınca %6,5 toz süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Böylece kil türü dışındaki bileşen oranları ve su/bağlayıcı miktarı sabit tutularak (Çizelge 3.5) LC³

genel amaçlı ve ince katmanlı kagir harç performansları, referans hazır sıva genel amaçlı ve ince katmanlı kagir harç karışımları ile karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur.

Çizelge 3.4. Genel amaçlı ve ince katmanlı kagir harçların bağlayıcı oranları

Karışımlar	Bağlayıcı oranları (ağırlıkça, %)					
	PÇ	Kalkertaşı tozu	Alçıtaşı tozu	DKK-1	DKK-2	Kireç
Ref/Genel	40	60	-	-	-	
LC ³ /DKK-1/Genel	10	29	3	58	-	
LC ³ /DKK-2/Genel	10	29	3	-	58	
Ref/İnce	62,5	25	-	-	-	12,5
LC ³ /DKK-1/İnce	10	29	3	58	-	
LC ³ /DKK-2/İnce	10	29	3	-	58	

Çizelge 3.5. Genel amaçlı ve ince katmanlı kagir harçların karışım parametreleri

Karışımlar	Karışım oranları			
	su/bağlayıcı oranı	Kimyasal katkılar		
		Toz akışkanlaştırıcı katkı (ağırlıkça, %)	Kıvam düzenleyici (selüloz eter, ağırlıkça, %)	RDP (redispersible polimer tozu ağırlıkça, %)
Ref/Genel	0,5	6,5	-	-
LC ³ /DKK-1/Genel	0,5	2,5	-	-
LC ³ /DKK-2/Genel	0,5	2,5	-	-
Ref/İnce	0,5	-	0,2	0,5
LC ³ /DKK-1/İnce	0,5	2,5	-	-
LC ³ /DKK-2/İnce	0,5	2,5	-	-

3.2.3 Kagir Harçların Taze Özelliklerinin Belirlenmesi

LC³ karışımları ile tasarlanan kâgir harçların, sertleşmiş haldeki dayanım ve dayanıklılık performansları kadar taze haldeki performansları da uygulamanın kalitesi açısından belirleyici bir role sahiptir. Özellikle kagir harç karışımlarında yer alan kalsine kilin yüksek su emme kapasitesi ve ince taneli yapısı geleneksel harçlara kıyasla karışımın reolojisini ve kimyasal gelişimini etkilemektedir. Bu bağlamda, üretilen harçların şantiye koşullarında ne kadar süreyle plastik kıvamını koruyarak uygulanabileceği, çevresel etkiler açısından dayanıklı olması, kagir birim üzerindeki sürülme kolaylığı gibi konularda oldukça önemli olmaktadır. Hazırlanan karışımların karakteristik özelliklerini ve standartlara uygunluğunu doğrulamak amacıyla bu bölüm altında harcın işlenebilirlik süre tayini, durabilite göstergesi olan hava muhtevası ve kimyasal uygunluk açısından klorür içeriği analizleri sırasıyla detaylandırılmıştır.

3.2.3.1. Taze Harç Kıvamının (Yayılma) Tayini

Üretilen LC³ ve referans kagir harçların su ihtiyacını, plastik kıvamını ve işlenebilirlik özelliklerini karakterize etmek amacıyla, TS EN 1015-3(Anonim, 2006) standardı belirtilen uyarınca yayılma tablası yöntemi uygulanmıştır. Bu deney standardı taze harcın belirli bir mekanik enerji altında (sarsılma ile) serbestçe yayılma kabiliyetini ölçerek kıvam sınıfını belirlemektedir. Deney düzeneği, standartta belirtilen boyutlara sahip, sert bir yüzeye monte edilmiş, merkezinden düşey hareket edebilen dairesel bir metal tabla ve kesik koni şeklindeki pirinç kalıptan oluşmaktadır. Deney prosedürü kapsamında, hazırlanan taze harç numunesi, tabla üzerine yerleştirilen kalıp içerisine iki aşamada doldurulmuş ve her katmanda tokmaktama işlemi uygulanarak sıkıştırılmıştır. Kalıp üst yüzeyi düzeltildikten sonra, kalıp düşey doğrultuda yavaşça yukarı çekilerek harcın tabla üzerinde serbest kalması sağlanmıştır. Takip eden aşamada, yayılma tablası cihazı çalıştırılarak tablanın 10 mm yükseklikten saniyede bir vuruş olacak şekilde 15 kez düşmesi sağlanmıştır. Sarsma işleminin tamamlanmasının ardından, harç kütlesinin tabla üzerinde yayıldığı çap, birbirine dik iki doğrultuda cetvel yardımıyla ölçülmüş ve bu değerlerin aritmetik ortalaması yayılma değeri cm olarak kaydedilmiştir (Şekil 3.4). Tez çalışması kapsamında, tüm karışımlarda su/bağlayıcı oranının sabit olmasıyla kagir harç bağlayıcı türünün harcın reolojisi üzerindeki etkisini doğrudan gözlemlemek mümkün olmuştur.



Şekil 3.4. Yayılma Tablası Deney Aleti

3.2.3.2 İşlenebilirlik Süresinin Tayin Testleri

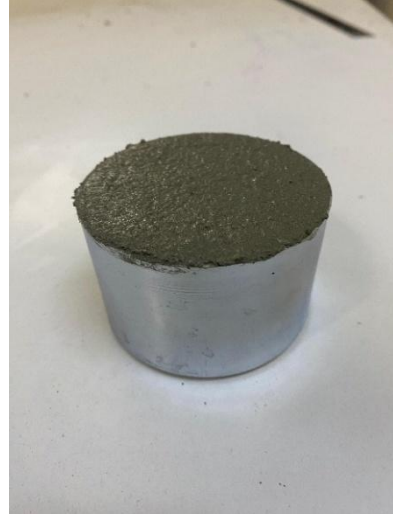
LC³ ve referans kagir harç grubu numunelerinin karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra plastik kıvamını ne kadar süre koruduğunu ve uygulama özelliklerini yitirmeden ne kadar süre işlenebilir kaldığını belirlemek amacıyla TS EN 1015-9 (Metot A) (Anonim, 2000) standardı esas alınmıştır. Bu yöntem, taze harcın zamanla sertleşerek belirli bir penetrasyon direncine ulaşması için geçen sürenin ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. Deney düzeneği olarak işlenebilirlik deney aleti (Şekil 3.5. (a)) ile harcın direncini ölçmek üzere tasarlanmış özel bir daldırma aparatı kullanılmıştır. Düzeneğin penetrasyon ucu, standartta belirtilen geometrik ölçülere göre kullanılmıştır. Bu kapsamda yaklaşık 65 mm toplam uzunluk, uç kısmı 25 mm uzunluğunda ve 6,175 mm çapına sahip pirinç malzemeden imal edilmiş çubuklar kullanılmıştır. Çubuk üzerinde, daldırma derinliğini sınırlandıran ve yüzeye teması sağlayan pirinç bir pul bulunmaktadır.

Deney prosedürü kapsamında, hazırlanan taze harç numuneleri iç çapı minimum 75 mm ve yüksekliği 50-100 mm aralığında olan rijit ve silindirik kalıplara yerleştirilmiştir. Yerleştirme işlemi sırasında numuneler kalıba kademeli olarak doldurulmuş ve boşluk oluşumunu engellemek amacıyla her kademedeki kalıp tabanı hafifçe (4 kez) vurularak sıkıştırma işlemi yapılmıştır (Şekil 3.5 (b)). Yüzeyleri tesviye bıçağı ile düzeltilen kalıplar deney süresince nem kaybını önlemek ve ortam koşullarından etkilenmemek amacıyla, 20±5 °C sıcaklık ve %95 üzeri bağıl nem koşullarını sağlayan hava akımsız bir ortamda (kapalı polietilen poşetler içerisinde) muhafaza edilmiştir (Şekil 3.5 (c)).

Ölçüm aşamasında ise harç dolu kalıp terazi üzerine yerleştirilerek deney aparatlarından tara alınmıştır. Daldırma çubuğu, mekanik bir kol yardımıyla harç yüzeyine dik doğrultuda ve kontrollü bir hızla, çubuk üzerindeki pul harç yüzeyine temas edene kadar bastırılmıştır (Şekil 3.5 (d)). Ölçümler, harcın priz alma hızına bağlı olarak belirli zaman aralıklarıyla, ilgili standart önerisi dikkate alınarak 15 dakika tekrarlanmıştır. Bu esnada terazide okunan maksimum yük değeri kg cinsinden kaydedilmiş ve standartta belirtilen hesaplama yöntemi uyarınca kagir harçlar için en önemli taze hal performans ölçütlerinden biri olan işlenebilirlik süresi tayin edilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.5. İşlenebilirlik süresi tayin cihazı ve deney düzeneği

3.2.3.3. Klorür İçeriği Belirleme Testi

LC³ kagir harçların, harcın kimyasal kararlılığı, uzun süreli dayanımı ile ilişkili yüzey bozulmaları için risk potansiyelini belirlemek amacıyla, taze harç numuneleri üzerinde TS EN 1015-17(Anonim, 2002) standardına uygun olarak suda çözünebilir klorür analizi gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, harç içerisindeki klorür iyonlarının sulu ortamda ekstrakte edilerek gümüş nitrat (AgNO_3) ile çöktürülmesi ve artan gümüş miktarının geri titrasyonla saptanması prensibine dayanan kagir harç performans gerekliliklerinden biridir. Analiz sürecinin ilk aşamasında, taze harç numuneleri temsil edici nitelikte azaltılarak 105 ± 5 °C sıcaklıktaki etüvde sabit ağırlığa getirilene kadar kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kurutulan numuneler kimyasal reaksiyonun tam

gerçekleşebilmesi için önce kaba kırma işlemine tabi tutulmuştur. Kırılan harç numuneleri öğütülerek 0,125 mm göz açıklıklı elekten %100 oranında geçecek inceliğe (analitik teste uygun) getirilmiştir. Kimyasal analiz prosedüründe, hazırlanan toz numuneden 10 gram numune tartılarak polietilen bir kap içerisine alınmıştır. Ardından üzerine 100 mL saf su ilave edilmiştir. Klorür iyonlarının katı halden sıvı hale tam ekstraksiyonunu sağlamak amacıyla karışımlar mekanik karıştırma düzeneğinde 60 dakika boyunca çalkalanmıştır. Çalkalama işleminin ardından, çözülmüş klorür iyonlarını içeren sıvı fazı katı partiküllerden ayırmak amacıyla kaba filtre kâğıdı kullanılarak süzme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6 (a)). Elde edilen süzüntü, nitrik asit (HNO_3) ilavesiyle asidik hale getirildikten sonra kaynatılmış ve üzerine belirli bir hacimde (5 mL) ayarlı 0,1 M gümüş nitrat çözeltisi eklenmiştir. Bu işlemle ortamdaki klorür iyonlarının gümüş klorür (AgCl) halinde çökmesi gerçekleştirilmiştir. (Şekil 3.6 (b)).



(a)



(b)

Şekil 3.6. Klorür içeriği tayini deney aşamaları; a) çözeltinin kaba filtreden süzülmesi, b) asit ilavesi sonrası numunelerin kaynatılması.

Klorür miktarının hesaplanması için geri titrasyon yöntemi uygulanmıştır. Çökeltme işleminden sonra ortamda reaksiyona girmeden kalan artık gümüş nitrat miktarını belirlemek üzere, çözelti oda sıcaklığına soğutulmuş ve indikatör olarak amonyum demir sülfat kullanılmıştır. Çözelti, kalıcı bir kırmızı/kahverengi renk oluşana kadar 0,1 M amonyum tiyosiyanat (NH_4SCN) çözeltisi ile titre edilmiştir. Bu işlemlerde harcanan hacim V_1 olarak kaydedilmiştir. Sistemik hataları elimine etmek amacıyla aynı prosedür, harç numunesi içermeyen saf su ile şahit numune olarak tekrarlanmıştır ve bu işlemdeki sarfiyat da V_2 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, harcanan titrant hacimleri

arasındaki fark üzerinden ($V_2 - V_1$), çözeltinin molaritesi ve numune kütlesi dikkate alınarak, TS EN 1015-17(Anonim, 2002)'de verilen formülasyon uyarınca ağırlıkça yüzde klorür oranı olarak (%) hesaplanmıştır. Her bir karışım tasarımı için analizler tekrarlanarak ortalama değerler kaydedilmiştir.

3.2.3.4. Hava İçeriği Belirlenmesi Testi

LC^3 katkılı kâgir harçların taze haldeki boşluk miktarını karakterize etmek ve donma/çözülme gibi durabilite parametreleri hakkında ön bilgi edinmek amacıyla, hava muhtevası tayini TS EN 1015-7(Anonim, 2000) standardında tanımlanan yöntem esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, kagir harç içerisindeki hava boşluklarının sıvı bir derişim ile yer değiştirmesi prensibine dayanmaktadır. Bu yöntem, özellikle yüksek hava içeriğine sahip olabilecek düşük dayanımlı veya daha spesifik karışım tasarımlarında tercih edilmektedir.

Deneyssel düzenekte, ölçüm aracı olarak 500 mL kapasiteli ve 50 mm çapında dereceli silindir mezür kullanılmıştır. Harcın dispersiyonunu sağlayacak sıvı faz olarak ise hacimce %60 etil alkol ve %40 saf su ihtiva eden homojen bir karışım hazırlanmıştır. Deney prosedürü kapsamında, öncelikle mezür içerisine huni yardımıyla ve yapay hava boşluğu oluşumuna mahal vermeyecek şekilde yaklaşık 200 mL taze harç numunesi yerleştirilmiştir. Silindir tabanı zemine hafifçe vurularak harcın yerleşmesi sağlanmıştır. Ardından yüzey düzgünleştirildikten sonra numunenin başlangıç hacmi kaydedilmiştir. Takip eden aşamada mezürün 500 mL işaret çizgisine ulaşıncaya kadar hazırlanan alkol-su çözeltisi sisteme dikkatlice ilave edilmiştir. Mezürün ağzı sızdırmaz lastik bir tıpa ile kapatıldıktan sonra, harç partiküllerinin sıvı içerisinde tamamen dağılması ve hapsolan havanın açığa çıkması amacıyla silindir 20 kez ters yüz edilerek çalkalanmıştır (Şekil 3.7). Karışım, köpük ve hava kabarcıklarının stabilize olması için 5 dakika boyunca dinlenmeye bırakılmış ve sürenin sonunda sıvının nihai üst seviyesi kaydedilmiştir. Okuma işlemleri ardışık değerler arasındaki fark 1 mL'nin altına düşene kadar sürdürülerek ölçüm hassasiyeti sağlamıştır. Elde edilen hacimsel veriler analiz edilmiş ve her bir numune için hava muhtevası yüzdesel olarak belirlenmiştir. Nihai sonuçlar, aynı karışımdan alınan iki farklı numune üzerinde gerçekleştirilen deneylerin aritmetik ortalaması alınarak ve en yakın %0,5 değerine yuvarlatılarak kaydedilmiştir.



