

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAZEİNİN HİDROLİK KİREÇ HARÇLARININ TAZE VE
SERTLEŞMİŞ HALDEKİ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Almina İNAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Malzemeleri Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Serhan ULUKAYA

Kasım, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KAZEİNİN HİDROLİK KİREÇ HARÇLARININ TAZE VE
SERTLEŞMİŞ HALDEKİ ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Almina İNAN tarafından hazırlanan tez çalışması 05.11.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemeleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Serhan ULUKAYA
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Serhan ULUKAYA, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Didem OKTAY, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Büşra AKTÜRK, Üye
İstanbul Bilgi Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Serhan ULUKAYA sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Kazeinin Hidrolik Kireç Harçlarının Taze ve Sertleşmiş Haldeki Özelliklerine Etkisi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Almina İNAN

İmza



Aileme

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın başından sonuna, değerli bilgi ve birikimlerini esirgemeyen, engin görüşleri ile beni yönlendiren danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Serhan ULUKAYA'ya saygılarımı ve sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvarda yürüttüğüm deneylere değerli fikirleri ve yardımları ile katkıda bulunan laboratuvar teknisyenimiz sayın Halil YAVAŞCI'ya, tüm çalışma ve eğitim hayatım boyunca beni maddi, manevi destekleyen sevgili aileme, varlıkları ile beni onurlandıran, bana her şartta ve koşulda inanan değerli arkadaşlarım Dilara Begüm AKIN, Bengisu AKIN ve Ogün KAN'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Almina İNAN

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iv
SİMGE LİSTESİ	xi
KISALTMA LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xi
TABLO LİSTESİ	xiv
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	2
2 HARÇLAR	3
2.1 Tarihi Tapıların Onarımında Harçın Önemi	4
3 KİREÇ	6
3.1 Hava Kireci	9
3.2 Hidrolik Kireç	10
4 KAZEİN	11
4.1 Kazeinin Üretimi	12
4.2 Kazeinin Tarihi Harç ve Sıvalarda Kullanımı	13
4.3 Kazeinin Harç Özelliklerine Etkisi	14
5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	17
5.1 Kullanılan Malzemeler	17
5.1.1 Kazein	17
5.1.2 Doğal Hidrolik Kireç	17
5.1.3 İnce Agrega (Kum)	18
5.1.4 Sönmüş Hava Kireci	19
5.2 Üretim Süreci	19
5.3 Taze Hal Özelliklerinin Belirlenmesi	21
5.3.1 Taze Harçların Kıvamının Belirlenmesi	21
5.3.2 Taze Harçların Birim Hacim Kütlesinin Belirlenmesi	22
5.3.3 Priz Süresinin Belirlenmesi	22

5.3.4	Reolojik Analiz	23
5.4.	Sertleşmiş Hal Özelliklerinin Belirlenmesi	26
5.4.1	Eğilme ve Basınç Dayanımı Deneyleri	26
5.4.2	Kılcallık Deneyi	29
5.4.3	Su Emme Deneyi	30
5.4.4	Aderans Deneyi	30
6	DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	31
6.1	Yayılma Çapı Deneyi Sonuçları	31
6.2	Birim Hacim Kütle Deneyi Sonuçları	32
6.3	Priz Deneyi Sonuçları	33
6.4	Reolojik Analiz Sonuçları	33
6.5	Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları	38
6.6	Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları	40
6.7	Kılcallık Deneyi Sonuçları	42
6.8	Su Emme Deneyi Sonuçları	44
6.9	Aderans Deneyi Sonuçları	45
7	SONUÇ	47
	KAYNAKÇA	49
	EK A KILCALLIK KATSAYISI ANALİZ GRAFİKLERİ	52
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	62

SİMGE LİSTESİ

γ	Açısal Yer Değiştirme
a_s	Ağırlıkça Su Emme oranı
A	Alan
f_c	Basınç Dayanımı
p	Boşluk Oranı
f_e	Eğilme Dayanımı
Q_i	Emilen Su Miktarı
W_o	Etüv Kuru Ağırlık
γ	Gerçek Yoğunluk
β	Görünür Yoğunluk
h_s	Hacimce Su Emme Oranı
τ	Kayma Gerilmesi
P_k	Kırma Yüğü
F	Kuvvet
V_{net}	Net Hacim
D_{ort}	Ortalama Yayılma Çapları
W_{sh}	Suya Doygun Havadaki Ağırlık
W_{ss}	Suya Doygun Sudaki Ağırlık
η	Viskozite
dx	Yatay Yer Değiştirme
t	Zaman

KISALTMA LİSTESİ

CCP	Kolloidal Kalsiyum Fosfat
FDA	Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi
GRAS	Güvenli Olarak Tanınan Maddeler
ICOMOS	Uluslararası Anıtlar ve Sitler Konseyi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 5.1 Kullanılan Kumun Tane Boyu Dağılımı	18
Şekil 5.2 Kazeinin Karışım Suyu İçinde Karıştırılması	19
Şekil 5.3 Harç Üretiminde Kullanılan Pan Tipi Mikser	21
Şekil 5.4 Yayılma Deneyi.....	21
Şekil 5.5 Boşluklu Birim Hacim Kütle Deneyi	22
Şekil 5.6 Priz Süresi Deneyi	23
Şekil 5.7 Kuvvetten Kaynaklanan Deformasyon	23
Şekil 5.8 Gerilme Plato Yöntemi.....	24
Şekil 5.9 Rasyonel Reometre.....	25
Şekil 5.10 Reoloji Deneyinde Kullanılan Aparatlar	25
Şekil 5.11 Nem Kabini	26
Şekil 5.13 Eğilme Deneyi.....	27
Şekil 5.14 Tek Eksenli Basınç Deneyi	28
Şekil 5.15 Kırık Prizma Numuneler ile Tek Eksenli Basınç Deneyi.....	28
Şekil 6.1 Yayılma Çapı Deney Sonuçları.....	31
Şekil 6.2 Birim Hacim Kütle Deney Sonuçları.....	32
Şekil 6.3 Priz Deneyi Sonuçları.....	33
Şekil 6.4 R Serisinin Kayma Gerilmesi-Kayma Hızı Grafikleri	33
Şekil 6.5 C0,5 Serisinin Kayma Gerilmesi-Kayma Hızı Grafikleri	34
Şekil 6.6 C0,75 Serisinin Kayma Gerilmesi-Kayma Hızı Grafikleri	34
Şekil 6.7 C1 Serisinin Kayma Gerilmesi-Kayma Hızı Grafikleri	34
Şekil 6.8 C1,5 Serisinin Kayma Gerilmesi-Kayma Hızı Grafikleri	35
Şekil 6.9 C2 Serisinin Kayma Gerilmesi-Kayma Hızı Grafikleri	35
Şekil 6.10 Serilerin Vizkozite Değerleri	36
Şekil 6.11 Çöken Katı Malzemenin Görüntüsü	36
Şekil 6.12 Serilerin Eşik Kayma Gerilmesi Değerleri.....	37
Şekil 6.13 Yayılma Çapı İle Eşik Kayma Gerilmesi Arasındaki İlişki	37
Şekil 6.14 Eğilme Deneyi Sonuçları.....	39
Şekil 6.15 Küp Numunelerde Basınç Deneyi Sonuçları.....	41
Şekil 6.16 Kırık Prizma Numunelerde Basınç Deneyi Sonuçları	41
Şekil 6.17 Kılcallık Deneyi Sonuçları	43
Şekil 6.18 Kütlece Su Emme Oranları.....	44

Şekil 6.19 Hacimce Su Emme Oranları	45
Şekil 6.20 Aderans Deneyi Sonuçları	46



TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1 Kazeinin ve Diğer Katkı Malzemelerinin Yaklaşık Maliyetleri	14
Tablo 5.1 Kullanılan Kazeinin Kimyasal Kompozisyonu	17
Tablo 5.2 Kullanılan Doğal Hidrolik Kirecin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri ..	18
Tablo 5.3 Harç Karışım Oranları (Kütlece)	20
Tablo 6.1 Yayılma Çapı Deney Sonuçları	31
Tablo 6.2 Eğilme Deneyi Sonuçları	38
Tablo 6.3 Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları.....	40
Tablo 6.4 Kılcallık Deneyi Sonuçları.....	42
Tablo 6.5 Su Emme Deneyi Sonuçları.....	44
Tablo 6.6 Aderans Deneyi Sonuçları	46

Kazeinin Hidrolik Kireç Harçlarının Taze ve Sertleşmiş Haldeki Özelliklerine Etkisi

Almina İNAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Malzemeleri Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Serhan ULUKAYA

Ülkemizin yüzyıllardır birçok medeniyete ev sahipliği yaptığı bilinmektedir. Bu nedenle ki, taşınır veya taşınmaz sayısız kültür varlığımız bulunmaktadır. Ne yazık ki kültürel mirasımız olan birçok yapı ve eser, çevresel faktörler veya ihmaller dolayısıyla gücünü yitirmekte, eskimekte ve yok olmaktadır. Tarihi çevreyi oluşturan kültürel mirasımızı korumak ve özgün nitelikleri ile geleceğimize taşımak, var olan en büyük gayelerimizden biridir. Burada esas olan, eski eserlerin olduğundan daha fazla bozulmasını önlemekle birlikte niteliklerini ve niceliklerini yitirmesine müsaade etmeden sonraki nesillere aktarılmasıdır.

Kazein, etkileşime girmeyen yüksek sayıda prolin peptidinden oluşan, inek sütü ve peynirdeki proteinlerin yaklaşık %80'ini oluşturan bir baskın fosfoproteindir. Tarihi harçlar üzerine yapılan karakterizasyon çalışmalarında, kazeinin özellikle kireç harçlarının taze ve sertleşmiş haldeki bazı özelliklerini geliştirmesi amacıyla kullanıldığı ifade edilmiştir. Yapıştırıcılarda genellikle bir bağlayıcı madde olarak

alışan kazeinin, taze haldeki kireç harçlarında kıvamı iyileştirebildiği, sertleşmiş halde ise yığma birim ile harç arasındaki aderansı arttırdığı görülmüştür. Bu çalışmanın temel amacı, doğal hidrolik kireç esaslı harçlarda kazein kullanımını ile taze haldeki işlenebilirlik ve priz sresindeki değişimi araştırmak; sertleşmiş haldeki harçlarda ise dayanım ve yığma birim ile arasındaki aderanstaki gelişimi takip etmektir. Bunun için bir adet referans kireç harı ve beş adet farklı oranlarda kazein katkılı kireç harı olmak üzere toplam altı adet harç serisi üretilmiş ve yukarıda belirtilen özellikler araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kazein, hidrolik kire harçları, işlenebilirlik, dayanım, aderans.



The Effect of Casein on the Fresh and Hardened Properties of Hydraulic Lime Mortars

Almina İNAN

Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Serhan ULUKAYA

It is well-known that Turkey has hosted many civilizations for centuries. For this reason, there are countless cultural monuments in the country, both movable and immovable. Unfortunately, many buildings and other artefactual monuments that are part of this cultural heritage lose their strength, age and disappear over time due to environmental factors or negligence. Preserving the cultural heritage that makes up the historical environment and leaving it to the future with its original qualities should be one of the main goals of all human beings, especially scientists. The main concern here is to prevent the deterioration of old monuments and to ensure that they remain for future generations without allowing them to lose their quality and quantity.

Casein is a predominant phosphoprotein consisting of a high number of non-interacting proline peptides, accounting for about 80% of the proteins in cow's milk and cheese. In characterization studies on historic mortars, casein has been used to improve some of the properties of lime mortars, especially in the fresh and hardened state. Casein, which usually works as a binding agent in adhesives, has been shown to improve the consistency of fresh lime mortars and to increase the adhesion

between the masonry unit and mortar in the hardened state. The main objective of this study was to investigate the changes in workability and setting time of natural hydraulic lime based mortars in the fresh state with the use of casein, and also to verify the improvement in strength and adherence between the masonry unit and mortar in the hardened state. For this purpose, a total of six mortar series, one reference lime mortar and five lime mortars with casein additives at different ratios, were produced and the above mentioned properties were investigated.