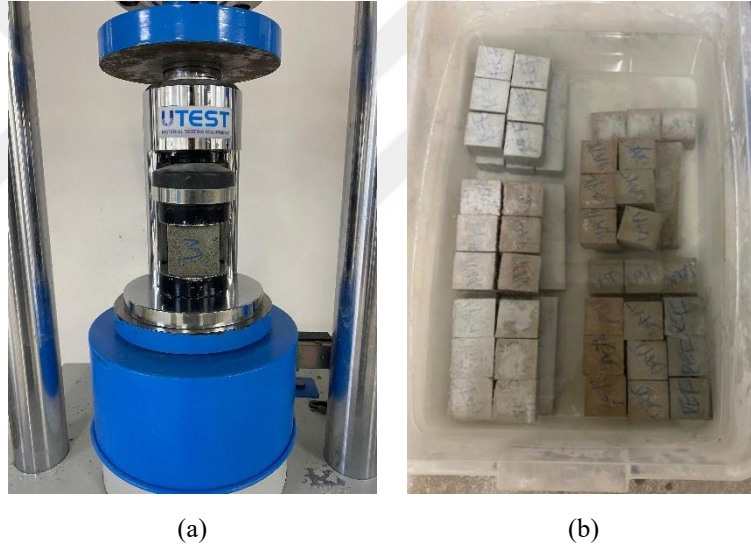
Şekil 3.7. Hava muhtevası tayininde kullanılan mezür düzeneği ve alkol yer değiştirme yöntemi

3.2.4. Kagir Harçların Sertleşmiş Özelliklerinin Belirlenmesi

Kâgir harçların taze haldeki reolojik davranışları pratikteki uygulamalar açısından kritik öneme sahip olsa da yapıların servis ömrü, yük taşıma kapasitesi ve çevresel etkilere karşı dayanıklılığı malzemenin sertleşmiş haldeki performansı ile çok yakından ilişkilidir. Bu tez çalışmasında geliştirilen sürdürülebilir LC³ tabanlı kagir harçların, geleneksel PÇ esaslı kagir harçlara kıyasla mekanik bütünlüğünü ve fiziksel stabilitesini koruyup koruyamadığı araştırılmıştır. Bu bağlamda, üretilen numunelerin standart kür süreçlerini tamamlamasının ardından TS EN 1015’de yer alan sertleşmiş haldeki kagir harçlar için gerekli deneylerin tamamı taze özellikler deney bölümünde olduğu gibi yürütülmüştür. Kagir harçların sertleşmiş özelliklerine dair bu ana başlık altında, malzemenin yük altındaki davranışını ve aderans kabiliyetini ortaya koyan mekanik deneylerden basınç dayanımı, başlangıç kayma ve eğilme bağ dayanımı testleri gerçekleştirilmiştir. Kagir harcın boşluk yapısı ve su ile etkileşimini irdeleyen fiziksel analizlerden yoğunluk testi, su emme ve su buharı geçirgenliği parametreleri de belirlenmiştir. Son olarak yapının konfor ve güvenliğini doğrudan etkileyen fonksiyonel testlerden ısı iletkenlik ve yangına tepki parametreleri de dikkate alınmış ve ilgili standarda (TS EN 1015) göre izlenen yöntemler prosedürler aşağıdaki alt başlıklarda detaylandırılmıştır.

3.2.4.1. Basınç Dayanım Testi

Çalışma kapsamında üretilen LC³ harç numunelerinin basınç dayanımı performansları hidrolik çimento harçlarının basınç dayanımına ilişkin standart uyarınca gerçekleştirilmiştir. 50×50×50 mm boyutlarında dökülen kagir harç küp numuneler (Şekil 3.8 (a)), nem kaybını önlemek amacıyla ilk 24 saat boyunca üzerleri kapalı biçimde kalıplarda muhafaza edilmiştir. Kalıptan çıkarıldıktan sonra numuneler, 3, 7, 28, 60 ve 90. günlerde yapılacak testlere kadar 22±2 °C sıcaklığa sahip standart kür havuzunda bekletilmiştir (Şekil 3.8 (b)). Deney varyasyonunu kontrol altına almak amacıyla her bir karışımdan her bir kür yaşı için üçer adet numune üretilmiştir. İlgili test günü gelen numuneler, UTEST marka cihaz kullanılarak 900 N/s yükleme hızıyla kırılmıştır. Sonuçlar değerlendirilirken her bir karışım ve kür yaşı için test edilen üç numuneden elde edilen yük değerlerinin aritmetik ortalaması dikkate alınmıştır.



Şekil 3.8. Basınç dayanım testi (a), (b) farklı kür yaşlarında LC³ esaslı kagir harçlar

3.2.4.2. Su Emme Parametresi Belirleme

LC³ ve referans kagir harç numunelerinin dış ortamdan veya zemin temasından kaynaklanabilecek nemi kapiler boşluklar yoluyla bünyelerine alma potansiyelini ve hızını belirlemek amacıyla TS EN 1015-18(Anonim, 2004) standardı esas alınmıştır. Deneysel çalışmalarda, 40×40×80 mm boyutlarına sahip olan prizma numuneler kullanılmıştır. Suyun sadece taze kırılma yüzeyinden yani kırık kesit üzerinden tek yönlü olarak emilmesi sağlanmış ve yanal yüzeylerden su girişini engellenmiştir. Bu amaçla

numunelerin dört uzun kenarı su geçirimsiz bir yalıtım malzemesi ile kaplanarak sızdırmaz duruma getirilmiştir. Hazırlanan numuneler, deney öncesinde iç yapıdaki nemin uzaklaştırılması ve standart başlangıç kür koşulunun sağlanması için 60 ± 5 °C sıcaklıktaki etüvde sabit kütleye erişinceye kadar kurutulmuştur. Deney düzeneği için 2 parçaya numuneler ayrılmıştır (Şekil 3.9 (a)). Deney düzeneğinde numuneler, kırık yüzeyleri aşağı bakacak şekilde ve tabana doğrudan temas etmelerini engelleyen mesnetler üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 3.9 (b)). Su seviyesi numune tabanından 5 mm yukarıda olacak şekilde ayarlanmıştır. Kılcal su emme katsayısının hesaplanabilmesi için numunelerin su ile temasından itibaren 10. dakika M_1 ve 90. dakika M_2 sonundaki kütle artışları hassas terazi ile kaydedilmiştir. Her tartım öncesinde numune yüzeyindeki serbest su nemli bir bez yardımıyla uzaklaştırılmıştır. Tartım işlemleri sonrası kagır harç numuneleri zaman kaybetmeden tekrar suya yerleştirilmiştir. Elde edilen kütle değişim verileri ise TS EN 1015-18 (Anonim, 2004) standardına göre belirtilen şekilde hesaplanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.9. Kapiller su emme deneyi düzeneği hazırlığı ve numune yerleşimi

3.2.4.3 Isıl İletkenlik Testi

LC³ kagır harç numunelerinin ısı yalıtım potansiyelini ve enerji verimliliği performansını ortaya koymak amacıyla, ısıl iletkenlik katsayısının (λ) belirlenmesinde TS EN 1745(Anonim, 2020) standardında tanımlanan Metot S1 (Tablo değerlerinden tayin)

yöntemi izlenmiştir. Bu standart, deneysel ölçüm yapılmaksızın, malzemenin mineralojik kökeni ve birim hacim kütlesi (yoğunluk) arasındaki bilinen korelasyona dayanarak ısı değerlerinin türetilmesine olanak tanımaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilen kagir harçlar kil esaslı malzemeler içerdiğinden, karakteristik ısı değerlerinin tespitinde standardın eki olan Ek A'da yer alan Çizelge A.1.2 referans alınmıştır. Prosedür kapsamında, öncelikle harç numunelerinin net kuru yoğunlukları $\rho_{n,kuru}$ ilgili yoğunluk deneyleri bölüm 3.6.7 de tespit edilmiştir. Elde edilen yoğunluk verileri kullanılarak, her bir kagir karışım tasarımı için karşılık gelen ısı iletkenlik katsayısı $\lambda_{10,kuru,mat}$ Çizelge A.1.2'deki veriler arasında doğrusal enterpolasyon yapılarak hesaplanmıştır. Belirlenen bu değerler, malzemenin 10°C referans sıcaklıktaki ve tamamen kuru durumdaki ısı iletkenliğini ifade etmektedir. Analizlerde, bina enerji performansı hesaplamalarında genel kabul gören ve ortalama ısı davranışı temsil eden değerler (P=50%) esas alınmıştır.

3.2.4.4. Başlangıç Kayma Dayanım Testi

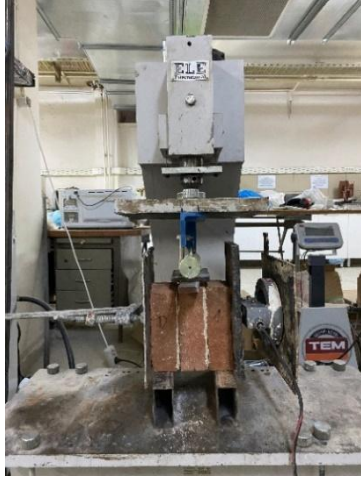
Tez çalışması kapsamında geliştirilen sürdürülebilir LC³ kagir harçların, tuğla veya briket gibi kâgir birimlerle oluşturduğu arayüzey aderansını ve harç yapısının yatay deprem, rüzgâr vb. yüklere karşı göstereceği katkıyı belirlemek amacıyla TS EN 1052-3 (Anonim, 2002) standardı esas alınarak başlangıç kayma dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deney, harç ve kâgir birim arasındaki kesme bağ (shear-bond) davranışını karakterize eden en belirleyici yöntemlerden biridir. Literatürde "Triplet Testi" olarak da adlandırılmaktadır (İstegün ve diğ., 2019). Numunelerin hazırlık aşamasında her bir deney serisi için üç adet kagir birimin ve iki adet harç derzinin birleştirilmesiyle oluşturulan prizmatik elemanlar (triplet numuneler) kullanılmıştır. Numuneler, standartta belirtilen Tip A geometrik düzenlemeleri takip edilerek derz kalınlıkları kontrol altında tutulacak şekilde imal edilmiştir ve test gününe kadar ilgili kür koşullarında muhafaza edilmiştir .

Deneysel yöntem numunelerin sadece saf kayma altındaki davranışını değil, aynı zamanda üzerindeki yapısal yüklerle sürtünme davranışını da analiz etmek üzere kurgulanmıştır. Bu amaçla numuneler, yataklama derzlerine dik doğrultuda etkiyen farklı seviyelerdeki ön basınç gerilmeleri f_{pi} altında kesme yüküne maruz bırakılmıştır. Standart uyarınca, her bir kagir harç tasarımı için numuneler gruplara ayrılmıştır. Düşük, orta ve yüksek olmak üzere ön gerilme yükleri sırasıyla 0.1 N/mm², 0.3 N/mm² ve 0.5 N/mm² olarak üç farklı ön basınç seviyesinde standart uyarınca test edilmiştir. Yükleme

düzeneğinde, numunenin orta bloğuna düşey doğrultuda kesme kuvveti uygulanırken, yan bloklar çelik plakalar ve silindirik mesnetler yardımıyla sabitlenmiştir (Şekil 3.10 (a-b)).

Deney esnasında, uygulanan kesme kuvveti harç ile kagir birim arayüzünde kayma kopması gerçekleşene kadar kontrollü bir hızla gerçekleştirilmiştir. Kagir birimlerin LC³ ve referans kagir harçlarla taşıdığı maksimum yük kaydedilmiştir. Deney sonrasında numunelerde meydana gelen hasar tipleri TS EN 1052-3 EK-A (Anonim, 2002)'ya göre incelenmiştir. Genel olarak numunelerde, harç-birim arayüzeyinde kayma kopması (Tip A) veya kagir birimde yarıлма hasarı (Tip D) gözlemlenmiş olup bu kırılma paternleri detaylandırılmıştır Şekil 3.10 (c-d)).

Elde edilen veriler kullanılarak her bir ön basınç seviyesi için standarda göre kayma dayanımı f_{voi} hesaplanmıştır. Nihai değerlendirmede, Mohr-Coulomb göçme kriteri referans alınmış olup ön basınç gerilmeleri (x-ekseni) ile kayma dayanımları (y-ekseni) arasındaki ilişkiyi ifade eden doğrusal regresyon grafiği oluşturulmuştur. Bu grafiğin düşey eksenini kestiği nokta, harcın başlangıç kayma dayanımını (kohezyon, f_{vo}), doğrunun eğimi ise kagir duvarların karakteristik içsel sürtünme açısını (α) vermektedir. Bu parametreler kullanılarak, geliştirilen LC³ kagir harçların referans mevcut ticari kagir harçlarla yapısal güvenlik ve aderans kabiliyetini açısından sayısal olarak karşılaştırmalı analizi gerçekleştirilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.10. TS EN 1052-3 (Anonim, 2002) başlangıç kayma dayanımı (Triplet) deneyi
a) LC³/DKK-2/İnce kagir birimler, b) REF/İnce kagir birimler c) numunelerde gözlenen kayma kırılması (Tip A), d) kagir birimde oluşan yarıлма hasarı (Tip D).

3.2.4.5. Su Buharı Geçirgenliği Testi

LC³ kagir harçların, yapı fiziği açısından nefes alabilme kabiliyetini işaret eden ve iç ortamdaki nem dengesinin korunmasında kritik rol oynayan su buharı geçirgenlik performansının belirlenmesinde TS EN 1745 (Anonim, 2020) standardı referans alınmıştır. Söz konusu standart, belirli malzeme grupları için maliyetli ve uzun süreli fiziksel deneylere gerek duyulmaksızın, literatürde ve endüstride genel kabul görmüş karakteristik katsayıların kullanılmasına olanak tanımaktadır. Çalışma kapsamında üretilen harçlar kil kökenli bağlayıcılar ve pişmiş toprak esaslı bileşenler içerdiğinden, su buharı difüzyon direnç faktörünün μ tespitinde TS EN 1745 (Anonim, 2020) Ek A bölümünde yer alan Çizelge A.1.2 verileri esas alınmıştır. İlgili standart çizelgesinde, kil esaslı malzemeler için yoğunluk değişiminden bağımsız olarak tanımlanan difüzyon direnç aralığı kuru ve nemli durumlar için ($\mu = 15/35$) referans değer olarak kabul edilmiştir. Bu bağlamda, harçların higrotermal davranışlarının analizinde ve yoğunlaşma riski değerlendirmelerinde deneysel ölçüm yerine standardın öngördüğü bu tablolatırılmış değerler kullanılarak malzemenin su buharına karşı gösterdiği direnç değerlendirilmiştir.

3.2.4.6. Eğilme Bağ Dayanım testi

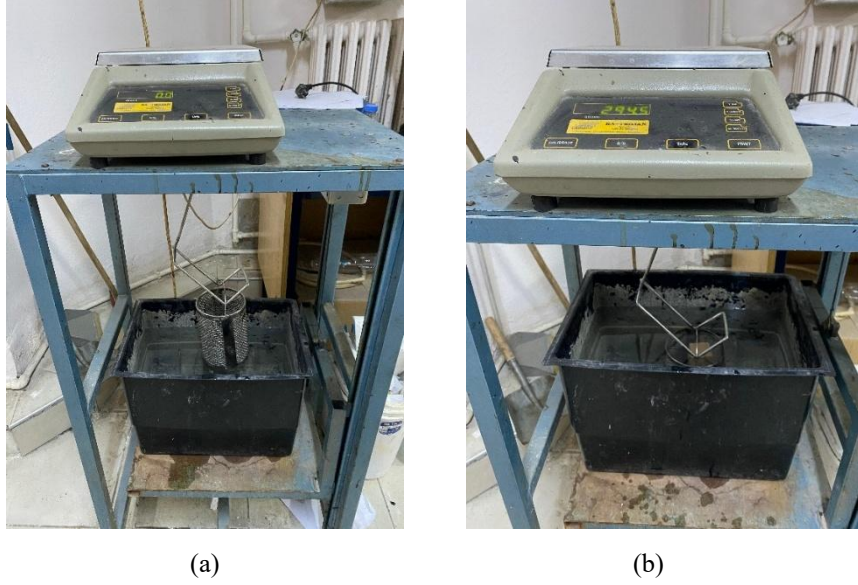
Kâgir yapılarda harç ile kagir birim arasındaki aderans performansı, duvarın yatay yüklere karşı dayanımı açısından kritik bir parametrelerden biridir. Literatürde bu özelliğin doğrudan tayini için "Bond Wrench" yöntemi TS EN 1052-5(Anonim, 2006) kullanılmaktadır. Ancak kagir harcın kendi iç yapısındaki çekme ve eğilme kapasitesinin de aderans potansiyeli ile doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir. Bu çalışma kapsamında, harcın bağ oluşturma kabiliyetini kagir numunelerin dayanımı üzerinden belirlemek amacıyla TS EN 1015-11(Anonim, 2020) standardı referans alınarak eğilme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Numune hazırlık aşamasında, standartta belirtilen 40×40×160 mm boyutlarında çelik kalıplar kullanılarak her karışım serisi için prizmatik harç numuneleri üretilmiştir. Kalıplama işlemi sırasında sıkıştırma ve havasını alma prosedürlerine titizlikle uyulmuş, numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak deney gününe kadar (28 gün) standart su kürü havuzunda 20°C de muhafaza edilmiştir. Sertleşmiş özelliklerin belirlenmesi aşamasında, numuneler üç nokta altında eğilme prensibine göre çalışan test cihazına yerleştirilmiştir. Eğilmede çekme yükleri prizmanın tam orta noktasından numune kırılana kadar sabit ve kontrollü bir hızla uygulanmıştır (Şekil 3.11). Deney sonucunda, harcın eğilmede çekme gerilmeleri altındaki davranışını temsil eden eğilme dayanımı kırılma anındaki maksimum yük ve standart uyarınca mesnet açıklığı kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.11. 3 noktalı eğilmede çekme dayanımı deneyi

3.2.4.7. Yoğunluk Belirleme Deneyi

LC³ karışımları ile üretilen kagir harçların iç yapısal boşluk oranlarını ve fiziksel kararlılığını karakterize etmek amacıyla sertleşmiş kagir numunelerin boşluklu kuru birim hacim kütlesi TS EN 1015-10 (Anonim, 2001) standardında tanımlanan hidrostatik tartım yöntemi dikkate alınarak Arşimet prensibine göre tayin edilmiştir. Bu kapsamda, mekanik dayanım testleri sonucunda elde edilen ve yapısal bütünlüğünü koruyan prizmatik numune parçaları deney numunesi olarak kullanılmıştır. Deney süreci, numunelerin bünyesindeki serbest nemin tamamen uzaklaştırılması amacıyla 70±5 °C sıcaklıkta sabitlenen hava sirkülasyonlu etüvde kurutulmasıyla başlatılmıştır. Standart prosedür gereği numuneler iki saatlik periyotlarla hassas terazide tartılmış ve ardışık olarak iki tartım arasındaki kütle farkının %0,2'nin altına düşmesiyle tanımlanan "sabit kütle" koşulu sağlanana kadar kurutma işlemine devam edilmiştir. Ardından numunenin etüv kurusu kütlesi $m_{s,kuru}$ olarak kaydedilmiştir. Kurutma aşamasını tamamlandıktan sonra, gözenek yapısının su ile tam doygunluğa ulaştırılması hedeflenmiş ve numuneler 20±2 °C sıcaklıktaki su tankına daldırılmıştır. Su içerisinde bekletilen numunelerin kütle artışı belirli aralıklarla kontrol edilmiştir. 15 dakikalık periyotlarda yapılan tartımlarda kütle değişiminin %0,2 sınırının altında kalmasıyla numunelerin tam doygunluğa ulaştığı kabul edilmiştir. Doygun hale gelen numunelerin hacimsel değerleri için numuneler öncelikle özgül ağırlık ölçüm cihazı (Şekil 3.12 (a)) kullanılarak su içerisinde askıda tartılmış ($m_{s,i}$) ve kaldırma kuvveti etkisi altındaki kütleleri belirlenmiştir (Şekil 3.12 (b)). Ardından sudan çıkarılarak yüzeylerindeki serbest su nemli bir bez yardımıyla uzaklaştırılmış ve doygun yüzey kuru kütleleri ($m_{s,doy}$) ölçülmüştür. Elde edilen verilere göre, kagir numunelerin hacmi suyun yoğunluğu (ρ_{su}) ve kaldırma kuvveti prensibi kullanılarak hesaplanmıştır (V_s). En son aşamada etüv kurusu kütlenin bu hacme oranlanması suretiyle her bir kagir harç serisi için boşluklu kuru birim hacim kütlesi kg/m³ cinsinden ve en yakın 10 kg/m³'lik birime yuvarlanarak değerler kaydedilmiştir.



Şekil 3.12. TS EN 1015-10 Sertleşmiş harç yoğunluk tayini; a) Özgül ağırlık ölçüm cihazı ,
b) kagir numunelerin su içinde tartılma işlemleri

3.2.4.8. Yangına Tepki Tespiti

LC³ katkılı kâgir harçların yangın esnasındaki davranışını yanıcılık özelliklerini ve alev yayma potansiyelini sınıflandırmak amacıyla TS EN 998-2(Anonim, 2017) standardında belirtilen değerlendirme kriterleri esas alınmıştır. İlgili standardın normatif hükümlerinde atıfta bulunulan 96/603/EC sayılı ve 2000/605/EC ile değiştirilen formatı uyarınca bünyesinde kütlece veya hacimce (hangisi daha kritik durumdaysa) %1,0 oranından daha az organik madde barındıran mineral esaslı harçların herhangi bir fiziksel yakma deneyine tabi tutulmaksızın doğrudan “Sınıf A1” (hiç yanmaz sınıfta) olarak değerlendirilebileceği hükme bağlanmıştır. Tez çalışması kapsamında tasarlanan harç karışımları incelendiğinde matrisin ana iskeletini oluşturan kalsine kil, kireçtaşı tozu, alçıtaşı tozu, PÇ ve agregaların tamamen inorganik yapıda olduğu bilinmektedir. Karışımda kullanılan tek organik bileşen olan polikarboksilat esaslı toz kimyasal katkının kullanım oranı ise bağlayıcı ağırlığına göre hesaplanmış olup bu oranda toplam harç kütlesi dikkate alındığında (bağlayıcı, agrega ve su dahil) %1,0 sınır değerinin altında kalmaktadır. Bu nedenle geliştirilen tüm LC³ kagir harç numunelerinin yangına tepki sınıfı standartların öngördüğü muafiyet kapsamında test edilmeksizin A1 sınıfı olarak kabul edilmiştir.

4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında ülkemizden temin edilen düşük kaliteli killerin kalsinasyon işlemi ile aktive edilerek sürdürülebilir LC^3 genel amaçlı ve ince katmanlı kagir harç üretiminde kullanılabilirliği kapsamlı bir deneysel programla incelenmiştir. Bu bölümde, Bölüm 3'te detaylandırılan yöntem ve standartlar doğrultusunda üretilen genel amaçlı/ince katmanlı referans ve LC^3 kagir harç numuneleri üzerinde gerçekleştirilen taze ve sertleşmiş haldeki karışımların deneylerine ait bulgular sunulmuştur. Deneysel incelemeler, Taze Harç Kıvamının (Yayılma) Tayini, İşlenebilirlik Süresinin Tayin Testleri, Klorür İçeriği Belirleme Testi, Hava İçeriği Belirlenmesi Testi, Basınç Dayanım Testi, Su Emme Parametresi Belirleme, Isıl İletkenlik Testi, Başlangıç Kayma Dayanım Testi, Su Buharı Geçirgenliği Testi, Eğilme Bağ Dayanım Testi, Yoğunluk Belirleme Deneyi ve Yangına Tepki Tespiti olmak üzere genel amaçlı ve ince katmanlı kagir harç gerekliliklerinin tamamını kapsayan bir yaklaşım içermektedir.

4.1. Taze Harç Özelliklerine Ait Bulgular

4.1.1. Taze Harç Yayılma Değerleri

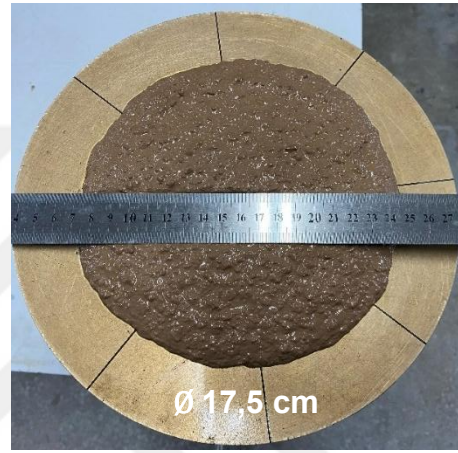
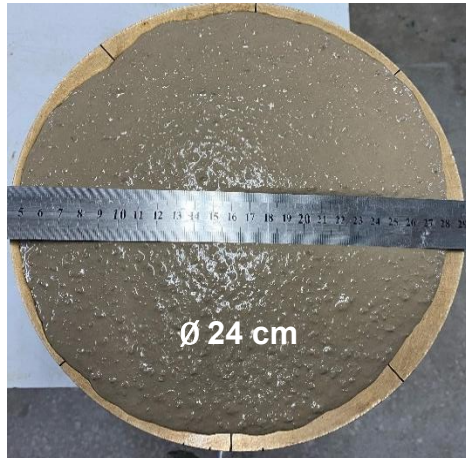
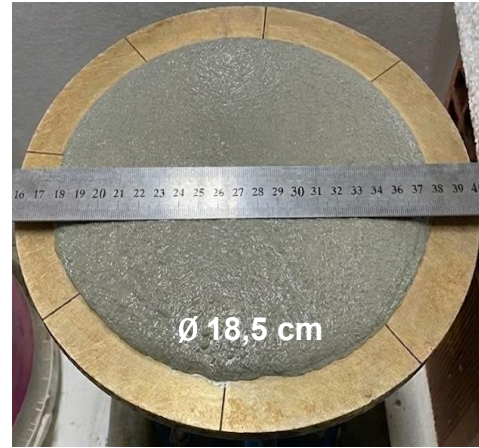
LC^3 esaslı ve referans kagir harçların su ihtiyacını ve işlenebilirlik özelliklerini belirlemek amacıyla deneysel programın ilk aşamasında TS EN 1015-3(Anonim, 2006) standardına uygun olarak yayılma tablası deneyleri gerçekleştirilmiştir. Karışım tasarımında, tüm LC^3 numuneler için sabit su/bağlayıcı oranı ve sabit toz katkı kullanılmış olup LC^3 bağlayıcı türünün kagir harcın akıcılık üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Kaydedilen ortalama yayılma çapları Çizelge 4.1'de sunulmuştur. İlgili standart uyarınca 15 sarsma vuruşu sonrası karışımların yayılma davranışlarına ait görseller Şekil 4.1(a-f)'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. LC³ ve referans genel amaçlı/ince katmanlı kagir harçların yayılma özellikleri

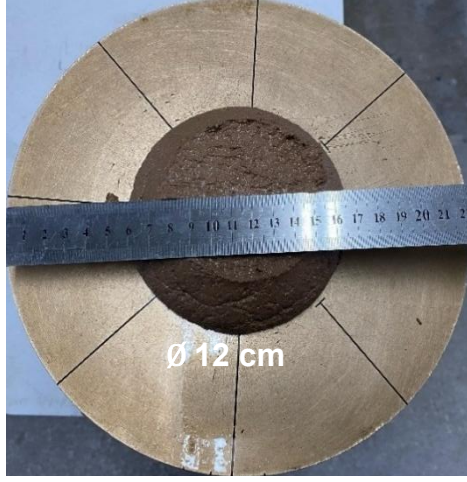
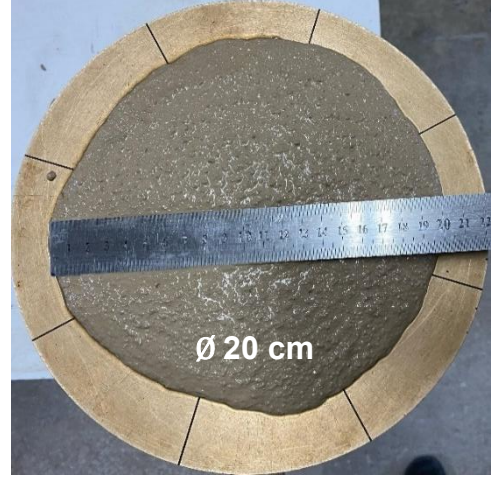
Karışım Kodu	Karışım detayı	Yayılma Çapı (cm)	Yayılma derecesi
Ref/Genel	Geleneksel genel amaçlı sıva (0-4 mm)	14	Plastik
LC ³ /DKK-1/Genel	DKK-1 kili ile LC ³ genel amaçlı sıva (0-4 mm)	17,5	Akıcı
LC ³ /DKK-2/Genel	DKK-2 kili ile LC ³ genel amaçlı sıva (0-4 mm)	24	Çok Akıcı
Ref/İnce	Geleneksel ince katmanlı sıva (0-2 mm)	18,5	Akıcı
LC ³ /DKK-1/İnce	DKK-1 kili ile LC ³ ince katmanlı sıva (0-2 mm)	12	Plastik (Sınırdan)
LC ³ /DKK-2/İnce	DKK-2 kili ile LC ³ ince katmanlı sıva (0-2 mm)	20	Çok Akıcı



Ref/Genel

LC³/DKK-1/GenelLC³/DKK-2/Genel

Ref/İnce

LC³/DKK-1/İnceLC³/DKK-2/İnce**Şekil 4.1.** LC³ ve referans genel amaçlı/ince katmanlı kagir harçların yayılma özellikleri

Elde edilen bulgular, kalsine kil türünün ve genel amaçlı/ince katmanlı kagir harçlardaki farklı agrega granülometrisinin taze harç reolojisi üzerinde belirleyici ve birbirinden farklı etkiler meydana getirdiğini göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde en ilgi çekici bulgulardan biri, DKK-2 kili ile üretilen LC³ kagir harçların hem genel amaçlı hem de ince katmanlı referans harçlardan çok daha yüksek akıcılık değerlerine ulaşmasıdır. Özellikle ince katmanlı referans harca göre RDP veya sülüloz eter gibi oldukça yüksek maliyetli katkıları içermeyen LC³/DKK-2/İnce karışımı ince katmanlı harçlar için oldukça ideal bir yayılma performansı (20 cm) göstermiştir. Öte yandan, LC³/DKK-2/Genel karışımı 24 cm ile en yüksek yayılmayı çapını sağlarken referans karışımına göre (14 cm) oldukça yüksek yayılma çapı göstermektedir. Bu durum LC³/DKK-2/Genel harçlarında %2,5 toz süperakışkanlaştırıcı kullanılmadan dahi LC³ bağlayıcı matrisi ile genel amaçlı kagir harçların elde edilebileceği potansiyelini göstermektedir. Literatürde kalsine killerin genellikle su talebini artırarak yayılma derecesini düşürdüğü bilinse de DKK-2 kili karışımların yayılma derecesini iyileştirmiştir. Bu durumun temel nedeni DKK-2 kilinin öğütülmüş partikül morfolojisinin ve süperakışkanlaştırıcı katkı ile uyumunun taneler arası sürtünmeyi minimize ederek harcın akıcılığını artırması ve bu nedenle seçilen su/bağlayıcı oranının daha etkin şekilde kullanılması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Daha önce Çizelge 3.2’de sunulduğu üzere DKK-2 kili DKK-1 kiline kıyasla daha az amorf içeriğe sahiptir. Bu durum DKK-2 içeren LC³ kagir karışımlarında daha fazla inert bileşene bağlı olarak su ihtiyacı üzerinde sınırlı bir etki göstermiştir. Daha kristalin yüzeyler yüzeyin akıcı hale gelmesi için daha az serbest su gerektirdiğinden DKK-2 içeren LC³ kagir harçlarının

tamamında yayılma daha fazla gözlemlenmiş olup elde edilen bulgular literatür ile uyumludur (Sposito ve diğ., 2022). Buna karşın, DKK-1 kili içeren numunelerde kagir harçların yayılma çaplarında düşüş gözlemlenmiştir. LC³/DKK-1/Genel karışımı genel amaçlı kagir harçlar için uygun bir yayılma performansı (17,5 cm) gösterse de agrega boyutunun 0-2 mm'ye düşürüldüğü LC³/DKK-1/İnce karışımlarında yayılma değeri 12 cm seviyesine kadar gerilemiştir. Bu durum, Westerholm ve diğ., (2008) tarafından belirtildiği üzere, ince agregaların yüksek özgül yüzey alanının karışım suyunu adsorbe etmesi ve DKK-1 kilinin daha yüksek amorf içeriğinin yüksek su emme kapasitesine neden olması ile birleşerek karışımın toplam viskozitesini oldukça arttırmıştır.