Keywords: Casein, hydraulic lime mortars, workability, strength, adherence.



1.1 Literatür Özeti

Mevcut yapıyı iyileştirme çalışmalarının uygunsuz şekilde gerçekleştirilmesi olumsuz etkilere yol açmaktadır. Bu sebeple mevcut yapının geliştirilmesinde kullanılacak harcın sürekli olmasına, su sızdırmamasına, mevcut harç ve kagır birimlerle uyumlu bir malzeme mukavemetine sahip olmasına dikkat edilmelidir.

Ana maddesi kalker (kalsiyum karbonat, CaCO_3) olan, doğada kireç taşı adı verilen; bünyesinde başka maddeler de içerebilen taşların özel fırınlarda veya basit fırınlarda çalı-çırpı kömür ya da yanıcı bir gaz ile yakılmak suretiyle pişirilmesi sonucu elde edilen ürün “kireç” (kalsiyum oksit, CaO) olarak tanımlanır. Kireç genellikle amorf bir katıdır, sıcaklık etkisiyle ayrışmaz ve yaklaşık $2580\text{ }^\circ\text{C}$ ’da erir [1].

Mekanik özelliklerinin değiştirilmesi için yüzyıllar boyunca harca çeşitli doğal protein malzemeleri eklenmiştir. Bu katkı maddelerinin analizleri hala ciddi bir analitik problem teşkil etmektedir. Analiz edilen örneklerin katı formu, düşük protein konsantrasyonu, yaşlanma sırasında meydana gelen oksidasyon süreçleri, alkalın ortam, mikroorganizmalar tarafından kirlenme, bunlar harçlardaki proteinlerin analizini zorlaştıran farklı etkilere birkaç örnektir [2].

Süt proteinlerinin, sütün asitleştirilerek pıhtılaştırılan bölümüne “kazein” (kazein kompleksi) denir [3]. Kazeinler, laktojenik hormonlara ve diğer uyarıcılara tepki olarak meme bezinde sentezlenen ve sütün benzersiz fiziksel özelliklerinin çoğundan sorumlu olan ‘misel’ adı verilen büyük kolloidal agregatlar olarak salgılanan bir fosfoprotein ailesidir [4].

1.2 Tezin Amacı

Kireç kullanımı çevre kirliliği ile mücadelede, ham ve atık suların şartlandırılması, baca gazları ve belediye çöplerinin arındırılması, kapalı deniz koylarının ıslahı tarihi yapıların onarımı gibi alanlarda yaygındır. Kireç harcı, son derece esnek, nefes alabilen, işlenebilen ve yüksek aderans gösterebilen bir malzemedir. Fakat geleneksel kireç harçlarının, suya direncinin olmaması ve düşük mukavemetli

olması gibi handikapları mevcuttur. Antik çağlardan beri kazeinin kireç harçlarının taze ve sertleşmiş haldeki bazı özelliklerini geliştirmesi amacıyla kullanıldığı bilinmektedir. Ancak kireç harçlarına kazein ilavesinin tarihi yapıların harçlarının onarımında kritik bir özellik olan mukavemet özelliğine ve diğer mekanik özelliklerine etkisi hakkında yeterince bilgi mevcut değildir. Çalışmamızın amacı kazein katkılı kireç harçlarının taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini tayin etmek ve bu özelliklerin iyileşmesi için optimum kazein oranlarını belirlemektir.

1.3 Hipotez

Yapılan literatür araştırması neticesinde, kazeinin belirli oranlarda doğal hidrolik kireç harcı içerisinde katkı maddesi olarak kullanılması durumunda akış özelliklerinde iyileşme ve yığma birim olarak harman tuğlası ile aderansında artış olacağı öngörülmektedir. Oluşacağı düşünülen bu iyileşmelere ek olarak, kazeinin (fiziksel ve kimyasal yapısı gereği) harç içerisindeki boşluk oranını, priz süresini, eğilme ve basınç dayanımını da değiştirebileceği varsayılmaktadır. Bu özelliklerin olumlu-olumsuz hangi yönde değişeceğinin, ayrıca elde edilecek tüm sonuçların kazeinin kullanımına yönelik bir handikap oluşturup oluşturmayacağının yapılacak kapsamlı deneysel çalışmalarla ortaya konması planlanmaktadır.

2 HARÇLAR

Bağlayıcı malzeme, dolgu malzemesi olarak ince agrega ve suyun belirli oranlarda karışımı ile elde edilen, katılaşma özelliğindeki hamurlara “harç” denir. Bir başka tanıma göre ise harç, bağlayıcı malzeme, kum, su ve gerektiğinde katkı maddelerin karıştırılmasından meydana gelmiş, doluluk, mukavemet, geçirimsizlik, aderans ve dış etkilere dayanıklılık gösteren inorganik hamurlardır [5].

Harçlar, bünyelerine giren bağlayıcı madde çeşidine göre isimlendirilir. Bağlayıcı malzeme kil, alçı, kireç veya çimento olabileceği gibi, bunların hibrit olarak kullanılması da söz konusu olabilir.

Harç içerisinde kullanılacak ince agrega (kum), matris içinde boşluksuz bir yapı oluşturmak üzere uygun tane boyut dağılımına sahip olacak şekilde seçilmelidir. İşlenebilirlik açısından yuvarlak şekilli taneler en uygun olarak ifade edilirken; yassı ve uzunlamasına kırılmış taneler harcın işlenebilirliğini azaltırken, boşluklu yapı oluşturarak yoğunluğu düşürür [6]. Harç kumu, doğal, kırma veya bunların karışımı ile elde edilen ve maksimum tane çapı 4mm olan tanelerden oluşmalıdır. İnce agreganın yeterli sertlikte olması, uygulama sırasında ufalanıp parçalanmaması gerekir [7].

Agrega boyutları, harç ve sıvada kullanılacak bağlayıcı miktarı konusunda etkilidir. Küçük boyutta agregaların iri boyutlular arasında homojen olarak dağılmasının sağlandığı, karışım oranlarının uygun şekilde belirlendiği örneklerde, agrega yüzeyini saran bağlayıcı miktarı ve sertleşme ile olan hacim küçülmesi az olup, harcın mukavemeti yüksektir [8].

Harcın dayanımını etkileyen bir diğer unsur ise agreganın biçimidir. Yuvarlak veya köşeli şekle sahip agregalardan, sürtünme miktarını ve buna bağlı aderans arttırması sebebiyle köşeli olanlar tercih edilir [9].

2.1 Tarihi Tapıların Onarımında Harcın Önemi

Çeşitli problemlerin teşhisi ve bu teşhis sonucunda yapılacak olan koruma ve onarım çalışmaları için yapının özgün (orijinal) malzemesinin, doku ve niteliklerinin ve maruz kalacağı çevresel faktörlerin önceden belirlenmesi gereklidir. Yapılacak olan bu teşhisler sayesinde belirlenecek onarım veya koruma malzemesinin yapının özgün malzemesiyle fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin uyumlu olması sağlanmış olur. Böylelikle yapının malzemesi ile müdahale malzemesi birbiri ile bağdaşık şekilde çalışacak ve yapı uzun yıllar dayanıklılığını yitirmeden varlığını devam ettirecektir. Özellikle maruz kalınacak çevresel etkilerin beraberinde getireceği problemler teşhis edilmeden uygulanacak onarım çalışmaları faydadan çok zarar getirecek, bozulma süreci hızlanacak ve yapıda geri dönülmez hasarlara yol açacaktır.

Türkiye’de var olan kültür bilinci oldukça köklü ise de kültürel mirasımız ile ilgili yapılan çalışmalar bazı durumlarda yetersiz kalabilmektedir. Son zamanlarda ülkemizdeki birçok tarihi eser onarılmış ve turizme kazandırılmış olsa da yapının periyodik bakımının yapılması binanın yapım aşamasından itibaren korunması ideal yöntemdir. Düzenli bakım yapının az müdahale ile karakteristik özelliklerinin korumasını sağlayacaktır. Daha kapsamlı onarımın gerektiği durumlarda da onarım öncesi gerekli analizlerin yapılması önem arz etmektedir.

Ülkemizde taş, tuğla ve harç ile yapılmış yığma yapılar sıklıkla tercih edilmiştir ve varlıklarını sürdürmektedir. Bu tür yapılarda kullanılan taşın/tuğlanın kalitesi ve boyutları, harçların karışım oranları ve harcın yığma birim ile uyumu oldukça önem arz etmektedir. Nitelik bakımından uygun olmayan kalitesiz harçlar yapının dayanımını azaltırken; donma çözülme, sıcaklık, su gibi dış etkenler doğal onarım malzemesinin hasar almasına ve yıpranmasına yol açmaktadır.

Malzeme karakterizasyonu için alınacak malzeme örnekleri yapının deforme olmamış kısımlarından alındıktan sonra analiz edilir. Tarihi yapıların korunması, onarımı ve güçlendirilmesi çalışmalarında harç ve sıva malzemelerin ve uygulamanın yapılacağı yapının dokusunun bilinmesi yapının değerlendirilmesi hususunda oldukça önemlidir.

Eski binaları restore etmek ve korumak için yapılan çalışmalarda kireç harcında kullanılan farklı agrega türleri araştırılmıştır. İncelenen harçlarda kuvars kumu (taş ocağı, nehir veya deniz kumu), kalker, kırılmış taş ve seramik parçaları çakıl ve volkanik malzemelere rastlanmıştır. Sonuçlar, kalkerli agregaların silisli olanlardan daha yüksek harç basınç dayanımı üretebileceğini göstermiştir. Literatürde bunun sebebi olarak kalkerlilerin bağlayıcı malzeme ile genellikle daha yüksek aderans göstermesi ve kireç karbonasyonu için çekirdeklenme alanları oluşturması üzerinde durulmaktadır. Volkanik malzemelerin kullanımı, diğer silisli agregalara kıyasla kireç harcının mekanik özelliklerinin bir dereceye kadar güçlendirilmesini ve donma-çözülme direncine sahip olmasını sağlamaktadır. Sonuç olarak, kireç taşları ve volkanik malzemelerin tarihi yapıların onarımında ince agrega olarak kullanmak için silisli agregalardan daha uygun olabileceği öngörülmektedir.

3

KİREÇ

Kireç taşının ($\text{CaCO}_3\text{-CaMg}(\text{CO}_3)_2$) yüksek sıcaklıklarda ($850\text{-}1400^\circ\text{C}$) pişirilmesi sonucu elde edilen, su ile karıştırıldığında tipine göre hava veya suda katılaşma özelliği gösteren beyaz renkli inorganik esaslı bir bağlayıcı türüdür [5]. Deniz ortamında iklim, jeofizik olaylar, deniz seviyesi gibi çevresel etkiler sebebiyle çökmüş olan malzemeler tarafından oluşturulan kireç taşı kalsit, aragonit, dolomit ve manyezit gibi mineraller içebilir [10]. Kara parçasının yaklaşık %10'unu kireç taşı oluşturmaktadır. Kireç taşlarını yüksek kalsiyum içerikli ve dolomitik olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Yüksek kalsiyumlu kireç taşları %97-99 oranında CaCO_3 içerirken, dolomitik kireç taşlarında MgCO_3 oranının % 40-45 aralığında olduğu bilinmektedir. Şekil, iç-yapı ve homojenlik özelliklerine göre yoğunluk ve sertlik özellikleri değişkenlik gösteren kireç taşları kristal yapıdadır ve çok sayıda alt türü bulunmaktadır. Bunların bazıları; bitümlü kireç taşı, tebeşir, kimyasal kireç taşı, demirli kireç taşı, litografik kireç taşı, flux kireç taşı, fosilli kireç taşı, camtaşı, hidrolik kireç taşı, mermer, marl, silikatlı kireç taşı, traverten ve silikatlı kireç taşıdır.

Literatür, bitki özleri, fermente sıvılar gibi çeşitli biyolojik kökenli katkı maddelerinin de kireç esaslı harç üretimlerinde kullanımını ortaya koymaktadır. Örneğin yumurta akı, kaktüs müsilağı, zeytin ve keten tohumu yağı kireç harçlarının hidrofobitesine katkıda bulunmaktadır [11], [12], [13].

Kireç bilinen en eski bağlayıcılardan biridir. Türkiye'de bulunmuş kireç harcı kalıntılarının yaklaşık 14.000 yıl öncesine dayanıyor olmasıyla beraber kireç taşının ilk olarak ne zaman harç yapımında kullanıldığı bilinmemektedir. Kirecin yapı harcında kullanımı üzerine yazılmış en eski yazı, Marcus Vitruvius Pollo isminde bir Romalı mühendisin imparator Augustus döneminde (MÖ 27–MS 14) yazdığı “de Architectura” isimli kitapta bulunmaktadır.

Mısırlılar, dünyanın kireç taşı harikalarından biri olan ve 100 metreden fazla yüksekliğe sahip Keops piramidini M.Ö. 4000 - M.Ö. 3000 yılları arasında inşa

etmek için kireç sıvasını ustalıklı kullanmışlardır [14],[15],[16]. Günümüze kadar ulaşan pek çok klasik Roma yapısı da bunlara örnek olarak gösterilmektedir. Örneğin Roma Kolezyumu, Maison Carrée, Diocletianus hamamları, Roma Merida Tiyatrosu, Roma Pantheon'u bunlardan bazılarıdır. [17]. Kirecin harç içerisinde bağlayıcı olarak kullanımı, eski Yunanlılar tarafından (M.Ö. 2800 - M.S. 1000) da uygulanmıştır. M.Ö. 7500 civarında, şu anda Ürdün toprakları içinde yer alan bölgede kireç ve ısıtma işlem görmemiş kırma kireç taşıdan yapılmış bir sıva bulunmuştur [10]. Çinliler, yüzlerce yıldır ayakta kalan ve hala iyi korunmuş olan 2.500 km uzunluğundaki Çin Seddi'ni inşa ederken taşları birbirine yapıştırmak için kireç harcı kullanmışlardır [18]. Çin Kuzey ve Güney Hanedanlıkları (MS 420-589), üç ana malzemeden (kireç, kum ve kil) ve az sayıda organik katkı maddesinden oluşan yeni bir tür kireç ürünü olan "sanhetu"yu ortaya çıkarmıştır [19],[20],[21]. Çin'e özgü Roma harcı olarak adlandırılan sanhetu, sadece yüksek mukavemete sahip olmakla kalmayıp aynı zamanda sertleştikten sonra su geçirmezlik özelliğine de sahiptir. Bu özel harç türünün Qing hanedanlığı döneminde baraj inşasında kullanıldığı ifade edilmiştir [21].

Geniş boşluk yapısına sahip olan kireç harçlarının, bu boşlukların toplam boşluk içindeki oranının dengede olması sebebiyle, nem ve buhar geçişinin engellenmemesi, çimento harçlarına göre daha iyi olan özellikleridir. Fakat geleneksel kireç harçlarının, sertleşme için hava ile sürekli temas halinde olması gerekliliği, suya direncinin olmaması ve düşük mukavemetli olması kireç harçlarının dezavantajlarıdır [6].

Çimento üretimiyle ilişkili karbondioksit emisyonunun, toplam antropojenik nedenlerin yaklaşık %8'ini oluşturduğu öne sürülmektedir. Sürdürülebilir inşaat, düşük karbon ayak izi ve atmosferden önemli ölçüde CO₂ emebilen malzemeler gerektirir. Kireç, CO₂'yi emme yeteneğine sahip bir malzemedir. Kirecin bağlayıcı olarak priz ve mukavemet kazanma mekanizması, diğer geleneksel malzemelere kıyasla çevre dostudur. Havadaki kireçteki kalsiyum hidroksit (Ca(OH)₂)'in atmosferik karbondioksit CO₂ ile tepkimesi, kalsiyum karbonat CaCO₃ oluşumuyla sonuçlanır.

Kireç taşının rengi safsızlığı hakkında bilgi verir. Kireç taşı yüksek derecede saf ise beyazdır. Gri renk, karbondan kaynaklanan safsızlıkların veya demir sülfürlerinin

bir belirtisidir. Kireç taşı kızıl, sarı veya yeşil renkte ise bu kireç taşıdaki demir ve mangan muhteviyatının işaretidir. Kireç taşı dolomitik bir yapıya sahip ise rengi pembemsi olacaktır. Dolomitik kireç taşı daha sert, daha kırılğanken kireç taşının sertliği genellikle 2-4 Mohs aralığındadır.

Kireç harçları, çimento harçlarından daha yüksek gözeneklilik ile karakterize edilir. Kireç, büyük özgül yüzey alanına sahip bir bağlayıcıdır, ancak özgül yüzey alanı kireç sınıfına, kireç taşının kökenine ve üretim yöntemine bağlı olarak değişir. Kirecin büyük özgül yüzeyi nedeniyle, kireç harçları diğer harçlara kıyasla daha fazla karıştırma suyu gerektirir. Kristalleşme ve karbonatlaşma yoluyla bağlanma ve sertleşmenin bir sonucu olarak, suyun önemli bir kısmı buharlaşır veya duvarcılık alt tabakası tarafından emilir ve onun yerine, çoğunlukla 0,1 µm ile 100 µm arasında çaplara sahip bir gözenek ağı oluşur [22]. Bir çalışma, hidratlı kireç bazlı bir harcın gözenekliliğinin, kireç/kum oranına bağlı olarak %20,4-23,1 aralığında olduğunu ve kum oranı azaldıkça gözenekliliğin arttığını göstermiştir. Gözenekler aracılığıyla nemin emilmesi ve salınması sayesinde kireç harcının kullanımı konforlu bir iç ortam sağlar. Bir araştırmaya göre, 1:3 ve 1:4 hacim oranında kireç/kum oranına sahip hava kireci bazlı harçların açık gözenekliliği %27 ile %35 arasında değişmiştir [23]. Kireç harçları, hidrolik ve puzolanik bileşenlere dayalı harçlara kıyasla daha fazla su emme kabiliyetine sahip olmalarıyla karakterize edilir.

Kireç harcı, son derece esnek, nefes alabilen ve kendi kendini onaran bir malzemedir [24,25]. Kireçlerin diğer bir özelliği de genellikle kagir malzeme ile yüksek aderans göstermesi ve deformasyon kabiliyetlerinin üstünlüğüdür.

Hidrolik kireç harçları için, yüksek su/bağlayıcı oranı gözenekliliği artırır ve genel yapıyı zayıflatır, böylece mekanik özelliklerini azaltır. Su/çimento oranıyla karşılaştırıldığında, agrega türü ve parçacık boyutu hava kireci harcının performansı üzerinde daha büyük bir etkiye sahiptir [26]. Orta veya daha iri agregalar içeren kireç harçları daha iyi mekanik özelliklere sahiptir.

Agrega tipi ve tane boyutunun (kireç harcı) mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, sabit bir su-bağlayıcı oranı korunduğunda belirgin hale gelir. 4 mm tane boyutuna sahip harçla karşılaştırıldığında, 2 mm parçacık boyutuna sahip harç daha düşük

taze kıvama, sertleştirilmiş halde daha küçük gözenek boyutuna ve küçük tane parçacık boyutu ve daha yüksek su talebi nedeniyle daha iyi mekanik özelliklere sahiptir [27]. Özellikle 4 mm'den daha küçük olan tane boyutu, basınç dayanımını iyileştirmek için daha faydalıdır çünkü büyük tane boyutu daha düşük basınç dayanımına yol açan yüksek gözeneklilik oluşturabilir [22]. Daha büyük çakıllar ve kırma taşlar da yüksek basınç dayanımına sahip kireç harcı hazırlamak için uygun değildir. Bununla birlikte, çatlak durdurucu görevi gören 8 mm'den büyük iri agregaların varlığı uzun vadeli dayanım için faydalıdır [28]. Bu nedenle, az sayıda iri agreganın bulunmasına izin verilir. Bağlayıcı oranı ne kadar yüksekse, harcın karbonizasyon hızı o kadar yavaş olur ve bu da harcın mukavemetini artırmada rol oynar. Agreganın tipinin hava kireci harcı özellikleri üzerindeki etkisi su/bağlayıcı oranının etkisinden daha büyüktür. Kireç harcının hazırlanması için agreganın kireç taşı ve volkanik malzemelerin kullanılması, diğer agregalara göre daha uygundur. Kireç harcının basınç dayanımı, harcın yapımında yuvarlak agreganın yerine köşeli agreganın kullanılarak artırılabilir. Farklı bağlayıcı/agrega oranlarının kireç harcının mekanik özellikleri üzerinde belirli bir etkisi vardır, ancak bu etki aynı kürlenme süresinde pek belirgin değildir. Organik veya inorganik katkı maddeleri, kireç harcının özelliklerini çeşitli şekillerde optimize edebilir. Örneğin 20 °C'de, yüksek oranda aktif puzolanik malzemeler içeren kireç harcı, 400 kata kadar daha iyi bir basınç dayanımına sahiptir.

% 100 saf kireç elde etmek için 733 kcal/kg'lık enerji gerekmektedir. Kireç üretimi için birçok farklı tipte ve özellikteki dik fırınlardan faydalanılmaktadır. Ülkemizde kireç primitif çalı ve yamaç ocaklarından başlayıp modern bilgisayar kontrollü fırınlara kadar uzanan bir teknoloji çeşitliliğinde, yılda 4 milyon ton civarında kireç üretilmektedir. En fazla kireç 2 milyon ton ile inşaat sektöründe kullanılmakta olup bunu metalürji ve kimya sektörleri takip etmektedir [29].

3.1 Hava Kireci

Kalsiyum oksit veya hidroksitten oluşan hava kireci atmosferik karbondioksit ile reaksiyona girerek havada sertleşir. Sönmüş ve sönmemiş olmak üzere iki tür hava kireci olduğu bilinmektedir. Sönmemiş kirecin higroskopik özelliği sonucu suyla olan kontrollü reaksiyonu neticesinde sönmüş kuru toz kireç elde edilir. Sönmüş

kireç sönmemiş kirecin su ile reaksiyonu neticesinde oluşan kalsiyum hidroksittir ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Yüksek kalsiyumlu kirecin yanı sıra magnezyum ihtiva eden dolomitik kireç ve sönmüş dolomitik kireç de elde edilmektedir. Hava kirecinin kullanıldığı harçların plastikleşme ve işlenebilme özellikleri oldukça iyidir.

3.2 Hidrolik Kireç

Hidrolik kireç bir sönmemiş kireç türüdür. Su kireci olarak da bilinir. Hidrolik kirecin toz haline getirilmesi su kullanılarak gerçekleştirilir. Kirecin içerisinde yeteri miktarda kalsiyum oksit bulunması, bu işlemin gerçekleştirilmesi için zorunludur. Bu sayede kireç su içerisinde erimez, katı bir hal alır.

Hidrolik kireç, içerisinde karbonat bulunduran doğal kökenli bir üründür. Tarihi yapılarda çatlakların kapatılmasında önemli rol oynamaktadır. Yaygın kullanım alanları kagir kubbeler, kagir duvarlar ve tonoz çatlaklarıdır.

Yapıda harç olarak kullanılacak kireç yağlı, taze ve tam kıvamında pişmiş olmalı toz, toprak, kum, çakıl vb. yabancı maddelerle fazla pişmiş parçaları içinde bulundurmamalıdır. Rengi yeknesak beyaz olmalıdır.

Kazein, sütün kazein proteinleri ve kolloidal kalsiyum fosfat (CCP) içeren polidispers küresel kompleksler şeklinde bulunduğu ana protein bileşenidir [30].