Pratik uygulamalar göz önüne alındığında, hazır genel amaçlı sıva harcının 14 cm yayılma gösterdiği dikkate alınırsa, DKK-2 kili ile üretilen genel amaçlı kagir harcın (24 cm) ve DKK-1 kili ile üretilen genel amaçlı kagir harcın (17,5 cm) işlenebilirlik açısından son derece uygun performans sergilediği görülmektedir. Karışımlarda istenildiği takdirde katı formda yer alan süperakışkanlaştırıcı miktarının azaltılarak daha düşük yayılma çaplarında da kullanılabileceği anlaşılmaktadır. İnce katmanlı kagir harçlarda ise DKK-2 kili yayılma performansını korumaktadır (20 cm). Bu durum DKK-2 kili ile üretilen hem genel amaçlı hem de ince katmanlı kagir harçların uygulama kolaylığı açısından ve sadece %10 PÇ içeriği ile büyük bir potansiyel taşıdığını göstermektedir. DKK-1 kili ise ince katmanlı kagir harçlarda su/bağlayıcı oranının artırılması gerektirebilir. Ayrıca referans hazır ince katmanlı harçlarda olduğu gibi daha farklı reoloji düzenleyici polimer malzemelerle yayılma performansları iyileştirilebilir.

4.1.2. Kagir Harçların İşlenebilirlik Tayini

LC³ karışımları ile üretilen kagir harçların ve geleneksel referans kagir harçların belirli bir süre boyunca işlenebilir kıvamını koruma kapasitesini analiz etmek için TS EN 1015-9(Anonim, 2000) standardı (Metot A) uyarınca gerçekleştirilen işlenebilirlik süresi deney sonuçları Çizelge 4.2'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Çizelge 4.2. LC³ ve referans genel amaçlı/ince katmanlı kagir harçların işlenebilirlik süresi

Karışımlar	İşlenebilirlik Süresi(dk)
Ref/Genel	80
LC ³ /DKK-1/Genel	90
LC ³ /DKK-2/Genel	85
Ref/İnce	60
LC ³ /DKK-1/İnce	60
LC ³ /DKK-2/İnce	60

Elde edilen deneysel veriler literatürdeki benzer çalışmalarla birlikte değerlendirildiğinde, işlenebilirlik süresinin agrega granülometrisi ve bağlayıcı matrisin fiziksel ve kimyasal yapısı (DKK-1 ve DKK-2 killeri için) tarafından kontrol edildiği görülmektedir (Westerholm ve diğ., 2008). Bilindiği üzere ince agregaların (0-2 mm) birim hacimdeki özgül yüzey alanı, kaba agregalara (0-4 mm) kıyasla çok daha yüksektir. Bu durum, tanelerin yüzeyini kaplamak için gereken serbest su miktarını artırmaktadır. Bütün karışımlarında bu nedenle genel amaçlı kagir harçlar, ince katmanlı kagir harçlara göre daha yüksek işlenebilir ve şekil verilebilir performansta elde edilmiştir. Ayrıca dikkat etmek gerekir ki sadece referans ince katmanlı hazır sıva harcının redispersible polimer tozu (RDP) ve selüloz eter tipi kıvam düzenleyici içermesi ve işlenebilirlik süresini daha fazla uzatması mümkündür. Ancak LC³ ince katmanlı kagir harçlarının toz süperakışkanlaştırıcı katkı hariç polimer katkı içermemesi ve daha düşük PÇ oranına sahip olması daha yüksek işlenebilirlik süresi ile sonuçlanmış olabilir. Her ne kadar hazır olarak temin edilmesinden dolayı ince katmanlı hazır sıva harcının içerdiği polimerik katkılardan uzatılan işlenebilirlik süresinin bağımsız şekilde anlaşılması güç olsa da genel olarak LC³ ince katmanlı kagir harçları daha düşük PÇ içeriği ile aynı işlenebilirlik süresine sahip olarak hazır sıva harçları yerine kullanılabilecek niteliktedir. Genel amaçlı kagir harçlarda daha iri agrega muhtevası ile daha fazla serbest kalan su bu tür harçların daha uzun süre plastik kalmasını sağlamıştır. Ancak referans genel amaçlı kagir harcın (%40) LC³ genel amaçlı kagir harçlara (%10) göre daha yoğun PÇ içermesi ve benzer işlenebilirlik süreleri elde edilmesi dikkat çekici bulgulardan bir diğeridir. Daha düşük PÇ kullanımının daha yüksek işlenebilirlik süresi ile sonuçlanması beklense de kil tabanlı genel amaçlı kagir harçlar, daha yoğun su emme kapasiteleri nedeniyle benzer katılaşma eğilimlerine sahip olmuştur. Elde edilen sonuçlar killerin kagir harçlarda puzolanik, karboalüminat ve dolgu etkisi etkileşimleri ile beraber aynı zamanda bir reoloji ve

katılaşma düzenleyicisi olarak da kullanılabileceğini gösterirken mevcut maliyetli ve üretimi daha yüksek çevresel etkiye neden olan polimer kimyasal katkılara önemli bir alternatif oluşturabilme potansiyeline sahiptir.

Bu bölüme ait bulgular genel olarak değerlendirildiğinde hem genel amaçlı hem de ince katmanlı LC³ kagir harçların, geleneksel PÇ-kireçtaşı tozu esaslı hazır harçlara kıyasla daha düşük PÇ içeriğiyle benzer işlenebilirlik süreleri ve kıvam kararlılığı sağlayabildiği anlaşılmaktadır. LC³ sistemlerinde düşük kaliteli kalsine killerin yalnızca dayanım ve dayanıklılık performansına katkı vermekle kalmayıp aynı zamanda reolojik davranış ve katılaşma hızını da dengeleyici bir rol üstlendiği görülmektedir. Bu açıdan bakıldığında, LC³ bağlayıcıları, özellikle polimer katkı dozajının azaltılması veya kullanılmaması hedeflenen düşük klinkerli ve çevresel etkisi azaltılmış kagir harç tasarımları için güçlü bir alternatiftir. Bununla birlikte, uzun dönemli saha performansı, çevresel etkiler ve çeşitli kagir birimlerle etkileşim gibi parametrelerin farklı çalışmalarla desteklenmesi LC³ esaslı kagir harçların pratikteki adaptasyonunu daha da güçlendirecektir.

4.1.3. Kagir Harçların Hava İçeriği

LC³ esaslı ve referans kagir harçların taze haldeki boşluk yapısını ve matrisin kompozite derecesini belirlemek amacıyla, TS EN 1015-7 (Metot B) (Anonim, 2000) standardı uyarınca gerçekleştirilen hava muhtevası deney sonuçları Çizelge 4.3'de sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Üretilen Harçların Taze Hal Hava Muhtevası Sonuçları

Karışımlar	Agrega Tipi	Ortalama Hava Muhtevası (%)
Ref/Genel	0-4 mm	16,0
LC ³ /DKK-1/Genel	0-4 mm	5,2
LC ³ /DKK-2/Genel	0-4 mm	6,3
Ref/İnce	0-2 mm	7,5
LC ³ /DKK-1/İnce	0-2 mm	2,4
LC ³ /DKK-2/İnce	0-2 mm	5,2

DeneySEL sonuçlar, hava muhtevasının hem bağlayıcı bileşimi hem de agrega granülometrisi tarafından kontrol edildiğini göstermektedir. Genel amaçlı 0–4 mm agrega

içeren referans kagir harçta ortalama hava içeriğinin %16,0 olması, yüksek kireçtaşı tozu oranının geleneksel olarak PÇ esaslı sistemlerde bilinen doğal hava sürükleyici etkisiyle uyumludur (Dulce ve diğ. 2026). Buna karşılık, aynı agrega aralığında tasarlanan LC³/DKK-1 ve LC³/DKK-2 genel amaçlı harçlarda hava muhtevası sırasıyla %5,2 ve %6,3 seviyelerine düşmüştür. Sonuçlar LC³ bağlayıcılı kagir harçların çok daha kompakt ve düşük boşluklu bir matris geliştirdiğini ortaya koymaktadır. Kalsine kil ve kalker taşının birlikte oluşturduğu dolgu etkisi hem matriste hem de agrega bağlayıcı pastası ara yüzünde (ITZ) boşluk oranını sınırlamıştır ve referans kagir harçlarına kıyasla belirgin bir düşük hava muhtevasına sahiptir.

İnce 0–2 mm agregalı ince katmanlı kagir harçlarda hava muhtevasının tüm karışımlar için düşmesi granülometri etkisinin bir sonucu olarak değerlendirilmektedir. Daha düşük maksimum agrega tane çapına sahip karışımlarda daha az yerleştirme kusuru oluşması daha düşük hava muhtevası ile sonuçlanmış olabilir. Ref/İnce karışımlarında hava içeriği %7,5'e gerilerken, LC³/DKK-1/İnce ve LC³/DKK-2/İnce harçlarda bu değerlerin sırasıyla %2,4 ve %5,2 değerlerine düşmesi ince agregaların sağladığı daha sıkı paketleme ile LC³ bağlayıcısının boşluk doldurucu etkisinin birlikte çalıştığını işaret etmektedir. LC³/DKK-1 karışımlarının hem genel amaçlı hem de ince katmanlı kagir harçlarda en düşük hava muhtevasını göstermesi, DKK-1 kilinin mineralojik çeşitliğe daha fazla sahip olması ve buna bağlı olarak su talebi ve hava stabilitesini daha fazla azaltan bir etki oluşturması ile ilişkilendirilebilir. Genel olarak, referans harçlarda kireçtaşı tozu içeriği yüksek hava içeriği ve daha boşluklu bir yapı ile sonuçlanmış olup, LC³ sistemlerinde kalsine kil ve kalker taşının etkileşimi daha düşük hava içeriği ve buna bağlı olarak daha kompakt bir matris sağlamıştır. Sonuçlar LC³ esaslı kagir harçların geleneksel PÇ ve kireçtaşı tozu esaslı kagir harçlarına kıyasla çevresel etki açısından olduğu kadar yerleştirme ve komposite açısından da güçlü bir alternatif sunabileceğini göstermektedir.

4.1.4. Klorür İçeriği Analiz Sonuçları

LC³ katkılı ve referans harçların, donatı korozyonuna sebebiyet verme riskini ve kimyasal bileşenlerinin saflığını belirlemek amacıyla, TS EN 1015-17(Anonim, 2002) standardı uyarınca gerçekleştirilen suda çözünebilir klorür tayini sonuçları Çizelge 4.4'te sunulmuştur. Analizlerde, harç karışımına giren ham maddelerden (kalsine kil, çimento,

agrega ve su) kaynaklanabilecek klorür iyonlarının miktarı, gümüş nitrat titrasyonu yöntemiyle tespit edilmiştir.

Çizelge 4.4. Geliştirilen Kagit Harçların Suda Çözünebilir Klorür İçerikleri

Karışımlar	Klorür İçeriği (Cl-) (%)
Ref/Genel	0,05
LC ³ /DKK-1/Genel	0,17
LC ³ /DKK-2/Genel	0,13
Ref/İnce	0,06
LC ³ /DKK-1/İnce	0,10
LC ³ /DKK-2/İnce	0,17

Suda çözünebilir klorür tayini sonuçları, LC³ ve referans kagit harçların bağlayıcı bileşimi ve kullanılan ham maddelerin iyonik içeriği etkisini göstermektedir. Referans genel amaçlı kagit harçlarda çözünebilir klorür içeriğinin %0,05 ve ince katmanlı harçlarda %0,06 düzeyinde olması, PÇ, kireçtaşı tozu ve doğal agrega gibi geleneksel hammaddelerin düşük klorür içeriği ile uyumludur. Buna karşılık LC³ kagit bileşenlerinde genel amaçlı harçlar için %0,17 (DKK-1) ve %0,13 (DKK-2), ince katmanlı harçlar için ise %0,10 (DKK-1) ve %0,17 (DKK-2) gibi daha yüksek değerler gözlemlenmiştir (Çizelge 4.4.). Bu artış, öncelikle LC³ bağlayıcısının mineralojik ve kimyasal bileşimiyle ilişkilidir zira bu harç karışımlarda oranca %58 kalsine kil %29 kireçtaşı tozu yoğun olarak kullanılmıştır. XRF analizlerinde kullanılan kalsine killerde klor tespit edilmemesine rağmen, LC³ sisteminde bağlayıcı bileşimin büyük bir kısmını oluşturan kalker taşı tozu, öğütme koşulları ve kaynak ocağının jeolojik geçmişine bağlı olarak düşük seviyede klorür içerebilir. Bunun yanında bu hammaddelerin öğütülmesinde öğütmeyi kolaylaştırıcı katkıların kullanılması bu karışımlara klorür sürüklemiş olabilir. Ayrıca, üretim süreçlerinde kullanılan öğütme yardımcıları gibi bazı katkı maddeleri, LC³ bağlayıcılarında bir miktar daha fazla klorür bulunmasına sebep olabilir.

Bu sonuçlar TS EN 998-2(Anonim, 2017)'de kagit elemanlar için önerilen en yüksek %0,10 klorür sınırı açısından değerlendirildiğinde, LC³/DKK-1/Genel (%0,17), LC³/DKK-2/Genel (%0,13) ve LC³/DKK-2/İnce (%0,17) karışımlarının bu limitin üzerinde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, tez çalışmasında incelenen kagit harçların hiçbirisi donatı kullanılabilecek dayanım sınıfında (M5) olmadığından söz konusu sınır değerini doğrudan yapısal bir risk oluşturmadığı belirtilmelidir. Yine de klorür içeriğinin, LC³ karışımlarının iyon bağlama kapasitesi ve uzun dönem kimyasal

dayanıklılığı ile etkileşim konularında ileri çalışmalarda değerlendirilmesi önem arz etmektedir. Genel olarak sonuçlar, LC³ kagir karışımlarında klorür düzeylerinin referans kagir harçlara kıyasla bir miktar daha yüksek olduğunu göstermekle birlikte, bu durumun doğrudan killerden değil, bağlayıcı bileşenlerinin mineralojik ve kimyasal özellikleri nedeniyle iyon tutma davranışından kaynaklanabileceğini göstermektedir. Elde edilen veriler, LC³ kagir harçlarının çevresel ve mekanik özellik avantajlarına ek olarak kimyasal stabilitelerinin de tasarım ve hammadde seçimiyle optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir.