Kazein misellerinin yaklaşık %93'ü (kuru maddenin) kazein ve geriye kalan kısmı inorganik maddeden oluşur. İnorganik maddeler arasında kalsiyum, fosfat, magnezyum, sodyum ve sitrat bulunur. Tipik süt kokusuna sahip beyaz/krem bir tozdur. Kazein, elementel bileşiminde karbon (%53), hidrojen (%7), oksijen (%22), azot (%15,65) ve kükürt (%0,76) ek olarak fosfor (%0,85) da içerdiği için bir fosfoprotein olarak sınıflandırılır. Kazein, pH'ı 4,5 ila 5,8 aralığında olan ve nemi %10'u aşmayan, kuru bazda hesaplanan en az %90 protein içerir.

Kazeinin çözünürlük özelliği düşüktür. Ancak alkali bir ortamda çözeltide, örneğin kalsiyum hidroksitte iyi çözünür ve yapıştırıcı özelliklere sahip bir madde oluşturur. Teknik olarak ahşap ve mobilya yapıştırıcılarının, su bazlı kaplamaların ve kendiliğinden yayılan betonun bir bileşeni olarak kullanılır, yapı malzemelerinde plastikleştirici katkı maddesi olarak görev görür [31].

Kazeinin, düşük dozajda mükemmel dağılım etkinliği gösterir ve sitrat veya tartrat gibi geciktiricilerle iyi uyum sağlar, derz yüzeylerinde benzersiz bir kendi kendini iyileştirme etkisi gösterir. Böylece yüzeydeki herhangi bir bozukluk veya düzensizlik, kendisini düzeltir [32].

Biyopolimer kazein, sütün toplam protein içeriğinin yaklaşık %80'ini oluşturan bir grup farklı fosfoprotein içerir. Üç ana protein fraksiyonu α -, β - ve κ -kazeindir. Esterleşme yoluyla amino asit serisine bağlanan fosfat gruplarının miktarı polielektrolitlerdir. Spesifik olarak, α -kazein 8 ila 13 fosfoseril kalıntısına sahiptir ve tüm kazein proteinleri arasında en yüksek negatif yükü taşır (-24, pH=6,7). β -kazein ise 5 fosfoseril içerir ve pH=6,7 'de -13 net yük sergiler. α - ve β -kazeinden farklı olarak κ -kazein, molekülün her iki ucunda farklı yüklü bölümlere sahiptir ve bu da pH=6,7'de net yükün -3 olmasını sağlar. Bu sayede kazein içeren

süperakışkanlaştırıcının harca adsorbe edilmesi ve dolayısıyla dispersiyon etkisi sağlanır [33].

Yüksek sıcaklığın ve uzun maruz kalma sürelerinin kazein proteinlerinde performanslarını düşüren kimyasal değişikliklere neden olabileceği bulunmuştur. Özellikle, hızlı protein sıvı kromatografisi ve jel permeasyon kromatografisi ile kanıtlandığı gibi kazein biyopolimerinin kısmi ayrışmasının (denatürasyon) eşlik ettiği çapraz bağlanmanın, azalan dispersiyon gücünden sorumlu olduğu bulunmuştur. Optimum kurutma koşulu olarak 110 °C sıcaklık ve 2 saate kadar kısa bir maruz kalma süresi önerilir. Bu durumda nemli kazein tam dağılma gücünü korurken suyunu hızla serbest bırakır. Kazein proteinlerinin sıcaklığa ve maruz kalma süresine bağlı davranışının anlaşılması, daha tutarlı kazein kalitelerinin üretilmesine yardımcı olabilir [33].

4.1 Kazeinin Üretimi

Kireç harçlarıyla ilgili tarihi gelenek ve teknikler, sanayi devriminden sonra birçok Batı ülkesinde neredeyse tamamen kaybolmuştur. Yavaş karbonatlaşma, kireç bazı harçların kullanım oranındaki düşüşün ana nedenlerinden biridir. Karbonatlaşma, harçların daha sert ve dolayısıyla daha dayanıklı hale getirilmesinde temel öneme sahiptir [34]. Bu süreç bağıl nem, sıcaklık ve CO₂ konsantrasyonu gibi birçok faktöre bağlıdır ve normalde portlanditin (Ca(OH)₂) kalsite veya aragonite (CaCO₃) dönüşmesinin neden olduğu kütle artışını içerir. Harcın toplam karbonatlaşmasının yüzyıllar alabileceği ileri sürülmektedir [13].

Antik çağlarda ve aslında 19. yüzyıla kadar kirecin özelliklerini iyileştirmek ve değiştirmek için kireç harçlarına birçok farklı katkı maddesi karıştırılmıştır. Bu özellikler arasında sertleşme süresi, yapışma, geçirimsizlik ve sertlik yer almaktadır. Kireç harçlarının modern "yeniden keşfi" sırasında bu karışımlar tamamen kaybolmuş, reçineler ve sentetik organik malzemeler içeren ticari karışımlar piyasaya çıkmıştır [13]. Kazein de bu organik malzemelerden biridir.

Kazeinin üretimi için ilk olarak kazein proteini, asit (HCl) ilavesiyle süttten izoelektrik noktasında (pH = 4,6) çöktürülür. Elde edilen pıhtı daha sonra peynir altı suyundan ayrılır ve tamburlu kurutucular adı verilen kurutucular kullanılarak kurutulur. Son olarak kuru kazein özel gereksinimlere göre öğütülür ve elenir.

İmalat sırasında kapsamlı bir ısı işlem gerçekleştirilir. Özellikle kurutma işleminde ve bunu takip eden öğütmede, kazein pıhtısında bulunan nemin buharlaştırılması için genellikle 100°C'den daha yüksek bir sıcaklık uygulanır. Aşırı kuruma süresi, kazein ürününde istenmeyen renk değişikliklerine neden olabilecek denatürasyon ile sonuçlanır [33]. Kurutma işlemi sırasında meydana gelen bu ısı kaynaklı değişiklikler potansiyel olarak kazein ürününün işlevselliğini etkileyebilir [33].

Harçlardaki protein konsantrasyonu zamanla azalmaktadır. Bunun potansiyel nedeni proteinlerin mikroorganizmalar tarafından parçalanmasıdır. Harç yüzeylerindeki protein miktarının azalmasının bir diğer nedeni de karbonatlaşma işleminin neden olduğu yeniden kristalleşmedir [2].

4.2 Kazeinin Tarihi Harç ve Sıvalarda Kullanımı

DeneySEL testlerin sonuçlarına dayanarak, kazeinin belirli durumlarda yararlı bir tarihi kireç harcı katkı maddesi olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Mevcut kireç harcının kısmen bozulduğu ve yığma duvarın sağlamlaştırılmasının gerekli olduğu bir güçlendirme uygulaması için kazein kullanımı en uygun seçenek olacaktır. Özellikle, akış özelliklerinde ve tuğladan harca bağlanma mukavemetinde iyileşme sağlanması, kireç harcına kazein eklenmesinin uygun bir iyileştirme uygulaması olmasının sebepleridir.

Harçlarda protein katkı maddesi kullanımına ilişkin bilgi, tarihi yapıların yeniden inşasında ve korunmasında faydalı olabilir. Ancak harçlardaki protein bileşiklerinin belirlenmesi oldukça karmaşıktır ve yalnızca birkaç analitik yöntem uygulanabilmektedir. Peptid kütle haritalaması en umut verici olanlardan biridir [26]. Biyo-bilişimde, bir peptid kütle parmak izi veya peptid kütle haritası, analiz edilen sindirilmiş bir proteinden gelen peptid karışımının bir kütle spektrumudur. Kütle spektrumu, proteini tanımlamaya hizmet edebilecek bir model olması anlamında bir parmak izi görevi görür. Bu yöntem tarihi harçların model numuneleri üzerinde başarıyla uygulanmıştır.

Yaşlandırma süreçleri, harçlardaki protein tanımlamasını önemli ölçüde etkileyen faktörlerden biridir. Protein katkılı harçlar yaşlandırıldıkça kütle spektrumundaki piklerin sayısında azalma gözlemlenmiştir [2].

Etkili maksimum kazein içeriğinin, harçtaki su miktarına bağlı olarak değiştiği bulunmuştur. Çekme dayanımı numunenin su oranının azalmasıyla artarken aderansı, kesin olmamakla birlikte, su içeriğindeki azalma nedeniyle çok az değişmektedir [35]. Bu nedenle, kullanılan kazein içeriği için hem aderansının hem de eğilme dayanımının bilinmesi gereklidir; tasarımda daha düşük olan mukavemetin dikkate alınması esastır [2]. Kazeinin ve harca eşdeğer özellikler kazandırabilecek diğer malzemelerin maliyetleri piyasa araştırması sonucunda hesaplanmış, malzemelerin yaklaşık maliyetleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Kazeinin ve diğer katkı malzemelerinin yaklaşık maliyetleri

Malzeme	Birim Fiyat [TL/kg]	Eşdeğer Performans için Tahmini Kullanım Oranı	1 m³ Karışımda Yaklaşık Maliyet
Hava Sürükleyici	65	%0,08 – 0,2	130 – 325 TL
Süperakışkanlaştırıcı	120	%1 – 2	3.000 – 6.000 TL
Kazein	740	%0,2 – 0,3	3.700 – 5.550 TL

4.3 Kazeinin Harç Özelliklerine Etkisi

Harçta kazeinin kullanılması gözenekliliği ve gözenek boyutunu azaltır [13]. Kazein kullanılmadan hazırlanan referans numunelerinin ve kazein kullanılarak hazırlanan numunelerin her birinden taze kırılma halinde elde edilen SEM görüntüleri ele alındığında örnekler arasında önemli doku farklılıkları olduğu sonucuna varılmaktadır. Farklılıklar gözenek sayısı ve minerallerdeki kristallerin gelişimi ile ilgilidir. Aragonitin varlığı X-ışını kırınımı ile doğrulandığında kristalin doğasının iğnemsisi olmadığı tespit edilmiştir. Bu da kazeinin kristalin morfolojisini belirlediğini göstermektedir. Bir katkı maddesinin kullanılması nedeniyle aragonitin iğnemsisi kristallerinin büyümesi, harcın kıvamını iyileştirmeye yardımcı olabilir ve bu durum daha iyi basınç dayanımı ile sonuçlanabilir [13].

Taze harç karışımındaki pH değeri, kireç varlığından dolayı alkalidir ve alkali pH, protein katkı maddelerinin tanınmasını etkileyebilir. Bu katkı malzemeleri ile hazırlanan örneklerin katı formlarının analizlerinde tespit edilen düşük protein konsantrasyonu, yaşlanma sırasında meydana gelen oksidasyon süreçleri, alkaline pH, mikroorganizmalar tarafından kirlenme harçlardaki proteinlerin analizlerini zorlaştıran faktörlere örnektir [2].

Daha önce yapılmış bir çalışma kireç harcındaki kazein miktarı arttıkça mukavemetin düştüğünü göstermektedir. Bu deney için hazırlanmış olan karışımlarda kazein miktarı arttıkça harcın nem özellikleri iyileşmiş, kazein su emiliminde ve kılcalık etkisinde azalmaya yol açmıştır [23].

Bir diğer çalışma, kireç harcının eğilme dayanımının %0,5-5 kazein katkısıyla arttığını göstermektedir [28].

Yapılan bir araştırmaya göre kireç hacına kütlece %0,25 kazein eklenmesi harcın akış özelliklerini iyileştirmede yetersiz kalmıştır. İşlenebilirliği geliştirmek için kütlece en az %0,5 kazeinin gerekli olduğu bulunmuştur. Kütle olarak %0,5 kazein ilavesinin akıcı bir harçla sonuçlandığı, ancak 56 gün sonra mukavemette %75'lik bir azalmaya neden olduğu ve aderansının arttığı bulunmuştur. Suyun %18 oranında azaltılması ile harç akıcılık özelliğini korurken, kontrol numunesinde gözlemlenen mukavemette %50'lik bir azalma gözlenmiştir. Suyun %27'den fazla azaltılması, hızlı prizlenen, akmayan bir harç ile sonuçlanmıştır [35].