4.2. Sertleşmiş Harç Özelliklerine Ait Bulgular

4.2.1. Birim Hacim Kütle (Yoğunluk) Sonuçları

LC³ esaslı ve referans kagir harçların iç yapı doluluk oranlarını ve fiziksel stabilitesini belirlemek amacıyla 28 günlük kür süresini tamamlayan kagir numuneler üzerinde TS EN 1015-10(Anonim, 2001) standardı uyarınca gerçekleştirilen boşluklu kuru birim hacim kütlesi deney sonuçları Çizelge 4.5'te sunulmuştur. Deney sonuçları, kagir harç matrisinin yoğunluğunun bağlayıcı tipi ve agrega granülometrisi ile ilişkili olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.5. Üretilen Kagir Harçların Yoğunlukları

Karışımlar	Ortalama Kuru Yoğunluk (g/cm ³)
Ref/Genel	1,70
LC ³ /DKK-1/Genel	2,01
LC ³ /DKK-2/Genel	2,05
Ref/İnce	1,55
LC ³ /DKK-1/İnce	1,99
LC ³ /DKK-2/İnce	2,02

Çizelge 4.5'te sunulan 28 günlük boşluklu kuru birim hacim kütlesi sonuçları, LC³ esaslı kagir harçların referans PÇ ve kireç sistemine kıyasla belirgin derecede daha yoğun ve daha düşük boşluk içeren bir iç yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Referans genel amaçlı kagir harcın ortalama kuru yoğunluğunun 1,70 g/cm³ olması, kirecin karışımlara yoğun miktarda hava boşluğuna neden olmasında kaynaklanmaktadır (Dulce ve diğ.,

2026). Buna karşılık LC³/DKK-1 ve LC³/DKK-2 genel amaçlı kagir harçlarda yoğunluk değerlerinin sırasıyla 2,01 ve 2,05 g/cm³ düzeylerine ulaşması, LC³ bağlayıcısı içeren karışımların daha sıkı ve daha düşük boşluk hacmine sahip bir yapıda olduğunu göstermektedir. Aynı eğilim daha ince agrega kullanılan ince katmanlı kagir harçlarında da gözlenmektedir. Ref/İnce harcın yoğunluğu 1,55 g/cm³ iken, LC³/DKK-1 ve LC³/DKK-2 ince katmanlı kagir harçların yoğunlukları sırasıyla 1,99 ve 2,02 g/cm³ olarak belirlenmiştir. Bu artış, hem ince agregaların sağladığı daha iyi paketleme etkisi hem de LC³ bağlayıcı matrisinin gelişen içsel hidratasyon ürünlerinin etkin şekilde mikro yapıyı doldurmasına bağlıdır.

LC³ karışımlarının tamamında yoğunluk değerlerinin referansa kagir harçlara kıyasla yaklaşık %30 oranında artmış olması, LC³ sisteminin yalnızca kimyasal reaksiyon ürünleri açısından değil aynı zamanda fiziksel dolgu etkisi bakımından da kararlılık sunduğunu göstermektedir. Özellikle kalsine kilin yüksek inceliği ve kalker taşının filler etkisi, LC³ hamurunun daha etkili paketlenmesini ve porozitenin daha düşük kalmasını sağlamıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, LC³ kagir harçlarının kuru birim hacim kütleindeki bu belirgin artış önceki bölümlerde detaylandırılan LC³'ün daha düşük hava içeriği ile uyumlu sonuçlar içermektedir. Elde edilen veriler LC³ bağlayıcıların kagir harçlarda daha kararlı fiziksel bütünlük ve yüksek mekanik performans sağlayabileceğini destekler niteliktedir.

4.2.2. Kagir Harçların Kapiler Su Emme Davranışları

LC³ esaslı ve referans kagir harçların, dış ortamdan veya zemin temasından kaynaklanabilecek su veya nem maruziyetini kapiler olarak bünyelerine alma potansiyelini belirlemek amacıyla TS EN 1015-18(Anonim, 2004) standardı uyarınca gerçekleştirilen kapiler su emme deneyi sonuçları Çizelge 4.6'te sunulmuştur. Deney kapsamında, 28 gün standart kür uygulanan ve ardından sabit kütleyle kadar kurutulan numunelerin 10. ve 90. dakikalardaki kütle artışları ölçülmüş kapiler su emme katsayıları bu hesaplamalara göre gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.6. Kagit Harçların Kapiler Su Emme Katsayısı Sonuçları

Karışımlar	Agrega Tipi	Kapiler Su Emme Katsayısı [(kg/(m ² ·dk ^{0,5})]
Ref/Genel	0-4 mm	0,28
LC ³ /DKK-1/Genel	0-4 mm	0,34
LC ³ /DKK-2/Genel	0-4 mm	0,28
Ref/İnce	0-2 mm	0,25
LC ³ /DKK-1/İnce	0-2 mm	0,33
LC ³ /DKK-2/İnce	0-2 mm	0,27

Çizelge 4.6’da verilen kapiler su emme katsayısı sonuçları, LC³ ve referans kagit harçların kapiler su taşınma potansiyellerinin birbirine oldukça yakın değerlere sahip olduğunu göstermektedir. Örneğin, genel amaçlı harçlarda Ref/Genel karışımı için kapilarite 0,28 kg/(m²·dk^{0,5}) olarak belirlenmiştir. LC³/DKK-1/Genel karışımında bu değer 0,34 kg/(m²·dk^{0,5}) seviyesine yükselmesi LC³ kagit karışımlarının görece daha sıkı bir mikroyapı içermesine rağmen olmasına kapiler su emme açısından referansa göre sınırlı bir artışa sahip olduğunu işaret etmektedir. LC³/DKK-2/Genel karışımında su kapilarite değerinin referansa benzer şekilde 0,28 kg/(m²·dk^{0,5}) olarak kaydedilmesi DKK-2 kilinin oluşturduğu gözenek yapısının kagit harçlarda Ref/Genel ile benzer karakterde olduğunu göstermektedir. İnce agrega (0–2 mm) kullanılan kagit harçlarda da benzer bir eğilim izlenmektedir. Ref/İnce için 0,25 kg/(m²·dk^{0,5}) kaydedilen ortalama değer LC³/DKK-1/İnce karışımında 0,33 kg/(m²·dk^{0,5}), LC³/DKK-2/İnce karışımında ise 0,27 kg/(m²·dk^{0,5}) olarak ölçülmüştür. Bu bulgular, LC³ bağlayıcılı kagit harçlarda toplam boşluk hacmi ve hava muhtevasının referansa göre daha düşük olmasına rağmen, kısmen sürekliliği daha yüksek bir kapiler gözenek ağına sahip olduğunu ve bu durumun suyun kılcal yolla taşınmasını sınırlı ölçüde hızlandırabildiğini göstermektedir. Ancak bununla birlikte, sayısal olarak bakıldığında tüm karışımların 0,25–0,34 kg/(m²·dk^{0,5}) aralığında yer aldığı Çizelge 4.6’da takip edilmektedir. Bu nedenle LC³ esaslı kagit harçların kapiler su emme performansının referans PÇ ve kireç içeren kagit harçlarla benzer mertebelerde ve karşılaştırılabilir nitelikte olduğu değerlendirilmektedir.

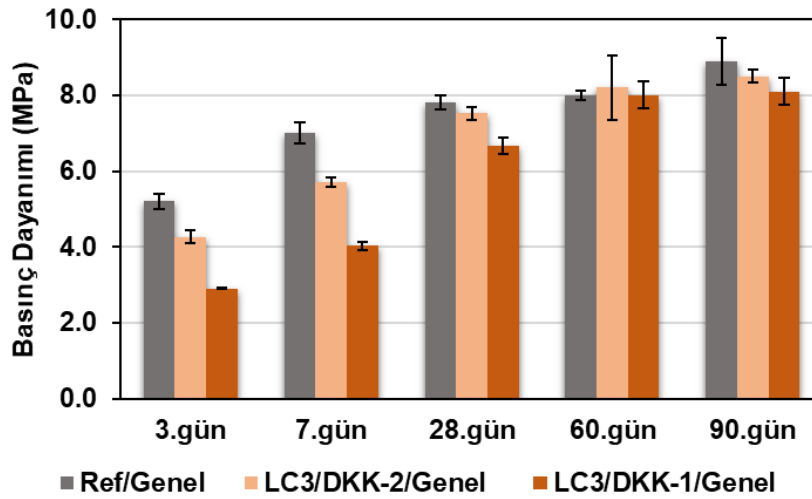
4.2.3. Basınç Dayanım Sonuçları

Tez çalışması kapsamında sürdürülebilir LC³ kagit harçlarının basınç yükleri altında performansını belirlemek ve geleneksel hazır sıva kagit harçlarla karşılaştırmak amacıyla TS EN 1015-11(Anonim, 2020) standardı uyarınca farklı kür yaşlarında basınç

dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.7 ve Şekil 4.2’de genel amaçlı kagir harçların ortalama basınç dayanım sonuçları verilmiş olup LC³ kagir harçlarının sadece %10 PÇ içerdiği ve geri kalan bileşenlerin %58 kalsine kil, %29 kalkertası tozu, %3 alçıtaşı tozu olduğu, genel amaçlı referans (Ref/Genel) harçların ise %40 PÇ ve %60 kireç içerdiği belirtilmelidir.

Çizelge 4.7. Genel amaçlı kagir harçların basınç dayanımı sonuçları (MPa)

Karışımlar	3. Gün	7. Gün	28. Gün	60. Gün	90. Gün
Ref/Genel	5,2	7,0	7,8	8,0	8,9
LC ³ /DKK-1/Genel	2,9	4,0	6,7	8,0	8,1
LC ³ /DKK-2/Genel	4,3	5,7	7,5	8,2	8,5



Şekil 4.2. Genel amaçlı kagir harçların ortalama basınç dayanımı sonuçları (MPa)

Çizelge 4.7’de ve Şekil 4.2’de verilen sonuçlar, genel amaçlı kâgir harçlarda bağlayıcı türü, mineralojik yapı ve tane boyutu dağılımının basınç dayanımı gelişimi üzerinde belirleyici olduğunu göstermektedir. Daha önce belirtildiği üzere, referans harç (Ref/Genel), çimento ve kireç esaslı olup geleneksel bir bağlayıcı kagir harç bağlayıcı sistemine sahiptir. Bu kagir bağlayıcı sistemi, hidrasyonun erken yaşlarda yüksek hızda ilerlemesi ve kirecin daha çok plastiklik kazandıran etkiye sahip olması ile bilinmektedir. Ancak bu durumun aynı zamanda basınç dayanım gelişimi üzerindeki katkısı da sınırlıdır. Sonuçlar incelendiğinde LC³ karışımlara kıyasla 3 günlük (5,2 MPa) ve 7 günlük (7,0 MPa) ortalama basınç dayanımları oldukça yüksektir (Şekil 4.2). Bununla birlikte, kireç oranının yüksek olması matriste daha fazla makro boşluk oluşmasına neden olmuş (Dulce ve diğ., 2026) ve 28. günde (7,8 MPa) dayanım artışı giderek yavaşlamıştır. Her ne kadar

TS EN 998-2 (Anonim, 2017)'ye göre M5 sınıfı (28 günlük ortalama basınç dayanımı en az 5 MPa) gereklilikleri karşılanmış olmakla birlikte, referans kagir harçta uzun dönem dayanım artışının sınırlı kalması yüksek kireç oranının matrisin mikro yapısını iyileştirmekte yetersiz kalması ve hidratasyon ürünlerinin daha sınırlı bağlayıcı etkisi göstermesi ile ilgidir.

LC³ bağlayıcılı kagir karışımlarda ise yalnızca %10 PÇ bulunmakla birlikte daha önce bahsedildiği üzere %3 alçıtaşı tozu, yaklaşık %29 kalkertaşı tozu ve %58 oranında kalsine kil bulunmaktadır. Düşük PÇ içeriğine rağmen genel amaçlı kagir harçların ortalama basınç dayanım sonuçları incelendiğinde (Şekil 4.2), 28, 60 ve 90 günlük kür yaşları sonunda referans kagir sıva karışımlarıyla benzer seviyeye ulaştığı görülmektedir. Bu durum LC³ sisteminin kendisine özgü içsel hidratasyon mekanizmaları ile dayanımı geliştirdiğini göstermektedir. Kireç içermeyen LC³ karışımlarında, C–A–S–H ve karboalüminat fazları uzun süreli reaksiyonlarla artmaktadır (Sun ve diğ., 2024) ve bu gelişim dayanımın erken yaşlarda daha düşük seyretmesine engel olamasa da ileri yaşlarda referans karışımlara benzer sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Karışımlar özelinde incelendiğinde, basınç dayanım sonuçları mineralojik ve bileşeni oluşturan malzemelerin tane boyutları ile doğrudan ilişkilidir. DKK-1 kili, DKK-2 kiline kıyasla yüksek kaolinit içeriği (%46,8) ve düşük kuvars içeriğine sahip olup (%22,4) toplamda kalsinasyon sonrası %64,3 amorf faza sahiptir. Bu yüksek amorf içerik nedeniyle, uzun dönem puzolanik reaksiyonların daha etkin ilerlemesi sağlanmıştır. DKK-2 kili ise daha yüksek kuvars ve mika içeriğine sahip olup kalsinasyon sonrası daha az amorf faz içermesi uzun dönem reaksiyon potansiyelini bir miktar sınırlamıştır. Ancak daha geniş tane boyutu dağılımı (özellikle $D_{90} = 50 \mu\text{m}$ ve $D_{97} = 72,92 \mu\text{m}$) sayesinde karışım içinde daha yoğun bir paketleme etkisi sağlayarak erken yaş dayanımlarının DKK-1'e göre daha yüksek olmasını sağlamıştır. LC³ karışımlarında sadece %10 PÇ kullanılmasına rağmen 28. gün ortalama basınç dayanım sonuçlarının referans harçla (7,8 MPa) aynı mertebeye ulaşması (6,7–7,5 MPa aralığında) ve ileri yaşlarda benzer durumun devam etmesi LC³ bağlayıcısının hem reaktif (metakaolin) hem de inert (kalker ve kuvars) bileşenlerinin sinerjik etkisi ile açıklanmaktadır (Briki ve diğ., 2021; Weerdt ve diğ., 2011). Bu sinerjik etki dolgu etkisi, ileri yaş reaksiyonları ve karboalüminat fazlarının stabilizasyonu ile ilişkili içsel LC³ karışımlarının temel mekanizmalarıdır.

Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, LC³/DKK-1/Genel ve LC³/DKK-2/Genel kagir harçlarının her ikisi de M5 sınıfı gerekliliklerini karşılamaktadır ve düşük PÇ içeriğine rağmen referans çimento/kireç kagir harçlarla eşdeğer uzun dönemli

ortalama basınç dayanımına sahiptir. Elde edilen sonuçlar LC^3 bağlayıcılı kagir harçların geleneksel çimento/kireç kagir harçlarına sürdürülebilir ve teknik olarak rekabetçi bir şekilde alternatif olabileceğini göstermektedir.

Çizelge 4.8 ve Şekil 4.3'te ise ince katmanlı kagir harçların ortalama basınç dayanımı sonuçları (MPa) sunulmuştur. Referans ince katmanlı kagir harç (Ref/İnce), daha çok PÇ içermesine rağmen, kireç esaslı olması ve içerdiği reoloji düzenleyici ilave kimyasal polimer malzemeler nedeniyle erken yaş dayanımları 3. ve 7. günlerde sırasıyla 3,6 MPa ve 5,6 MPa dayanım seviyelerine ulaşarak sınırlı bir artış göstermiştir. Bununla birlikte, dayanım artışı 28. günde 6,4 MPa'a ulaşmış, 60. ve 90. günlerde sırasıyla 8,0 MPa ve 8,9 MPa ortalama basınç dayanımı göstermiştir. Elde edilen veriler TS EN 998-2 (Anonim, 2017) kapsamında M5 sınıfı gerekliliklerini karşılamaktadır.

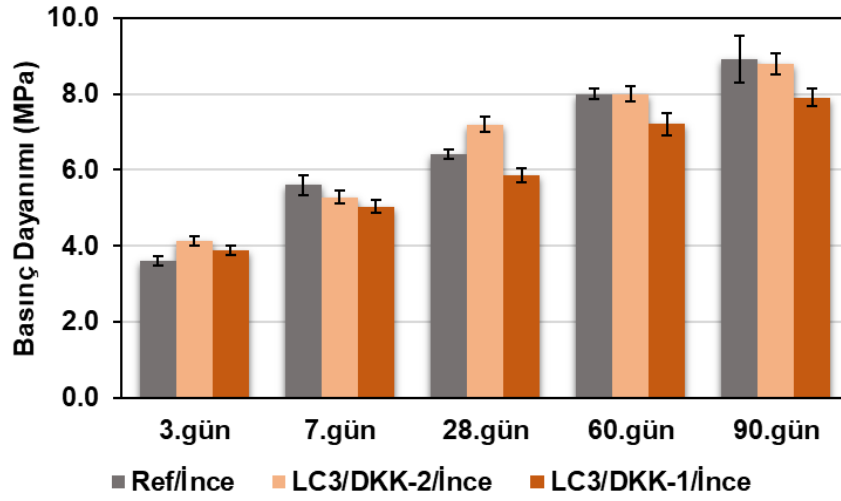
LC^3 esaslı ince katmanlı kagir harçlarda ise erken yaş dayanımları referans karışıma oldukça benzerdir. LC^3 /DKK-1/İnce karışımı 3. günde 3,9 MPa ve 7. günde 5,0 MPa ortalama basınç dayanımına ulaşmıştır. LC^3 /DKK-1/İnce karışımı ise 3. günde ortalama 4,1 MPa ve 7. Günde ortalama 5,3 MPa basınç dayanımı değerleriyle her iki yaşta referansın biraz daha üzerinde bir performans göstermiştir. Bu erken yaş avantajı, DKK-2 kilinin daha geniş tane boyutu dağılımı sayesinde daha etkin bir dolgu etkisi oluşturması ve daha yoğun bir hamur fazı sağlamasıyla ilgili olabilir. Buna karşın DKK-1 kili daha yüksek reaktiviteye sahip olup (%46,8 kaolinit) bu nedenle bu kili içeren ince katmanlı kagir harcın uzun dönemde dayanım artışının daha belirgin olduğu görülmektedir (Şekil 4.3). LC^3 /DKK-2/İnce kagir harcı 28. günde ortalama 7,2 MPa basınç dayanımı ile referans karışımından daha fazla ortalama basınç dayanımına sahiptir. 60. ve 90. günlük kür yaşlarında da referans hazır sıva ince katmanlı kagir harçlarla benzer ortalama basınç dayanımına sahiptir (Şekil 4.3). Sonuçlar, LC^3 karışımlarının yalnızca erken yaş dayanım açısından değil aynı zamanda ince agrega içeren yoğun ince katmanlı harçların yerine başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Daha önce belirlendiği ve tartışıldığı üzere LC^3 kagir karışımların daha düşük hava muhtevası daha sıkı arayüz oluşumuna katkı sağlamış ve dayanım artışını destekleyen temel mekanizmalardan biri olmuştur.

TS EN 998-2(Anonim, 2017)'nin M sınıflandırması dikkate alındığında, tüm LC^3 ince katmanlı karışımlarının 28 günlük dayanım değerleri M5 gereklilikleriyle uyumludur. Dikkat çekici olan husus ise daha düşük PÇ içeren LC^3 kagir karışımlarının referans kagir harçlarla eşdeğer dayanım seviyelerine ulaşılmasıdır. Çevresel etki

açısından değerlendirildiğinde, LC³ ince katmanlı kagir harçlar karbon ayak izi açısından önemli avantajlar sunan sürdürülebilir bir kagir bağlayıcı potansiyeli taşımaktadır.

Çizelge 4.8. İnce katmanlı kagir harçların basınç dayanımı sonuçları (MPa)

Karışımlar	3. Gün	7. Gün	28. Gün	60. Gün	90. Gün
Ref/İnce	3,6	5,6	6,4	8,0	8,9
LC ³ /DKK-1/İnce	3,9	5,0	5,9	7,2	7,9
LC ³ /DKK-2/İnce	4,1	5,3	7,2	8,0	8,8



Şekil 4.3. İnce katmanlı kagir harçların ortalama basınç dayanım sonuçları (MPa)

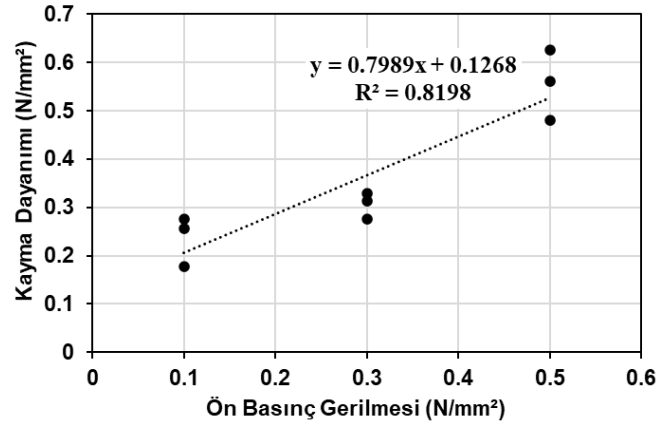
4.2.4. İnce Katmanlı Kagir Harçlarla Hazırlanan Kagir Birimlerin Kayma Dayanımı

Yığma yapıların yatay yükler altındaki sismik performansı büyük ölçüde kagir harç ve kagir birim arasındaki aderans kalitesine ve ara yüzeyin kayma dayanımına bağlıdır. Literatürde bu davranış, kayma dayanımının (τ), normal gerilme (σ) ile sürtünme katsayısının ($\tan \alpha$) çarpımı ve bunlara eklenen kohezyon (c) parametresinden oluştuğunu varsayan Mohr-Coulomb kırılma kriteri ile ifade edilmektedir. Briceño ve diğ., (2024) tarafından yapılan çalışmalarda iyi derecede bir aderansın, kagir harç içerisindeki hidratasyon ürünlerinin yığma birimin yüzey gözeneklerine nüfuz ederek mekanik kenetlenme oluşturması ve kimyasal reaksiyonlarla desteklenmesi sonucu meydana geldiği vurgulanmaktadır. Özellikle bağlayıcı türünün ve kagir harç içerisindeki ince malzeme oranının, bu arayüzey davranışını ve sürtünme özelliklerini doğrudan etkilediği Barattucci ve diğ., (2020) tarafından da deneysel ve sayısal olarak ortaya konmuştur. Bu

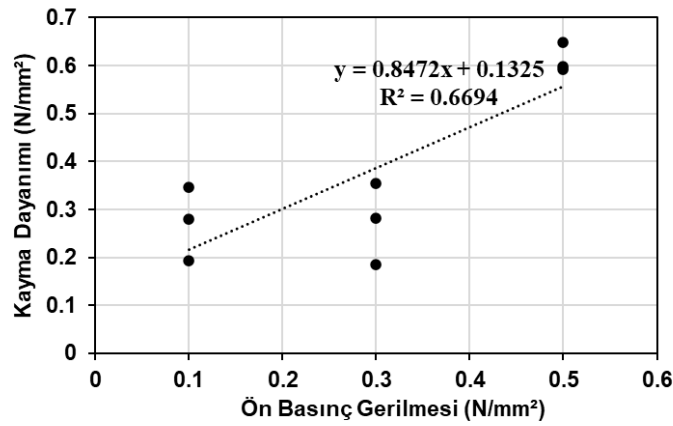
teorik çerçevede yürütülen tez çalışmasında, önceki bölümlerde en yüksek potansiyele sahip ince katmanlı DKK-2 kili taşıyan kagır harç karışımı (LC³/DKK-2/İnce) seçilerek üçlü (triplet) kagır birim numunelerin kayma davranışları karşılaştırmalı olarak referans kagır harçları ile analiz edilmiştir. Farklı ön gerilme seviyeleri (0,1, 0,3 ve 0,5 MPa) altında elde edilen deneysel veriler üzerinde yapılan regresyon analizi sonuçları ve hesaplanan karakteristik parametreler Çizelge 4.9'da sunulmuştur. Ayrıca, her iki harç grubuna ait Mohr-Coulomb kırılma zarfları ve deneysel veri noktalarının dağılımı Şekil 4.4.(a-b)'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.9. İnce katmanlı kagır harçlarla hazırlanan kagır birimlerin kayma dayanımı

Karışımlar	Başlangıç Kayma Dayanımı (fvo) [N/mm ²]	İçsel Sürtünme Katsayısı (tanα)	Karakteristik Başlangıç Kayma Dayanımı (fvok) [N/mm ²]	İçsel Sürtünme Açısı Karekteristik Değeri (0,8*tanα)
Ref/İnce	0.126	0.79	0.1008	0.632
LC ³ /DKK-2/İnce	0.132	0.85	0.1056	0.680



a) Ref/İnce



b) LC³/DKK-2/İnce

Şekil 4.4. Farklı ön gerilme seviyeleri altında elde edilen kırılma zarflarının dağılımı

a) Ref/İnce, b) LC³/DKK-2/İnce

Çizelge 4.9 ve Şekil 4.5'te sunulan sonuçlar, LC³/DKK-2/İnce kagir harcının ara yüzey davranışında referans hazır sıva PÇ ve kireç harcına göre belirgin iyileşmeler sağladığını göstermektedir. Referans ince harç için ortalama başlangıç kayma dayanımı (0,126 N/mm²), LC³/DKK-2/İnce kagir harcından (0,132 N/mm²) daha düşük kaydedilmiştir. Her ne kadar sınırlı iyileşme LC³/DKK-2/İnce kagir harcı ile mümkün olsa da bu sistemin yalnızca %10 PÇ içermesi ve karmaşık polimer dispersiyonları içermemesi elde edilen değerlerin teknik açıdan son derece dikkat çekici olduğu göstermektedir. Ayrıca, LC³/DKK-2/İnce kagir harcına ait karakteristik kayma dayanımı ortalama 0,1056 N/mm² kaydedilmiş olup referans hazır sıva kagir harcın karakteristik kayma dayanımından (0,1008 N/mm²) kısmen daha yüksektir. Bu durum, LC³ ince katmanlı harçların mekanik yükler altındaki kayma kapasitesinin en az konvansiyonel harçlar kadar performans gösterdiğini işaret etmektedir.

İçsel sürtünme parametreleri incelendiğinde, LC³/DKK-2/İnce kagir harcının tanα değerinin 0,85 olduğu görülmektedir; bu değer referans karışımdaki 0,79 değerinden yüksektir (Çizelge 4.9). İçsel sürtünme açısının karakteristik değeri de LC³ kagir harçlarında ortalama 0,680, referans kagir harçlarında ise 0,632 olarak hesaplanmıştır. Sürtünme bileşenindeki bu artış, LC³ matrisinin daha sıkı ve kompasitesi yüksek mikro yapısı ile yakından ilişkilidir. XRD ve PSD analizleri LC³/DKK-2 kagir harçlarının hem ince aktif fazlardan hem de geniş dağılımlı inert kuvars ve mika fraksiyonlarından oluştuğunu göstermiştir. Bu LC³ bileşenlerinin, arayüzeyde mekanik kenetlenmeyi güçlendirdiği ve harç ile tuğla arasındaki temasta daha yüksek sürtünme direnci oluşturduğu göstermektedir. Şekil 4.4'te sunulan regresyon eğrileri de bu bulguları destekler niteliktedir. Referans kagir harç için korelasyon katsayısı (R²) 0,82 olarak kaydedilmiştir. Bu durum kırılma zarfının güçlü bir doğrusal yapıya sahip olduğunu göstermektedir. LC³/DKK-2/İnce kagir harçlar için ise korelasyon katsayısı (R²) 0,67 olarak elde edilse de veri dağılımının Mohr–Coulomb modeline uyumlu olduğu ve LC³ kagir harçlarda artan normal gerilme altında kayma dayanımının benzer eğimde olduğu görülmektedir. Regresyon eğrileri (Şekil 4.4), LC³/DKK-2/İnce kagir harçlar için daha yüksek olup bu durum normal gerilme artışına karşı LC³ kagir harçlarının daha hassas bir kayma dayanımına sahip olmasını da dolaylı olarak göstermektedir. Bu bulgular birlikte değerlendirildiğinde, LC³/DKK-2/İnce kagir harçlarda ara yüzey dayanımı ve içsel sürtünme açısından referans PÇ ve kireç içerikli hazır sıvaları yakaladığı ve bazı parametrelerde daha iyi performans gösterdiği elde edilmiştir. Düşük klinker içeriğine

(%10 PÇ) rağmen geliştirilen LC³ kagir bağlayıcıların bu performansı, sürdürülebilir kagir harç formülasyonları açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Sismik aktarım mekanizmalarında kritik bir rol oynayan kayma dayanımının bu seviyede korunması LC³ kagir harçlarının yığma yapılarda kagir birimlerle güvenle kullanılabileceğini de göstermektedir. Özellikle ince katmanlı uygulamalarda LC³/DKK-2/İnce karışımı hem arayüz kenetlenme kapasitesi hem de çevresel etkileri azaltan bileşen yapısıyla en yüksek potansiyel taşıyan karışım olarak öne çıkmaktadır.

4.2.5. Kagir Harçların Eğilme Bağ Dayanımı Sonuçları

Kagir duvarların düzlem dışı yükler altındaki performansı ve çekme yükleri altındaki direnci, büyük ölçüde kagir harç ile kagir birim arasındaki eğilme bağ dayanımına bağlı olmaktadır. Literatürde bu parametrenin belirlenmesi için genellikle bond wrench metodu olarak bilinen ve bağ dayanım testi içeren TS EN 1052-5(Anonim, 2006) standardı önerilmektedir. Ancak, bu yöntemin uygulama zorlukları ve özel ekipman gereksinimi nedeniyle, bu tez çalışmasında TS EN 998-2(Anonim, 2017) standardının izin verdiği üzere deney düzeneği TS EN 1015-11(Anonim, 2020) standardına göre revize edilmiştir. Benzer şekilde, Koutas ve Bournas (2020) ile Segura ve diğ., (2018) gibi araştırmacılar da harç ve tuğla arayüzündeki aderans davranışını belirlemek için standart eğilme testlerinin modifiye edilmiş versiyonlarının daha güvenilir sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Bu doğrultuda, üretilen 160×40×40 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler, TS EN 1015-11 (Anonim, 2020) standardında tanımlanan üç noktalı eğilme test düzeneğine yerleştirilerek harçların eğilme dayanımı belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçlar, uygulanan yük ve mesnet açıklığı dikkate alınarak hesaplanmış ve Çizelge 4.10'da tüm kagir numune grupları için ortalama değerler sunulmuştur.

Çizelge 4.10. Kagir harçların ortalama eğilme bağ dayanımı sonuçları

Karışımlar	Kırılma Yükü (P, N)	Eğilme Bağ Dayanımı (N/mm ²)
Ref/Genel	1066	1,33
LC ³ /DKK-1/Genel	1336	1,67
LC ³ /DKK-2/Genel	1440	1,80
Ref/İnce	1260	1,58
LC ³ /DKK-1/İnce	1333	1,67
LC ³ /DKK-2/İnce	1433	1,79

Deney sonuçları karşılaştırmalı olarak incelendiğinde hem kaba hem de ince agrega gruplarında LC³ kagir harçların, referans kagir harçlara göre belirgin derecede daha iyi performans sağladığı görülmektedir. Genel amaçlı kagir harç gruplarında LC³ esaslı numuneleri (LC³/DKK-2/Genel) 1.80 N/mm² ile en yüksek dayanımı göstererek, referans kagir harçlara göre (1.33 N/mm²) göre %35 daha yüksek eğilme bağ dayanımını potansiyeli taşımaktadır. LC³/DKK-1/Genel grubunda da (1.67 N/mm²) referans kagir harçlara göre %25,5 daha yüksek performans kaydedilmiştir. İnce katmanlı kagir harçlarda ise LC³/DKK-2/İnce (1.79 N/mm²) ve LC³/DKK-1/İnce (1.67 N/mm²) numuneleri, Ref/İnce grubuna (1.58 N/mm²) kıyasla sırasıyla %13 ve %6 oranında daha yüksek eğilme bağ dayanımına sahip olmuştur. Sonuçlardan anlaşılabileceği üzere, DKK-2 (LC³) serisi hem genel amaçlı hem de ince katmanlı kagir harçlarda en iyi aderans performansı gösterebilecek performansa sahiptir. Bu bulgu bir önceki aşamada kayma dayanım kriterlerine göre yapılan performans analizi sonuçlarıyla da uygundur. Bu iyileşmenin temel mekanizması, Shanmugavel ve diğ., (2020) tarafından da belirtildiği üzere harç karışımlarındaki ince partiküllerin filler etkisi ve hidrasyon ürünlerinin arayüzey geçiş bölgesini güçlendirmesi ile ilgilidir. Özellikle LC³ sistemindeki kalsine kil ve kireçtaşının oluşturduğu yoğun C-A-S-H jelleri tuğla kagir birim yüzeyindeki gözeneklere daha etkin nüfuz ederek fiziksel kenetlenmeyi artırmış ve bağ dayanımını iyileştirmiş olabilir. LC³ kagir harçların su tutma kapasitesinin ve arayüz bağının artması, özellikle çekme gerilmeleri altındaki gevrek kırılma modunu iyileştirmektedir ve LC³/DKK-1/İnce kagir harç grubu da dahil olmak üzere iyi performans elde edilmesini sağlamaktadır (Segura ve diğ., (2018)). Sonuç olarak LC³ esaslı düşük PÇ içeren kagir harçlar, yığma yapıların deprem davranışı için kritik olan bu parametrede de oldukça umut vadeden bir tasarım yansıtmaktadır.