Yapılan araştırmalarda kazein konsantrasyonunun artırılması harcının dayanıklılığını azaltmıştır ancak azalmanın doğrusal olmadığı görülmüştür.

Kazein içeren kireç harcının içeriğindeki suyun zamanla azaltılmasıyla, normal su oranında, %0,5 oranında kazein içeren harç karışımında akıcılık özellikleri korunurken mukavemetin arttığı gözlemlenmiştir. Referans numunesi (%0 kazein, 30 kg harç başına 5,5 L su), ile karşılaştırıldığında ise suyun %9 azaltılmasıyla %65'lik bir mukavemet azalması gözlenmiştir Normal su içeriğine sahip %0,5 kazein numunesi, referans numunesi ile karşılaştırıldığında %75-80'lik bir mukavemet azalması sergilemiştir. 30 kg harç başına 4,5 litre su oranının, işlenebilirlik ve dayanıklılık arasında en iyi dengeyi sağladığı, üreticinin 30 kilogram harç başına 5,5 litre su miktarından %18 oranında su tasarrufu sağladığı bulunmuştur. Su içeriğinin %18 oranında azaltılmasının, %0,5 kazein eklendiğinde tüm testlerde işlenebilirlik dengesi açısından en uygun mukavemeti sağladığı bulunmuştur. 30 kg harç başına 5,0 litre su oranında benzer akış değerleri ve daha düşük harç mukavemet değerleri gözlemlenmiştir. 30 kg harç için 4 litre ve 3,5 litre su kullanılan numunelerde sırasıyla %27 ve %36 oranında su azalması, harcın çok hızlı bir ilk priz almasına neden olmuştur. Karıştırma sırasında yapılan görsel ve

niteliksel gözlemlerde, karıştırılmamış harcın sıklıkla karıştırma kabının dibinde kalması nedeniyle 30 kg harç başına 3,5 litre suyun yetersiz olduğu kaydedilmiştir [35].

Su içeriğinin 30 kg harç başına 4,5 litre suya düşürülmesi, eklenen kazeinden kaynaklanan yapışma özelliklerini korumaktadır. %0,5 oranında kazein kullanılan harç tuğla yüzeyinden temiz bir şekilde kırılmamıştır. Bu, harcın aderansının kesme mukavemetinden daha büyük olduğunu göstermektedir. Numuneler kırılma noktasına yaklaştıkça, özellikle basınç testlerinde ve eğilme testlerinde yük-deplasman eğrilerinde bir miktar plastik deformasyon gözlemlenmiştir [35].

Kazein proteini ilavesinin artan hava miktarına rağmen yapışma özelliklerini iyileştirdiği kaydedilmiştir [36].

Kanada Ulusal Araştırma Konseyi tarafından yapılan önceki testlerde harca çok fazla kazein eklenmesinin harcın düzgün şekilde sertleşmesini önleyeceği belirtilmiştir [35].

Kazein kullanılan bir test, hava sürüklenmesi sebebi ile kazein ilavesinin basınç dayanımını düşürürken eğilme dayanımında belirgin bir iyileşmeye neden olduğunu göstermektedir. [36]. Bu davranış, bir duvar boşluğunun yeniden işaretlenmesinin veya doldurulmasının gerekli olduğu yığma duvar sisteminde avantajlı olabilmekte ve potansiyel olarak duvar boşluğunun doldurulması için gereken kapsamlı müdahalelerin yapılmasına bir alternatif olarak hizmet edebilmektedir.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışma kapsamında kazeinin hidrolik kireç esaslı sistemlerin taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini incelemek için katkısız (referans) ve farklı oranlarda kazein katkılı kireç harcı ve kireç hamuru serileri üretilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan tüm malzemeler, üretilen karışımlar ve yapılan analizler ile ilgili ayrıntılı bilgiler aşağıda verilmiştir.

5.1 Kullanılan Malzemeler

5.1.1 Kazein

Deneylerde kullanılan kazeinin YTÜ Merkez Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen XRF analizi sonucu belirlenen kimyasal kompozisyonu Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 Kullanılan kazeinin kimyasal kompozisyonu

Bileşen	Kütlece Oran
P ₂ O ₅	%28,2
SO ₃	%38,8
Cl	%7,7
K ₂ O	%4,4
CaO	%19,6
Fe ₂ O ₃	%0,2
CuO	112 ppm
ZnO	%0,4
Br	91,3 ppm
PdO	20,2 ppm
Ag ₂ O	%0,611
SnO ₂	430,9 ppm
TeO ₂	471,7 ppm
Rh	26,9 ppm

5.1.2 Doğal Hidrolik Kireç

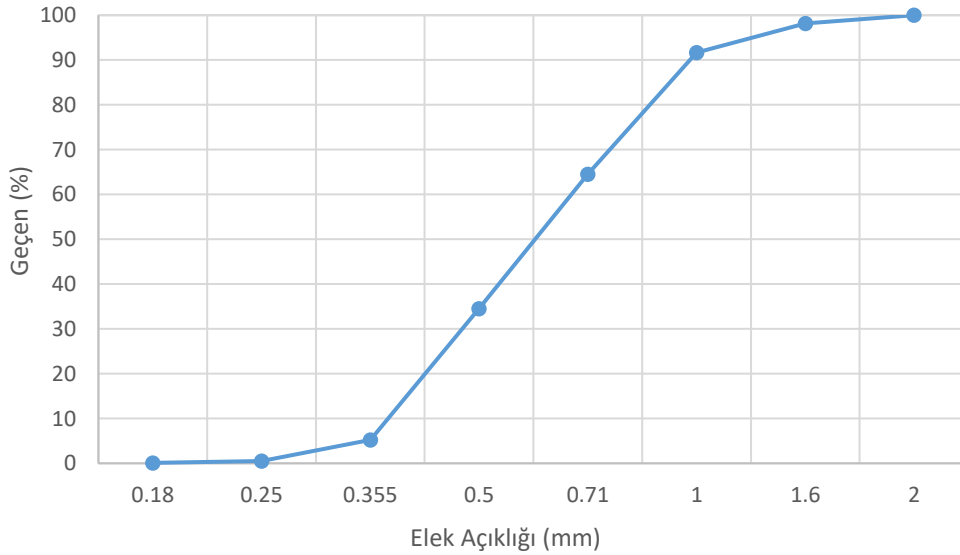
Yapılan deneylerde TS EN 459-1'e uygun NHL 5 sınıfı doğal hidrolik kireç kullanılmıştır. Kullanılan kirecin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 5.2'de gösterilmiştir.

Tablo 5.2 Kullanılan doğal hidrolik kirecin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özgöl Ağırlık		2,74
Blaine Özgöl Yüzey Alanı (cm²/g)		6600
Tane Boyut Dağılımı (µm)	d ₅₀	48,14
	d ₉₀	119,27
Kimyasal Bileşenler		Kütlece Oranı (%)
SiO ₂		9,3
Al ₂ O ₃		2,6
Fe ₂ O ₃		1,6
MgO		2,4
CaO		54,9
Na ₂ O		0,1
K ₂ O		0,8
TiO ₂		0,2
P ₂ O ₅		<0,1
MnO		<0,1
Kızdırma Kaybı		1,5

5.1.3 İnce Agrega (Kum)

Üretilen harçlarda agrega olarak maksimum tane çapı 2 mm, yoğunluğu 2,68 g/cm³ olan silis esaslı kum kullanılmıştır. Kullanılan kumun tane boyutu dağılımı Şekil 5.1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Kullanılan kumun tane boyut dağılımı

5.1.4 Sönmüş Hava Kireci

Kireç harcı üretimlerinde kullanılacak kazeinin çözünürlüğünü arttırmak için oluşturulması gereken alkali ortam gereği karışımlara sönmüş hava kireci ilave edilmiştir. Kullanılan hava kireci TS EN 459-1'e uygun CL 80-S sınıfında olup, yoğunluğu 2,20 g/cm³ ve Blaine özgül yüzeyi 3410 cm²/g'dır.

5.2 Üretim Süreci

Kazeinin hidrolik kireç harçlarının taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerine etkisinin araştırılması için bir adet katkısız (referans) ve kazein katkılı beş adet olmak üzere toplam altı adet harç serisi üretilmiştir. Katkılı beş seride kazein oranı (kireç kütlesine oranla) %0,5, %0,75, %1, %1,5 ve %2'dir. Katkı olarak karışıma ilave edilecek kazein, harç üretimine geçmeden önce su ile karıştırılarak çözelti haline getirilmiştir. Şunu da belirtmek gerekir, kazeinin su içinde tamamen çözünebilmesi için gerekli olan alkali ortamın sağlanması amacıyla su-kazein çözeltisi hazırlanırken karışıma (kireç kütlesine oranla) %1,5 oranında hava kireci eklenmiştir. Bu oran, ön deneylerde farklı kireç oranlarının çözelti pH'ına etkisi araştırılarak belirlenmiştir. Kazein-su-hava kireci karışımı ısıtıcılı manyetik karıştırıcı aracılığıyla kazein tamamen çözünene kadar karıştırılmıştır (Şekil 5.2). Karıştırma hızı 2000 rpm olup, karıştırma süresi tüm seriler için 75-90 dakika aralığındadır. Karıştırma işlemleri esnasında yapılan pH ve sıcaklık ölçümlerine göre çözeltinin pH'ı 12,5-13,0 aralığında, sıcaklık ise 40-50°C aralığında ölçülmüştür. Harç üretimlerinden önce, hazırlanan kazein-su çözeltileri dış ortama kapalı kaplarda sıcaklıkları ortam sıcaklığına gelinceye kadar (~30 dakika) bekletilmiştir. Belirlenen bekleme süresinin sonunda çözeltide herhangi bir topaklanma gözlenmemiştir.



Şekil 5.2 Kazeinin karışım suyu içinde karıştırılması

Tüm serilerde bağlayıcı olarak NHL 5 sınıfı doğal hidrolik kireç kullanılmıştır. Bağlayıcı:agrega oranı 1:3'tür. Karışım suyu miktarı ise referans harç serisinin yayılma çapı ile ölçülen kıvamına göre ön deneyler ile belirlenmiştir. TS EN 1015-2'ye göre taze haldeki boşluklu birim hacim kütlesi 1200 kg/m³'ten büyük harçlar için tavsiye edilen yayılma çapı aralığı TS EN 1015-3'e göre yapılacak yayılma deneyi sonucu 175±10 mm'dir. Bu hedef yayılma değerine göre referans harç serisinin su:bağlayıcı oranı 0,65 olarak belirlenmiştir. Üretilen harç serilerine ait kodlamalar ve malzeme oranları Tablo 5.3'te gösterilmiştir.

Tablo 5.3 Harç karışım oranları (kütlege)

Seri Kodları	Kireç	Kum	Su	Kazein
R	1	3	0,65	-
C0,5	1	3	0,65	0,005
C0,75	1	3	0,65	0,0075
C1	1	3	0,65	0,01
C1,5	1	3	0,65	0,015
C2	1	3	0,65	0,02

Tüm harç üretimleri Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda bulunan pan tipi mikser kullanılarak TS EN 196-1'de tarif edilen standart harç üretimine uygun şekilde gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.3). Buna göre 30 saniye boyunca ilgili standartta belirtilen düşük hızda karışım suyu ve kireç karıştırıldıktan sonra, sonraki 30 saniye içerisinde kum ilave edilmiş, toplam 60 saniye sonunda mikser hızı yüksek hıza çevrildikten sonra karışım bir 30 saniye daha karıştırılmıştır. Toplam 90 saniye sonunda mikser durdurulmuş ve karıştırma kabı içinde yüzeye/tabana yapışan harç kütlesi sıyrılarak kabın orta bölümüne aktarılmıştır. Daha sonra mikserde yüksek hızda 60 saniye daha karıştırılan harçların üretimleri tamamlanmıştır. Üretilen harçlarda önce detayları aşağıda verilen taze hal deneyleri gerçekleştirilmiş; daha sonra harçlar, sertleşmiş hal deneyleri için 5 cm'lik küp ve 4x4x16 cm'lik prizma şekilli kalıplara yerleştirilmiştir.



Şekil 5.3 Harç üretimlerinde kullanılan pan tipi mikser

5.3 Taze Hal Özelliklerinin Belirlenmesi

Üretilen serilerin taze haldeki özelliklerinin belirlenmesi için yayılma, birim hacim kütlesi, priz süresi deneyleri ve reolojik analizler gerçekleştirilmiştir.

5.3.1 Taze Harçların Kıvamının Belirlenmesi

Taze haldeki harçların kıvamının belirlenmesi için TS EN 1015-3'e uygun şekilde yayılma deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 Yayılma deneyi

İlgili standartta tarif edildiği üzere üretilen taze haldeki harçlar iki tabaka halinde taban çapı 10 cm olan kesik koni şekilli kalıba yerleştirilmiştir. Her bir tabaka 10 kısa vuruş ile tokmakla sıkıştırılmıştır. Kalıba yerleştirme işlemi tamamlandıktan sonra koni kaldırılmış ve sarsma tablası 15 saniye içinde 25 kere düşürülmüştür. Sarsmadan sonra tabla üzerine yayılmış olan harcın birbirine dik 2 doğrultuda çapı ölçülerek harcın yayılma miktarları belirlenmiştir.

5.3.2 Taze Harçların Birim Hacim Kütlesinin Belirlenmesi

Taze harcın boşluklu birim ağırlığının belirlenmesi için TS EN 1015-6'ya uygun şekilde ölçü kabına tepeleme doldurulmuş (Şekil 5.5), kaba yerleşinceye dek titreşime maruz bırakılmış, titreşim sonucunda eksilen hacim yeniden doldurulup kabın üzeri bir mala yardımı ile düzlenmiştir. Daha sonra hassasiyeti 0,1 g olan terazi ile harç kütlesi tartılmış ve harç kütlesinin 1 litrelik kap hacmine bölünmesiyle harçların birim hacim kütlesi hesaplanmıştır.



Şekil 5.5 Boşluklu birim hacim kütle deneyi

5.3.3 Priz Süresinin Belirlenmesi

Üretilen serilerin priz sürelerinin belirlenmesi için kireç hamurları üretilmiş ve otomatik Vicat cihazı kullanılmıştır (Şekil 5.6). TS EN 196-3'te tarif edilen standart kıvamda hamur üretimine uygun şekilde hazırlanan kireç hamurları için su:bağlayıcı oranı 0,45'tir. Hamur üretimini müteakiben üretilen kireç hamurları Vicat kalıbına yerleştirilmiştir. Hamurun Vicat kalıbından dışarı sızmasının engellenmesi amacıyla Vicat kabı ile cam plaka arası cam macunu ile kaplanmıştır. Yerleştirme işlemi iki tabaka halinde gerçekleştirilmiş ve kireç hamurunun hazırlandıktan sonra 10 saniyeden daha uzun süre bekletilmemesine özen gösterilmiştir. Priz başlangıç süresi için $\phi 1,13$ mm'lik Vicat iğnesi ile kap tabanı arasındaki mesafenin ilk kez (6 ± 3) mm olduğu ölçüm zamanı; priz bitiş süresi için ise iğnenin üst yüzeye batma mesafesinin 0,5 mm olduğu ölçüm zamanı esas alınmıştır. Otomatik Vicat cihazı her 5 dakikada bir ölçüm alacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 5.6 Priz süresi deneyi

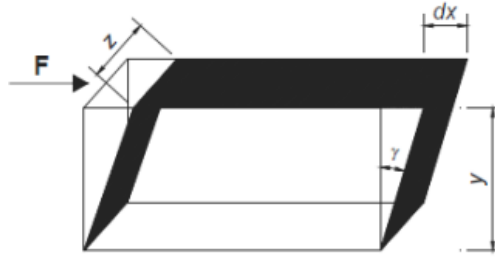
5.3.4 Reolojik Analiz

Bu çalışma kapsamında hazırlanan kireç hamuru serilerinin akış parametreleri zamana bağlı olarak incelenmiştir.

Kayma gerilmesinin hesaplanması Denklem (5.1)'de verilmiştir. (5.1) eşitliğinde F üst plakaya uygulanan kuvveti, A üst plakanın alanını ve τ ise kayma gerilmesini ifade etmektedir [37].

$$\tau = F/A \quad (5.1)$$

A alanına kayma gerilmesinin dt süresi boyunca etki ettirilmesi sonucu Şekil 5.7'de görülen dx yatay yer değiştirmesi ve γ açısal yer değiştirmesi oluşmaktadır [38].



Şekil 5.7 Kuvvetten kaynaklanan deformasyon [38]

Bu kayma gerilmesinin dt süresi boyunca A alanına etkimesiyle dx yatay yer değiştirmesi ve γ açısal yer değiştirmesi oluşur [38]. γ açısal yer değiştirmesinin ve $\dot{\gamma}$ kayma hızının elde edilişi Denklem 5.2 ve Denklem 5.3'te verilmiştir [38].

$$\gamma = dx/y \quad (5.2)$$

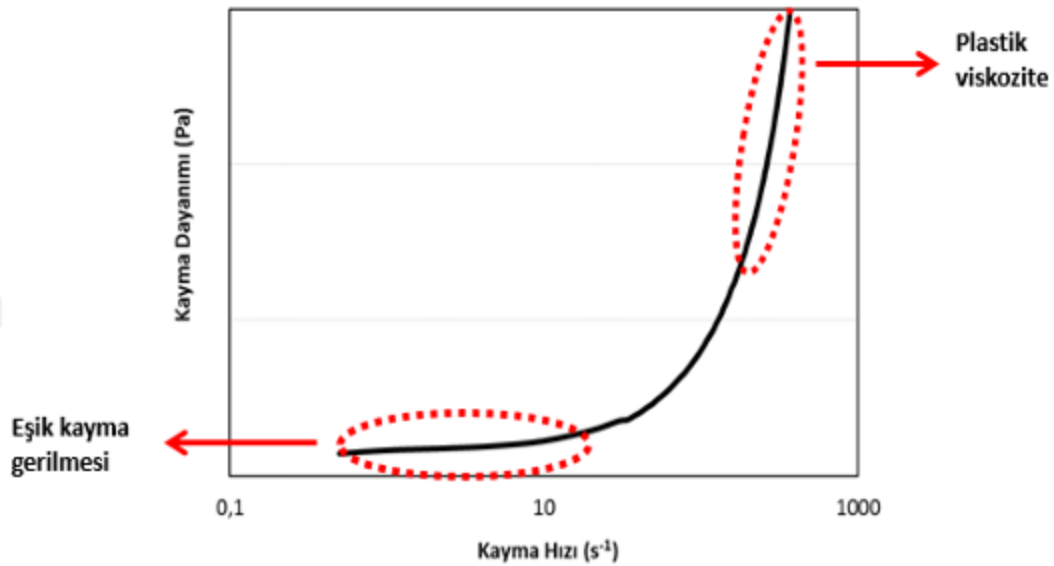
$$\dot{\gamma} = d\gamma/dt \quad (5.3)$$

Bu denklemlere bağılı olarak viskozitenin (η) kayma gerilmesiyle (τ) ilişkisi Newton yasasına göre elde edilmiş ve Denklem (5.4)'te ifade edilmektedir [38].

$$\tau = \eta \times d\gamma / dt \quad (5.4)$$

Bu denklemlerden de görüldüğü üzere Newton yasasına göre açısal şekil değiştirmenin zamana göre türevi yani şekil değiştirme hızı kayma gerilmesi ile orantılıdır. Bu yasaya uyan cisimlere Newtonian cisimler denir.

Reometre ile yapılan ölçümlerden elde edilen verilerle bir takım matematiksel modeller kullanılarak malzemenin plastik viskozitesi ve eşik kayma gerilmesi belirlenir. Kademeli olarak artan veya azalan kayma hızı uygulanarak yapılan ölçümlerde matematiksel modellerin yeterince hassas sonuçlar vermediği görülmektedir. Bu ölçümlerde gerilme-plato yaklaşımı kullanılabilir. Bu yöntemde elde edilen kayma gerilmesi-kayma hızı grafiği logaritmik olarak çizilir, plato olarak belirtilen düz bölge eşik kayma gerilmesini temsil eder. Plastik viskozite ise kayma gerilmesi-kayma hızı grafiğinde lineer olan eğrinin eğiminden elde edilir [39]. Gerilme-plato yöntemi Şekil 5.8'de gösterilmektedir.



Şekil 5.8 Gerilme plato yöntemi [39]

Bu deneysel çalışma kapsamında kazein içeren kireç hamuruna ait reolojik davranış ve ilgili parametreler Anton Paar Reolab QC marka/model rotasyonel reometre (Şekil 5.9) ile araştırılmıştır. Reolojik analizde taneli malzemeler için kullanılan 4 bıçaklı (vane) uç tercih edilmiştir. Kullanılan vane uç ve diğer aparatlar Şekil

5.10’da gösterilmektedir. Kullanılan ölçüm prosedürü doğrultusunda, ön ölçüm için malzemeye 30 saniye boyunca 100 (1/s) kayma hızında kayma gerilmesi uygulanmıştır. 30 saniye bekleme süresinin ardından malzemeye 1’er saniyelik basamaklar ile 0,1-100 (1/s) arasında kayma gerilmesi önce arttırılarak sonra azaltılarak uygulanmıştır.



Şekil 5.9 Rotasyonel reometre



Şekil 5.10 Reoloji deneyinde kullanılan aparatlar

Reolojik ölçümler, TS EN 196-3’te tarif edilen ve su:bağlayıcı oranı 0,45 olan standart kıvamdaki kireç hamurlarında gerçekleştirilmiştir.

Yapılan ölçümler neticesinde elde edilen verilerden üretilen hamur serilerine ait “kayma gerilmesi - kayma hızı” ve “plastik viskozite - kayma hızı” eğrileri oluşturulmuştur. Yürütülen deneysel çalışma kapsamında reolojik davranışların araştırılması için literatürde yer alan reolojik modellerden “Modifiye Bingham” modeli ele alınmıştır.

5.4 Sertleşmiş Hal Özelliklerinin Belirlenmesi

Üretilen harçlar TS 1015-11'e göre 4x4x16 cm'lik prizma şekilli ve 5 cm'lik küp şekilli kalıplara 2 tabaka halinde (her bir tabaka için ~2 saniye vibrasyon uygulanarak) yerleştirilmiştir. Üretilen ve kalıplara yerleştirilen harçlar deney günlerine kadar sıcaklığı $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ve bağıl nemi $\%55\pm 5$ olan nem kabiniinde muhafaza edilmiştir (Şekil 5.11).



Şekil 5.11 Nem kabini

5.4.1 Eğilme ve Basınç Dayanımı Deneyleri

Sertleşmiş kireç harcı serilerinin eğilme ve basınç dayanımlarını belirlemek için TS EN 1015-11'de yer alan deneysel işlemler uygulanmıştır. Buna göre üretilen 40x40x160 mm boyutlarındaki prizma şekilli numuneler standartta verilen koşullar altında muhafaza edilmiştir. Hazırlanan numuneler, erken yaş dayanımı için 7. günde, standart yaş dayanımı için 28. günde ve uzun dönem dayanımının belirlenmesi için 90. günde eğilme ve basınç deneylerine tabi tutulmuşlardır. Tek eksenli basınç ve eğilme deneylerinde kullanılmış olan yükleme cihazı Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.12 Yükleme cihazı

Eğilme Dayanımı Deneyi

Eğilme deneyi TS EN 1015-11'e uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Buna göre numuneler, arasındaki açıklık 100 mm olan alt mesnetlerin üzerine yerleştirilmiş ve üzerine 1 mm/dk'lık üniform yayılı çizgisel yük uygulanmıştır. Deney, harç serilerinin her bir test yaşı için en az 3 numunede gerçekleştirilmiş; deney neticesinde numuneler ikiye ayrılmış ve deney sonunda kırılma yükleri kaydedilmiştir (Şekil 5.13).