4.2.6. Kagir Harçların Isıl İletkenlik ve Su Buharı Geçirgenliği Sonuçları

Tez çalışması kapsamında geliştirilen LC³ esaslı ve referans PÇ kagir harçların, yapıların enerji verimliliğini etkileyen ısı iletkenlik (λ) ve iç ortam nem dengesini düzenleyen su buharı geçirgenlik (μ) özellikleri kagir harçların fiziksel özellikleri ile incelenmiştir. TS EN 998-2 (Anonim, 2017) standardında belirtildiği üzere, bu parametrelerin tayini için doğrudan fiziksel ölçüm yerine, malzemelerin sertleşmiş kuru birim hacim kütleleri ile korelasyon kurularak TS EN 1745 (Metot S1) (Anonim, 2020)

standardının izin verdiği şekliyle sunulan tabulasyon değerleri esas alınmıştır. Bölüm 4.2.1’de deneysel olarak tespit edilen sertleşmiş kuru birim hacim kütlesi değerleri kullanılarak her bir kagir harç grubu için karakteristik ısı iletkenlik katsayıları TS EN 1745 Çizelge A.12 (Anonim, 2020) ($P=50\%$) verileri üzerinden doğrusal enterpolasyon yöntemiyle hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.11’de sunulmuştur.

Çizelge 4.11. Harçların yoğunluğa bağlı ısı ve fiziksel özellikleri (TS EN 1745, 2020)

Karışımlar	Kuru Yoğunluk (kg/m ³)	Isıl İletkenlik Katsayısı ($\lambda_{10,kuru}$) [W/m·K]	Su Buharı Difüzyon Direnç Faktörü (μ)
Ref/Genel	1700	0,71	15 / 35
LC ³ /DKK-1/Genel	2010	1,12	15 / 35
LC ³ /DKK-2/Genel	2050	1,18	15 / 35
Ref/İnce	1550	0,57	15 / 35
LC ³ /DKK-1/İnce	1990	1,10	15 / 35
LC ³ /DKK-2/İnce	2020	1,14	15 / 35

Eşleştirilen veriler değerlendirildiğinde, kagir harçların ısı iletkenlik performansının doğrudan matris yoğunluğu ile ilişkili olduğu görülmektedir. 1550 kg/m³ yoğunluğa sahip referans kagir harcın ısı iletkenlik değeri 0,57 W/m·K iken, LC³ esaslı kagir harçlarında yaklaşık 2000 kg/m³ seviyesine çıkan kuru yoğunluklar 1,10 W/m·K ile 1,18 W/m·K aralığına yükselmiştir. Fiziksel olarak, bir malzemenin boşluk oranı azaldıkça ve yoğunluğu arttıkça, ısıyı iletme kapasitesi yani kondüksiyon derecesi de artmaktadır bu durumda ise yalıtım özelliği azalmaktadır. Bu sonuçlar, LC³ kagir harçlarının bu kapsamda bir ısı yalıtım malzemesi olarak değil, kagir birimlerde sadece sıva bileşeni olarak değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Su buharı geçirgenliği açısından değerlendirildiğinde ise TS EN 1745(Anonim, 2020) standardı, PÇ ve kireç esaslı kagir harçlar için yoğunluktan bağımsız olarak karakteristik bir difüzyon direnç faktörü aralığı ($\mu = 15/35$) belirtmektedir. Bu değer hem referans hem de LC³ esaslı kagir harçların, yapı fiziki açısından su buharını geçirebilecek nitelikte malzemeler sınıfında yer alabileceğini teyit etmektedir. Sonuç olarak LC³ kagir harçları, referans harçlara göre daha yüksek ısı iletkenlik katsayısına sahip olsa da bu durum malzemenin daha iyi kagir harç özelliklerinin doğal bir sonucudur. Kagir yapı tasarımında, bu harçların hazır sıvalara kıyasla görece daha fazla ısı iletkenliğine sahip olması uygun yalıtım malzemeleri veya boşluklu tuğla kullanımı ile dengelenebilecek ve referans ısı iletkenlik değerleri sağlanabilecek niteliktedir.

4.2.7. Kagit Harçların Yangına Tepki Sınıflandırması

Yapı malzemelerinin yangın sırasındaki davranışı, binaların yangın güvenliği açısından kritik bir parametredir. TS EN 13501-1(Anonim, 2019) standardına göre yapı malzemeleri, yanıcılık özelliklerine göre A1'den F'ye kadar sınıflara ayrılmaktadır. Bu sınıflandırmada A1 sınıfı, hiç yanmaz malzemeleri temsil etmekte olup, bu malzemeler yangın sırasında alevlenmeye katkıda bulunmaz ve duman oluşturmazlar. Literatürde yığma yapı birimlerinin yangın davranışı incelendiğinde, inorganik kökenli malzemelerin genellikle en güvenli sınıfta yer aldığı görülmektedir. Örneğin, İstegün ve diğ., (2019) tarafından yürütülen çalışmada, düşey delikli tuğla ve bims birimlerin yangına dayanım sınıfı herhangi bir organik bileşen içermemeleri nedeniyle A1 olarak rapor edilmiştir. Genel olarak kütlece %1'den az organik madde içeren tuğla, taş, beton ve harç gibi mineral esaslı malzemeler test edilmesine gerek duyulmadan doğrudan A1 sınıfı olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan LC³ esaslı kagit harçlar ve kagit birimleri, tamamen mineral kökenli bileşenlerden oluşmaktadır. LC³ sisteminin üretiminde kullanılan hammaddelerin inorganik yapısı ve pişmiş kil tuğlanın üretim sürecinde yüksek sıcaklıklara maruz kalmış olması bu malzemelerin yanıcı bir etki oluşturmamasını engellemektedir. Dolayısıyla, bu tez çalışmasında geliştirilen kagit harçların hepsi TS EN 13501-1(Anonim, 2019) standardı kapsamında A1 sınıfında değerlendirilmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Türkiye menşeli düşük kaliteli kiler kullanılarak üretilen kireçtaşı kalsine kil çimentosu (LC^3) esaslı genel amaçlı ve ince katmanlı kagir harçların, ticari ürün olarak mevcut PÇ ve kireç esaslı referans hazır sıva kagir harçlarla karşılaştırmalı performansı kapsamlı bir deneysel program ile değerlendirilmiştir. Çalışmada, kagir bağlayıcı sisteminde PÇ oranı %10 seviyesine kadar düşürülmüş ve kalsine kil, kireçtaşı tozu ve alçıtaşı tozu bileşenlerinden oluşan düşük klinkerli bir bağlayıcı sistem geliştirilmiştir. Bu yönüyle tez çalışması, hem PÇ endüstrisinin karbon azaltım hedefleriyle hem de ulusal hammadde kaynaklarının verimli kullanımına yönelik stratejilerle uyum içerisindedir.

- Taze kagir harç özellikleri kapsamında elde edilen sonuçlar, LC^3 esaslı karışımların genel olarak işlenebilirlik açısından referans harçlarla uyumlu davranış sergilediğini göstermiştir. Yayılma değerleri, işlenebilirlik süreleri ve hava içeriği ölçümleri, LC^3 bağlayıcısının ince malzeme içeriği ve mineral bileşimi nedeniyle su talebini nispeten artırsa da hibrit öğütme sonrası elde edilen uygun tane boyut dağılımı ve kireçtaşı tozunun dolgu etkisi bu eğilimi dengelemiştir. Sonuç olarak LC^3 kagir harçlarının kıvam özellikleri TS EN 998-2 gerekliliklerini karşılamıştır. Klorür içeriği deneylerinde, LC^3 kagir karışımlarında referansa karışımlara kıyasla kısmi bir artış gözlenmiştir. Ancak tüm değerler donatısız kagir harçlar kullanılabilir durumdadır.
- Sertleşmiş kagir harç özelliklerine ait sonuçlar, LC^3 kagir harçların mekanik performans açısından uygulanabilir bir alternatif olduğunu göstermektedir. Birim hacim kütle sonuçları, LC^3 kagir harçlarında tane paketleme etkinliğinin ve mikroyapı yoğunluğunun arttığını göstermiştir. LC^3 genel amaçlı kagir harçlarda 28 günlük basınç dayanımları ortalama 6,7 MPa ve 7,5 MPa aralığında gerçekleşmiş ve referans kagir karışımlarla (7,0 MPa) benzer sonuçlara sahiptir. İnce katmanlı LC^3 kagir harçlarında elde edilen 28 günlük dayanımlar ise 5,9 MPa ile 7,2 MPa aralığında olup genel amaçlı kagir harçlarda olduğu gibi referans karışımlarla (6,4 MPa) benzer düzeydedir.
- Kapiler su emme katsayılarında LC^3 kagir harçlarında referansa kıyasla sınırlı bir artış gözlenmiş olsa da sonuçlar LC^3 bağlayıcıları açısından referans kagir karışımlarla karşılaştırılabilir düzeydedir. Bununla birlikte eğilme bağ

dayanımı ve başlangıç kayma dayanımı sonuçları, LC³ kagir harçlarının özellikle ince tabakalı uygulamalarda yüksek aderans performansı sunduğunu göstermektedir. Deneysel kayma dayanımı sonuçlarında, LC³/DKK-2 karışımının sürtünme katsayısı ve karakteristik bağ dayanımı referans karışımlara göre yüksek elde edilmiştir. Bu durum, LC³ sistemlerinde oluşan yoğun C-A-S-H ve karboalüminat fazlarının kagir birim ile kagir harç ara yüzeyinde daha güçlü bir mekanik kenetlenme oluşturabileceğini göstermektedir.

- Isı iletkenliği, su buharı geçirgenliği ve yangına tepki performansı açısından LC³ kagir harçlarının referans kagir harçlarla benzer davranış sergilediği ve TS EN 998-2 sınır değerleri kapsamında olduğu belirlenmiştir. LC³ harçlarında daha iyi bir mikroyapı yoğunluğu, ısı iletiminde kısmi bir artış eğilimi yaratmış olmasına rağmen ince tabakalı harçlarda fark düşük düzeyde kalmıştır. Su buharı geçirgenliği açısından LC³ kagir harçlarının duvar kesitlerinde nem transferine engel teşkil etmediği bu nedenle iç ve dış sıva uygulamaları ile benzer bileşenler içerdiği de belirtilmesi gereken bir diğer sonuçtur.

Genel olarak bu çalışma, düşük kaliteli kil kaynaklarının termal aktivasyon ve hibrit öğütme yöntemleri ile LC³ kagir harç karışımlarına dönüştürülmesinin teknik olarak mümkün olduğunu ve bu bağlayıcılarla üretilen kâgir harçların hem mekanik hem de dayanıklılık açısından uygulanabilir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. PÇ içeriği %10 seviyesine kadar düşürülmüş kagir harçların dahi daha yüksek PÇ ve polimerik kimyasal katkı içeren referans hazır sıva ürünlerle benzer performans elde etmesi, LC³ bağlayıcılarının PÇ'nin yoğun bir şekilde kullanıldığı uygulama alanlarından biri olan bu alanda da sürdürülebilir ve daha fazla geliştirilebilir özelliklerini barındırmaktadır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular ışığında, ileriye dönük olarak LC³ kagir harç karışımlarının geliştirilmesi ve endüstriyel ölçekte uygulanması için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Düşük kaliteli killerin LC³ kagir karışımlarındaki performansı büyük ölçüde mineralojik bileşime bağlıdır. Çalışmada kullanılan DKK-1 ve DKK-2 killeri, özellikle kaolinit içeriği açısından farklılık göstermektedir ve bu fark mekanik ve reolojik performansa doğrudan yansımıştır. Farklı bölgelerden temin edilen killerin XRD, TGA, FTIR ve yüzey alanı analizlerinin kapsamlı şekilde

değerlendirilmesi daha etkin LC³ kagir harç tasarımlarını optimize etmek için önem arz etmektedir.

- Bu çalışmadaki ön araştırmalarda 650 °C'nin her iki kil için düşük kaliteli killeri için uygun sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Ancak farklı killerdeki mineralojik değişimler optimum aktivasyon sıcaklığının farklılaşmasına neden olabilir.
- LC³ kagir bağlayıcılarının tane dağılımı özellikle erken yaş dayanımını etkilemektedir. Öğütme sürelerinin, bilya dağılımının ve malzeme besleme sırasının modellenmesi, enerji tüketimi ve tane dağılımı ilişkilerinin kurulması daha sürdürülebilir üretim potansiyeli sunmaktadır.
- LC³ sistemlerinde yüksek ince malzeme içeriği nedeniyle su talebi artabilmektedir. Bu tez çalışmasında sadece toz halde katı polikarboksilat katkıları kullanılmıştır. Katı halde toz katkıların kullanılma amacı gerektiğinde geliştirilen LC³ esaslı kagir harçlarının tıpkı hazır sıva harçları gibi tek bileşenli üretilebilecek nitelikte tasarlanmasıdır. Ancak optimum dozaj, priz süreleri ve reolojik kararlılık açısından diğer toz kimyasal katkıları da detaylı olarak değerlendirilmelidir.
- Bu tezde kagir harçlara yönelik standartların gerektirdiği bütün temel mekanik ve fiziksel özellikler değerlendirilmiştir. Ancak LC³ kagir harçlarının ileri yaştaki yapısal kararlılığının, karbonatlaşma, donma-çözülme, sülfat etkileşimi gibi çevresel etkilerle ileriye dönük olarak LC³ kagir harçları özelinde test edilmelidir.
- Başlangıç kayma dayanımına ait parametreler LC³ sistemlerinin yüksek aderans performansı sunduğunu kagir birim ile olan deneylerde de göstermektedir. Ancak elde edilen bulgular, yapısal olarak da tam ölçekli yığma duvar deneyleri, diyagonal basınç deneyi, yatay yük altında döngüsel davranış testleri ve ara yüzey analizleri ile de doğrulanabilir.
- Sadece %10 PÇ içeren LC³ kagir bağlayıcılarının en güçlü yönlerinden biri çevresel etkiye yönelik kazanımlardır. İleriye dönük olarak bu çevresel etkileri sayısal olarak ifade etmek adına, sırasıyla kg CO₂-eşdeğeri başına performans değerlendirmesi, hammadde tedarik zincirinin analizi ve endüstriyel üretim maliyet analizleri de bu kagir harçların yaygın etkisini daha fazla arttırabilir.