Deney sonunda, harçların eğilme dayanımı (f_e) aşağıda verilen (5.5) denklemine göre hesaplanır.

$$f_e = \frac{1,5 \times P_{max} \times l}{b \times d^2} \quad (5.5)$$

Bu denklemde yer alan değişkenlerden;

P_{max} : Maksimum yükü (N),

l : Mesnetler arası uzaklığı (mm),

b : Enkesit genişliğini (mm),

d : Enkesit yüksekliğini (mm) göstermektedir.



Şekil 5.13 Eğilme deneyi

Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyi için hazırlanmış olan 50 mm x 50 mm x 50 mm boyutlarındaki küp numuneler, yükleme cihazı üzerindeki iki başlık arasına merkezlenerek yerleştirilmiştir. 60 ton kapasiteli ve 10 N hassasiyete sahip basınç makinesi kullanılarak gerçekleştirilen deneyde, 2 mm/dk'lık yükleme hızına sahip

P yükü uygulanmıştır. Basınç deneyi, 7, 28 ve 90 günlük olmak üzere her bir test yaşı için en az 3 adet numunede gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.14).



Şekil 5.14 Tek eksenli basınç deneyi

50 mm'lik küp numunelerden elde edilen basınç dayanımı sonuçlarını kontrol etmek amacıyla eğilme dayanımı deneyi sonucunda iki parçaya ayrılmış olan numuneler kullanılarak basınç deneyi tekrar edilmiştir. Yarım numunelerin alt ve üst yüzeyine 40 mm'lik çelik plakalar yerleştirilmiş ve yükleme hızı 2 mm/dk olacak şekilde tek eksenli basınç deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.15).



Şekil 5.15 Kırık prizma numuneler ile tek eksenli basınç deneyi

Harçların tek eksenli basınç dayanımı (f_c) aşağıda verilen (5.6) denklemine göre hesaplanmıştır.

$$f_c = \frac{P_{max}}{A} \text{ (MPa)} \quad (5.6)$$

Denklemden yer alan değişkenlerden:

P_{max} : Basınç deneyi sonunda ulaşılan maksimum yükü (N),

A: Yük uygulanan kesitin alanını (mm^2) göstermektedir.

5.4.2 Kılcallık Deneyi

Kılcallık, küçük kılcal boşlukların yüzey gerilmelerinden dolayı cismin suyu yukarı yönde çekmesinden oluşmaktadır. Kireç harcındaki birbiriyle bağlantılı küçük boşluklardaki yüzey gerilim kuvvetlerinden dolayı su malzemenin kuru olan kısımlarına doğru çekilmektedir. Kılcal boşlukların çapları küçüldükçe kılcal su yüksekliği daha fazla olmaktadır. Bu özelliğin değerlendirilmesi için kılcallık katsayısı belirlenmektedir. Kılcallık katsayısının bulunması için:

Q_i : Emilen su miktarı (cm^3)

A: Yüzey alanı (cm^2) olmak üzere numunelerden alınan her bir ölçüm için ayrı ayrı

$(\frac{Q_i}{A})$ değeri hesaplanmıştır. Ardından:

t: Zaman (sn) olmak üzere $(\sqrt{t})$ hesaplanmıştır.

Hesaplanan (Q_i/A) değeri y ekseninde, $(\sqrt{t})$ değeri x ekseninde gösterilmiştir. Oluşturulan grafiğin başlangıçtaki lineer bölümü üzerinde gerçekleştirilen doğrusal regresyon analizi neticesinde kılcallık katsayısı belirlenmiştir.

Deney, erken yaş için 7. günde, standart yaş için 28. günde ve uzun dönem kılcal davranışın belirlenmesi için 90. günde gerçekleştirilmiştir. Ölçümler Tablo 5.3'te gösterilen her bir seriye ait 3 adet numunenin sabit kütleyle gelinceye dek 24 saat $100 \pm 5^\circ\text{C}$ 'lik etüvde kurutulduktan sonra alt yüzeylerinden oda sıcaklığındaki su ile temas ettirilmesi ve her birinin belirli süre aralıkları ile tartılması ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin su ile temasından itibaren farklı zaman aralıklarındaki kütleleri (M_i) ölçülmüş; kılcallık katsayısı, TS EN 15886'ya göre hesaplanmıştır (Şekil 5.16).



Şekil 5.16 Kılcallık deneyi

5.4.3 Su Emme Deneyi

Deney, 7, 28 ve 90. günlerde olmak üzere üretilen harçların su emme davranışının belirlenmesi için her bir seriye ait 3 adet numunenin 24 saat su içinde bekletildikten sonra hem suyun içinde, hem havada tartılması ve daha sonra 24 saat 105 ± 5 °C sıcaklık ayarlı etüvde kurutulup yeniden tartılması ile gerçekleştirilmiştir.

Etüv kurusu kütle (W_o), suya doymun havadaki kütle (W_{sh}) ve suya doymun sudaki kütle (W_{ss}) ölçümleri yapılmıştır. Numunelerin net hacmini (V_{net}) bulmak için aşağıda verilen (5.8) denkleminde yararlanılmıştır.

$$V_{net} = \frac{W_{sh} - W_{ss}}{\rho_{su}} \quad (5.8)$$

Ağırlıkça (a_s) ve hacimce su emme oranlarının (h_s) yüzde cinsinden hesaplanması aşağıdaki gibidir.

$$a_s (\%) = \frac{W_{sh} - W_o}{W_o} \times 100 \quad (5.9)$$

$$h_s (\%) = \frac{W_{sh} - W_o}{W_{sh} - W_{ss}} \times 100 \quad (5.10)$$

5.4.4 Aderans Deneyi

Aderans deneyi TS EN 1015-12'deki deney prosedürü modifiye edilerek gerçekleştirilmiştir. Üretilen harç karışımları, temin edilen harman tuğlalarının dolu yüzeylerinin üzerine (plastik kalıp kullanarak) kalınlığı 10 mm, çapı 50 mm olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 5.17). 90. gün, çekme başlığı olarak kullanılacak çelik plakalar aderans numunelerinin üstüne epoksi yardımıyla rijit şekilde yapıştırılmıştır. 24 saat sonra Şekil 5.17'de görülen aderans test cihazı kullanılarak düşey doğrultuda plakalar çekilmiş ve tuğla yığma birim ile harç arasındaki aderans ölçülmüştür. Her bir harç türü için en az 5 deney numunesi kullanılmış, deney sonucunda cihazdan okunan kopma yükü ve kopma türü kaydedilmiştir.



Şekil 5.17 Aderans deneyi

DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

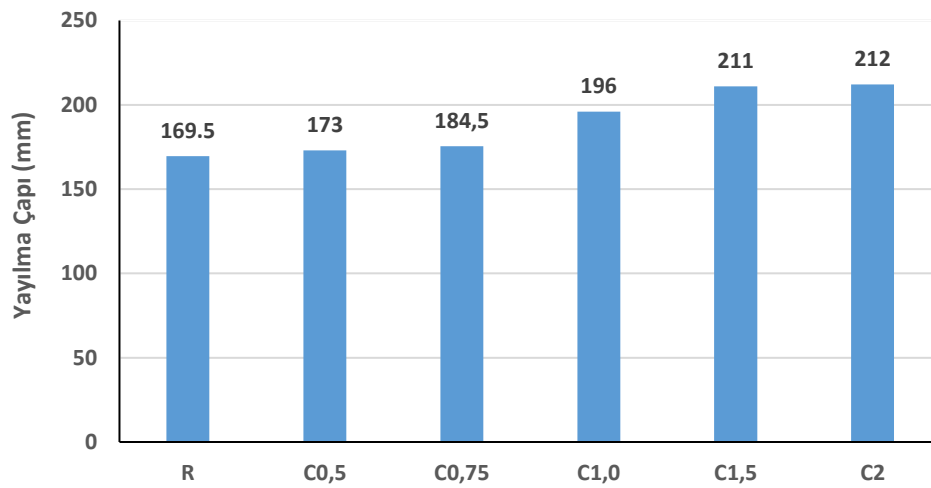
Bu bölümde, detayları önceki bölümde açıklanan deneysel çalışmaların sonuçları paylaşılarak elde edilen bulgular detaylı olarak değerlendirilmiştir.

6.1 Yayılma Çapı Deneyi Sonuçları

Kazein içeren kireç harcının çapının iki ayrı doğrultuda (D_1 , D_2) ölçülüp ortalamasının alınmasıyla hesaplanan, ortalama yayılma çapı değerleri (D_{ort}) Tablo 6.1 ve Şekil 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1 Yayılma çapı deney sonuçları

Harç Serileri	Yayılma Çapı (mm)		
	D_1	D_2	D_{ort}
R	169	170	170
C0,5	173	173	173
C0,75	185	184	184
C1,0	195	197	196
C1,5	211	211	211
C2	211	213	212

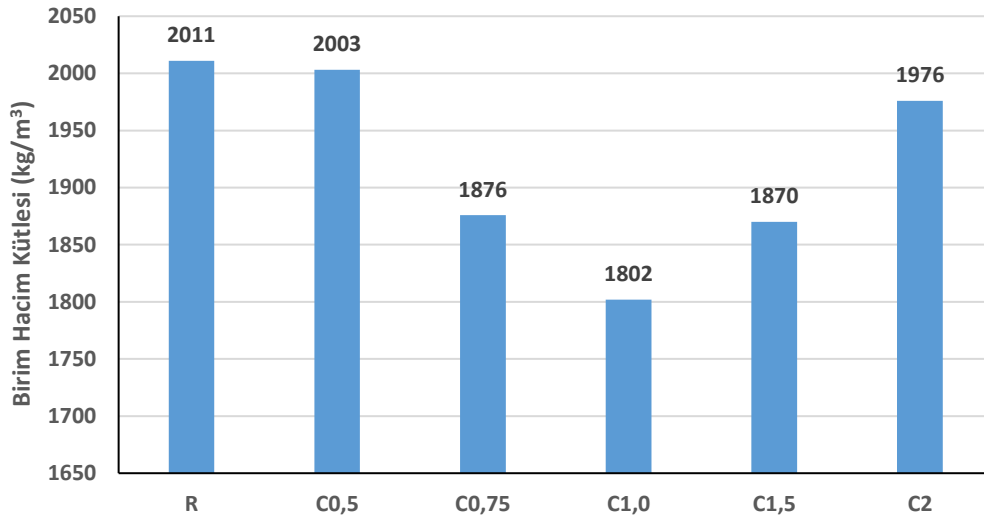


Şekil 6.1 Yayılma çapı deney sonuçları

Tablo 6.1’de verilen deney sonuçları incelendiğinde harcın içerisindeki kazein oranı arttıkça yayılma çapı değerlerinin de arttığı görülmektedir. Söz konusu artış özellikle kazein oranının %1 ve üzeri olduğu serilerde oldukça belirgindir. Ancak şunu da belirtmek gerekir ki kazein oranının %1,5 ve %2 olduğu serilerde karışımların segregasyon eğilimi oldukça yüksektir.

6.2 Birim Hacim Kütle Deneyi Sonuçları

Birim hacim kütle deneyinden elde edilen sonuçlar Şekil 6.2’de gösterilmiştir.