KAYNAKLAR

- Askarinejad, A., Pourkhorshidi, A. R., and Parhizkar, T. (2012). Evaluation of the pozzolanic reactivity of sonochemically fabricated nano natural pozzolan. *Ultrasonics Sonochemistry*, 19(1), 119–124. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2011.05.005>
- Altuntaş, İ. O. (2024). Farklı tür kil kaynaklarının kireçtaşı kalsine kil çimentolu (LC3) harçların taze ve mekanik özelliklerine etkileri (Yüksek lisans tezi). Konya Teknik Üniversitesi.
- Alujas, A., Fernández, R., Quintana, R., Scrivener, K. L., and Martirena, F. (2015). Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. *Applied Clay Science*, 108, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.028>
- Andrew, R. M. (2018). Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2017. *Earth System Science Data*, 10(4), 2213–2239. DOI:10.5194/essd-2019-152
- Antoni, M., Rossen, J., Martirena, F., and Scrivener, K. (2012). Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cement and Concrete Research*, 42(12), 1579–1589. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2012.09.006>
- Argın, G. (2019). Calcined clays as supplementary cementing materials for sustainable concrete (Master's thesis). Abdullah Gül University, Graduate School of Engineering and Science.
- ASTM International. (2024). Standard specification for woven wire test sieve cloth and test sieves (ASTM E11-24).
- Avet, F., and Scrivener, K. (2018). Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3). *Cement and Concrete Research*, 107, 124–135. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.016>
- Avet, F., Snellings, R., Alujas Diaz, A., Ben Haha, M., and Scrivener, K. (2016). Development of a new rapid, relevant and reliable (R³) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cement and Concrete Research*, 85, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.015>
- Barattucci, S., Sarhosis, V., Bruno, A. W., D'Altri, A. M., de Miranda, S., and Castellazzi, G. (2020). An experimental and numerical study on masonry triplets subjected to monotonic and cyclic shear loadings. *Construction and Building Materials*, 254, 119313. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119313>
- Bayraç, H. (2010). Enerji kullanımının küresel ısınmaya etkisi ve önleyici politikalar. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 11(2), 229–259

- Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., and Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 51, 142–161. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.049>
- Berriel, S. S., Favier, A., Domínguez, E. R., Machado, I. S., Heierli, U., Scrivener, K., and Habert, G. (2016). Assessing the environmental and economic potential of limestone calcined clay cement in Cuba. *Journal of Cleaner Production*, 124, 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.125>
- Blouch, N., Rashid, K., Zafar, I., Ltifi, M., and Ju, M. (2023). Prioritization of low-grade kaolinite and mixed clays for performance evaluation of limestone calcined clay cement (LC3): Multi-criteria assessment. *Applied Clay Science*, 243, 107080. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.107080>
- Briceño, C., Azenha, M., Vasconcelos, G., and Lourenço, P. B. (2024). Influence of conditioning of clay bricks over shear strength of brick masonry. *Journal of Building Engineering*, 82, 108138. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108138>
- Briki, F. Avet, M. Zajac, P. Bowen, M.B. Haha, K. Scrivener, Understanding of the factors slowing down metakaolin reaction in limestone calcined clay cement (LC³) at late ages, *Cement and Concrete Research* 146 (2021) 106477. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106477>
- Chen, Y. F., Wang, M. C., and Hon, M. H. (2004). Phase transformation and growth of mullite in kaolin ceramics. *Journal of the European Ceramic society*, 24(8), 2389–2397. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00631-9](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00631-9)
- De Weerd, K., Haha, M. B., Le Saout, G., Kjellsen, K. O., Justnes, H., and Lothenbach, B. (2011). Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. *Cement and Concrete Research*, 41(3), 279–291. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.014>
- Dhandapani, Y., Sakthivel, T., Santhanam, M., Gettu, R., and Pillai, R. G. (2018). Mechanical properties and durability performance of concretes with limestone calcined clay cement (LC³). *Cement and Concrete Research*, 107, 136–151. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.005>
- Dill, H. G. (2016). Kaolin: Soil, rock and ore: From the mineral to the magmatic, sedimentary and metamorphic environments. *Earth-Science Reviews*, 161, 16–129. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.003>
- Dulce E. Valdez Madrid, Natalia M. A., Veerle B., Nele De Belie, Veerle C., Effect of cement content on the pore structure and imbibition rate of lime-cement mortars, *Cement and Concrete Composites*, Volume 165,2026, 106352,ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2025.106352>
- Fernandez, R., Martirena, F., and Scrivener, K. L. (2011). The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and

- montmorillonite. *Cement and Concrete Research*, 41(1), 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.09.013>
- Frías, M., and Cabrera, J. (2000). Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin–cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 30, 561–569. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00203-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00203-9)
- Global Cement and Concrete Association. (2021). Concrete future: The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete (GCCA Concrete Future 2050 Roadmap). Global Cement and Concrete Association. <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW.pdf>
- Gettu, R., Patel, A., Rathi, V., Prakasan, S., Basavaraj, A. S., Palaniappan, S., and Maity, S. (2016, November). Sustainability assessment of cements and concretes in the Indian context: Influence of supplementary cementitious materials. In N. Ghafoori, P. Claisse, E. Ganjian and T. R. Naik (Eds.), *Proceedings of the Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies (SCMT4) (Paper S299)*. Las Vegas, USA. DOI:10.18552/2016/SCMT4S299
- Gilfillan, D., and Marland, G. (2021). CDIAC-FF: Global and national CO₂ emissions from fossil fuel combustion and cement manufacture, 1751–2017. *Earth System Science Data*, 13(3), 1667–1680. <https://doi.org/10.5194/essd-13-1667-2021>
- Gruner, J. W. (1932). The crystal structure of kaolinite. *Zeitschrift für Kristallographie – Crystalline Materials*, 83(1–6), 75–88.
- R. Mejía De G. J. Torres. C. Vizcayno and R. Castello (2008). Influence of the calcination temperature of kaolin on the mechanical properties of mortars and concretes. *Applied Clay Science*, 42(1–2), 119–124. <https://doi.org/10.1180/claymin.2008.043.2.02>
- Gümüşsoy, M. (2019). Geri dönüştürülmüş agregaların harç özelliklerine etkisi (Yüksek lisans tezi). Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hay, R., Li, L., and Celik, K. (2022). Shrinkage, hydration, and strength development of limestone calcined clay cement (LC³) with different sulfation levels. *Cement and Concrete Composites*, 127, 104403. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104403>
- He, C., Osbaeck, B., and Makovicky, E. (1995). Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects. *Cement and Concrete Research*, 25(8), 1691–1702. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00165-4](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00165-4)
- Her, S., Im, S., Liu, J., Suh, H., Kim, G., Sim, S., Wi, K., Park, D., and Bae, S. (2024). Exploring the potential of pulverized oyster shell as a limestone substitute in

- limestone calcined clay cement (LC3) and its implications for performance. *Construction and Building Materials*, 425, 135918. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135918>
- Ihekwe, G., Shondo, J., Orisekeh, K., Kalu-Uka, G., Nwuzor, I. C., and Onwualu, P. (2020). Characterization of certain Nigerian clay minerals for water purification and other industrial applications. *Heliyon*, 6(5), e03783. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03783>
- Izumi, Y., Iizuka, A., and Ho, H. J. (2021). Calculation of greenhouse gas emissions for a carbon recycling system using mineral carbon capture and utilization technology in the cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127618. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127618>
- İstegün, B., Subaşı, A., and Çelebi, E. (2019). Sismik tekstil ile güçlendirilmiş düşey delikli yığma tuğla ve bims blokların üç noktalı kesme deneyi. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(2), 222–228.
- Kadıoğlu, M. (2008). Küresel iklim değişimi ve Türkiye: bildiğiniz havaların sonu. Güncel Yayıncılık.
- Koutas, L. N., and Bournas, D. A. (2020). Confinement of masonry columns with textile-reinforced mortar jackets. *Construction and Building Materials*, 258, 120343. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120343>
- Krishnan, S., and Bishnoi, S. (2020). A numerical approach for designing composite cements with calcined clay and limestone. *Cement and Concrete Research*, 138, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106232>
- Li, L., Xie, J., Zhang, B., Feng, Y., and Yang, J. (2023). A state-of-the-art review on the setting behaviours of ground granulated blast furnace slag- and metakaolin-based alkali-activated materials. *Construction and Building Materials*, 368, 130389. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130389>
- Li, Z. (2011). *Advanced concrete technology*. Wiley. DOI:10.1002/9780470950067
- Mermerdaş, K., Gesoğlu, M., Güneyisi, E., and Özturan, T. (2012). Strength development of concretes incorporated with metakaolin and different types of calcined kaolins. *Construction and Building Materials*, 37, 766–774. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.077>
- Moropoulou, A., Bakolas, A., and Aggelakopoulou, E. (2001). The effects of limestone characteristics and calcination temperature on the reactivity of quicklime. *Cement and Concrete Research*, 31(4), 633–639. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00490-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00490-7)
- Newman, J., and Choo, B. S. (Eds.). (2003). *Advanced concrete technology: Constituent materials* (Vol. 1). Elsevier.

- Overmann, S., Vollpracht, A., and Matschei, T. (2024). Reactivity of calcined clays as SCM—A review. *Materials*, 17(2), 375. <https://doi.org/10.3390/ma17020312>
- Özdemir, A., Pınarlık, M., and Ercan, E. (2017). Sürdürülebilir binalar için dünyada uygulanan devlet teşvikleri ve uygulamaların incelenmesi. *TÜBAV Journal of Science*, 10(1), 1–52.
- Phung, C. M., Kaewmanee, K., and Tangtermsirikul, S. (2021). Curing sensitivity of mortars containing cement, calcined clay, fly ash, and limestone powder. *Engineering Journal*, 25(6), 87–96. <https://doi.org/10.4186/ej.2021.25.6.87>
- Ramezani pour, A. A. (2013). *Cement replacement materials: Properties, durability, sustainability*. Springer
- Rocha, J., and Klinowski, J. (1990). ^{29}Si and ^{27}Al magic-angle-spinning NMR studies of the thermal transformation of kaolinite. *Physics and Chemistry of Minerals*, 17(2), 179–186. DOI:10.1007/BF00199671
- Sabir, B. B., Wild, S., and Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 23(6), 441–454. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5)
- Sánchez-Berriel, S., Cancio-Díaz, Y., Sánchez-Machado, I. R., Martirena-Hernández, J. F., Rosa-Domínguez, E. R., and Habert, G. (2020, April). Impacts assessment of local and industrial LC^3 in Cuban context: Challenges and opportunities. In K. L. Scrivener, R. Snellings, and B. Lothenbach (Eds.), *Calcined clays for sustainable concrete: Proceedings of the 3rd international conference on calcined clays for sustainable concrete* (pp. 263–270). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-2806-4_30
- Santhanam, M., Dhandapani, Y., Gettu, R., and Pillai, R. (2020). Perspectives on durability of blended systems with calcined clay and limestone. In K. L. Scrivener, R. Snellings, and B. Lothenbach (Eds.), *Calcined clays for sustainable concrete* (RILEM Bookseries, Vol. 25, pp. 581–591). Springer. DOI:10.1007/978-981-15-2806-4_65
- Scrivener, K. L., John, V. M., and Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low- CO_2 cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Scrivener, K., Avet, F., Maraghechi, H., Zunino, F., Ston, J., Hanpongpan, W., & Favier, A. (2019). Impacting factors and properties of limestone calcined clay cements (LC^3). *Green Materials*, 7(1), 3–14. <https://doi.org/10.1680/jgrma.18.00029>

- Segura, J., Pelà, L., and Roca, P. (2018). Monotonic and cyclic testing of clay brick and lime mortar masonry in compression. *Construction and Building Materials*, 193, 453–466. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.198>
- Shanmugavel, D., Dubey, R., and Ramadoss, R. (2020). Use of natural polymer from plant as admixture in hydraulic lime mortar masonry. *Journal of Building Engineering*, 30, 101252. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101252>
- Sharma, M., Bishnoi, S., Martirena, F., and Scrivener, K. (2021). Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Research*, 149, 106564. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106564>
- Sousa, V., and Bogas, J. A. (2021). Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. *Journal of Cleaner Production*, 306, 127277. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127277>
- Sposito R, Maier M, Beuntner N, Thienel C, Physical and mineralogical properties of calcined common clays as SCM and their impact on flow resistance and demand for superplasticizer, *Cement and Concrete Research* 154 (2022) 106743. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106743>
- Sun, J., Zunino, F., and Scrivener, K. (2024). Hydration and phase assemblage of limestone calcined clay cements (LC3) with clinker content below 50%. *Cement and Concrete Research*, 177, 107417. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107417>
- Türk Standardları Enstitüsü. (2006). *Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile) (TS EN 1015-3)*.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2000). *Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 7: Taze harcın hava muhtevasının tayini (TS EN 1015-7)*.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2000). *Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 9: Taze harcın işlenebilir ve düzeltilme süresinin tayini (TS EN 1015-9)*.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2001). *Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 10: Sertleşmiş harcın boşluklu kuru birim hacim kütlelerinin tayini (TS EN 1015-10)*.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2020). *Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 11: Sertleşmiş harcın eğilme ve basınç dayanımının tayini (TS EN 1015-11)*.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2002). *Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 17: Taze harçlarda suda çözünabilir klorür muhtevasının tayini (TS EN 1015-17)*.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2004). *Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 18: Sertleşmiş harcın kılcal (kapiler) su emme katsayısının tayini (TS EN 1015-18)*.
- Türk Standardları Enstitüsü. (2017). *Kagir harcı- Özellikler- Bölüm 2: Örgü harcı (TS EN 998-2)*.

- Türk Standardları Enstitüsü. (2002). Kagit- Deney metotları- Bölüm 3: Başlangıç kayma dayanımının tayini (TS EN 1052-3).
- Türk Standardları Enstitüsü. (2006). Kagit- Deney metotları- Bölüm 5: Bağ dayanımının yapışma sıyırma (bond wrench) metoduyla tayini (TS EN 1052-5).
- Türk Standardları Enstitüsü. (2020). Kagit ve kagit ürünleri- Isıl özelliklerin tayini için metotlar (TS EN 1745).
- Türk Standardları Enstitüsü. (2019). Yapı mamulleri ve yapı elemanları- Yangın sınıflandırması- Bölüm 1: Yangın karşısındaki davranış deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak sınıflandırma (TS EN 13501-1).
- Vance, K., Aguayo, M., Oey, T., Sant, G., and Neithalath, N. (2013). Hydration and strength development in ternary Portland cement blends containing limestone and fly ash or metakaolin. *Cement and Concrete Composites*, 39, 93–103. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.028>
- Wang, L., Chen, M. L., and Tsang, D. C. W. (2020). Green remediation by using low-carbon cement-based stabilization/solidification approaches. In *Sustainable remediation of contaminated soil and groundwater* (pp. 93–118). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817982-6.00005-7>
- Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J., and Forssberg, E. (2008). Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. *Cement and Concrete Composites*, 30(4), 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.08.008>
- Zhao, Y., and Zhang, Y. (2023). A review on hydration process and setting time of limestone calcined clay cement (LC3). *Solids*, 4(1), 24–38. <https://doi.org/10.3390/solids4010003>
- Zunino, F., and Scrivener, K. (2018). Reactivity and performance of limestone calcined-clay cement (LC3) cured at low temperature. In *Calcined Clays for Sustainable Concrete* (RILEM Bookseries, Vol. 16, pp. 514–520). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_82
- Zunino, F., and Scrivener, K. (2019). The influence of the filler effect on the sulfate requirement of blended cements. *Cement and Concrete Research*, 126, 105918. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105918>
- Zunino, F. (2020). Limestone calcined clay cements (LC3): Raw material processing, sulfate balance and hydration kinetics (Doctoral thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne). EPFL Thesis No. 8173.
- Zunino, F., and Scrivener, K. (2022). Microstructural developments of limestone calcined clay cement (LC3) pastes after long-term (3 years) hydration. *Cement and Concrete Research*, 153, 106693. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106693>

Zunino, F., and Scrivener, K. (2024). Reactivity of kaolinitic clays calcined in the 650° C–1050° C temperature range: towards a robust assessment of overcalcination. *Cement and Concrete Composites*, 146, 105380. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105380>