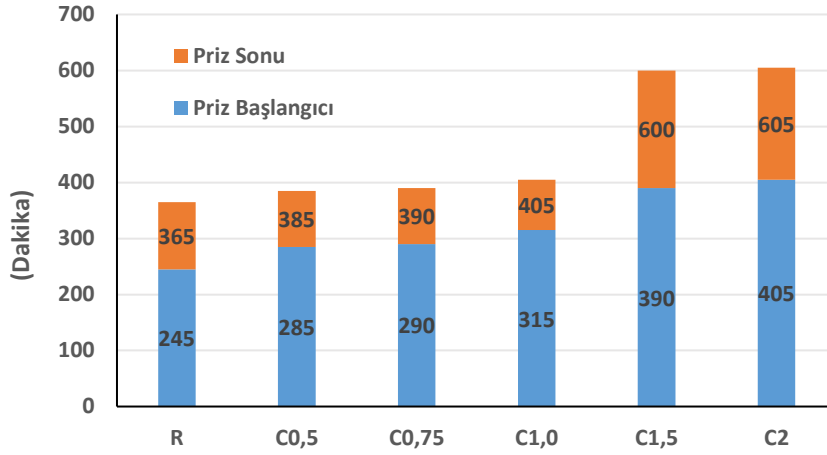


Şekil 6.2 Birim hacim kütlesi deney sonuçları

Şekil 6.2’de kireç harcı içindeki kazeinin %1 oranına kadar arttırılmasının, harcın birim hacim kütlesini %10,4’lük bir orana kadar düşürdüğü görülmektedir. Birim hacim kütlesinin düşmesinin, harcın içerisinde daha çok hava boşluğu bulundurmasının bir sonucu olduğu, kireç harcı içindeki kazeinin %1 oranına kadar arttırılmasının, kirece daha fazla hava sürüklenmesine sebep olacağı öngörülmektedir. Kireç harcına %1,5 oranında veya daha fazla kazein ilave edildiğinde harcın birim hacim kütlesi, kazein oranı %1 olan kireç harcı numunesine göre artmaktadır ancak referans numuneye göre değerlendirildiğinde, azalmaktadır. Kazein ilave edildikçe azalan birim hacim kütlesinin %1,5’den yüksek oranda kazein ilave edildiğinde artıyor olmasının harç suyuna ilave edilmiş olan kazeinin aglomerasyon eğiliminin artmasından ve azalan yüzey alanının köpüklenme etkisini azaltmasından kaynaklanıyor olabileceği düşünülmektedir.

6.3 Priz Deneyi Sonuçları

Kireç hamurunun taze hal deneylerinden elde edilen priz başlangıç ve bitiş süreleri verilerine ait grafik Şekil 6.3'te görülmektedir.

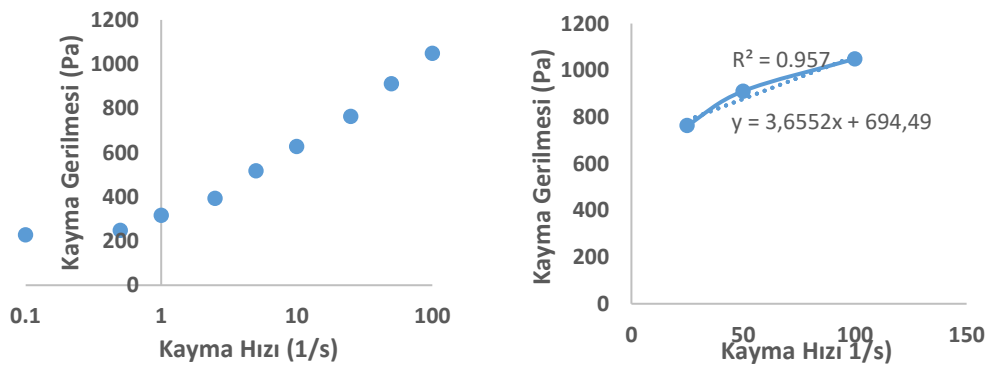


Şekil 6.3 Priz deneyi sonuçları

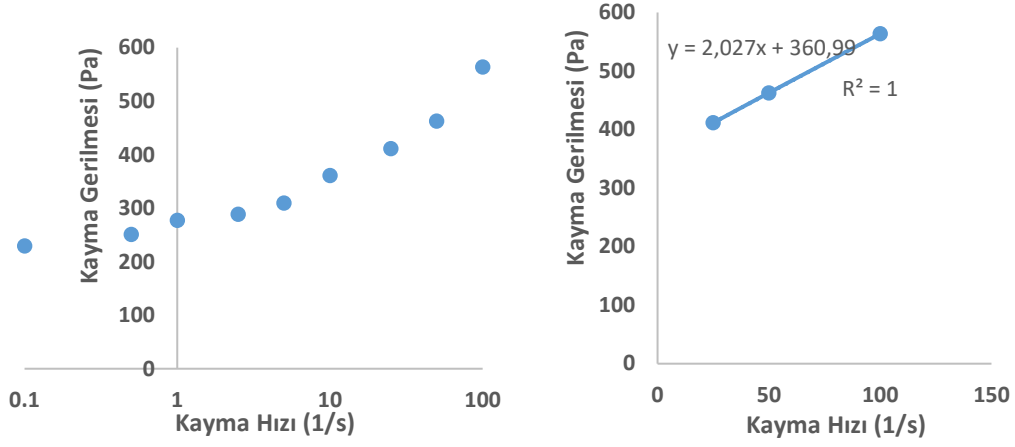
Genel olarak bakıldığında, karışımlara eklenen kazein oranının artması ile priz süresinin uzadığı görülmektedir. Bu etki özellikle kazein oranının %1,5 ve %2 olduğu karışımlarda oldukça belirgindir ve priz başlangıç-bitiş süreleri referans numuneyle kıyasla yaklaşık 1,5-2 kat artmıştır.

6.4 Reolojik Analiz Sonuçları

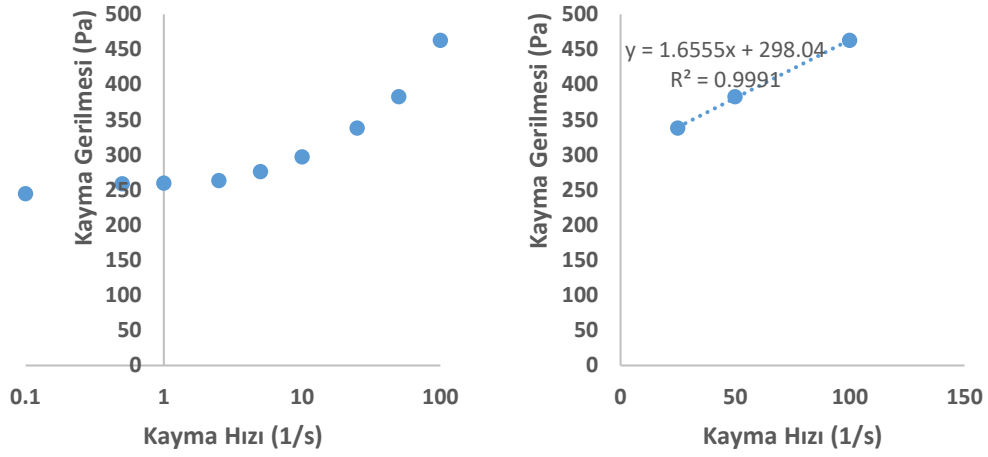
Deney kapsamında üretilen serilere ait kayma hızı-kayma gerilmesi grafikleri aşağıdaki şekillerde (Şekil 6.4-9) verilmiştir.



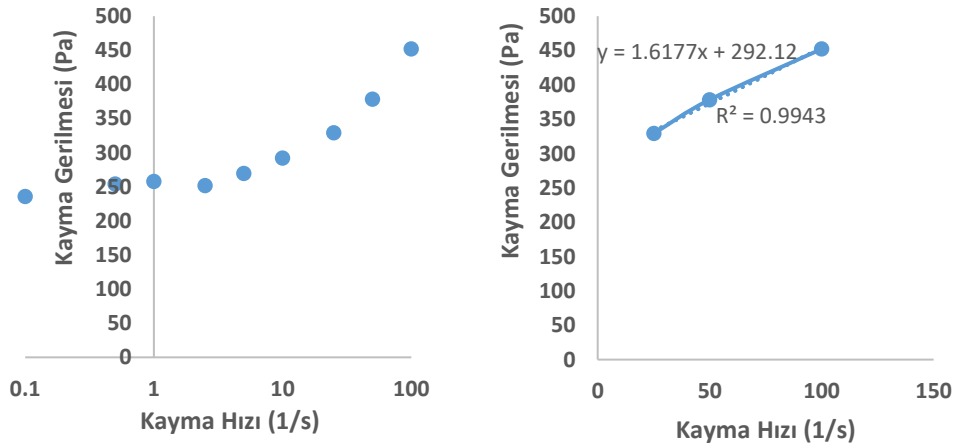
Şekil 6.4 R serisinin kayma gerilmesi-kayma hızı grafikleri



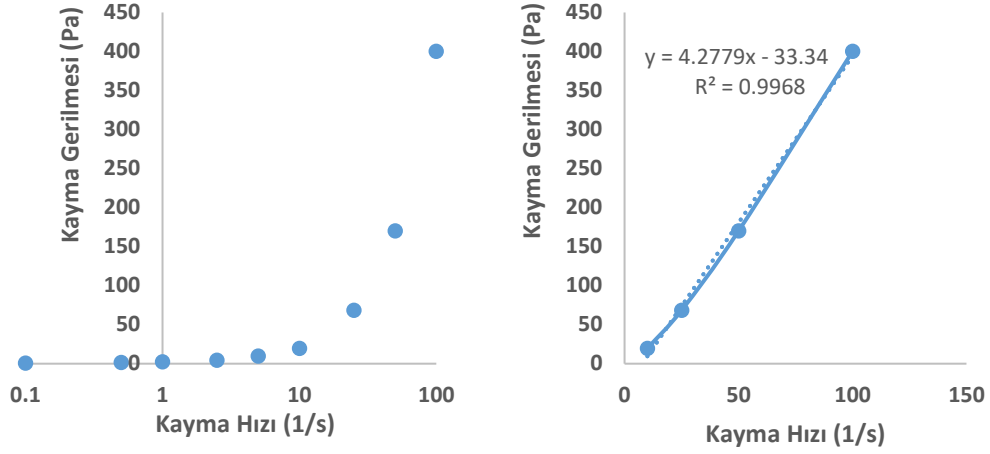
Şekil 6.5 C0,5 serisinin kayma gerilmesi-kayma hızı grafikleri



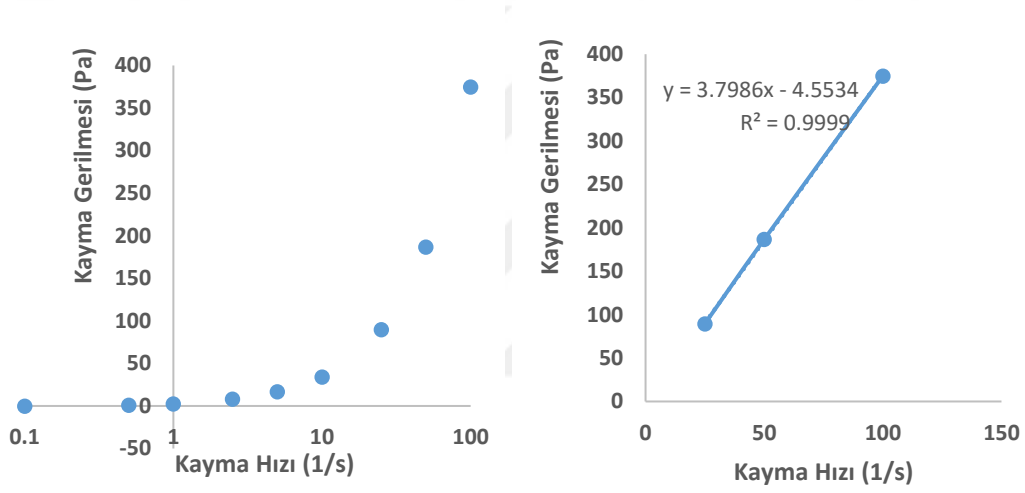
Şekil 6.6 C0,75 serisinin kayma gerilmesi-kayma hızı grafikleri



Şekil 6.7 C1 serisinin kayma gerilmesi-kayma hızı grafikleri

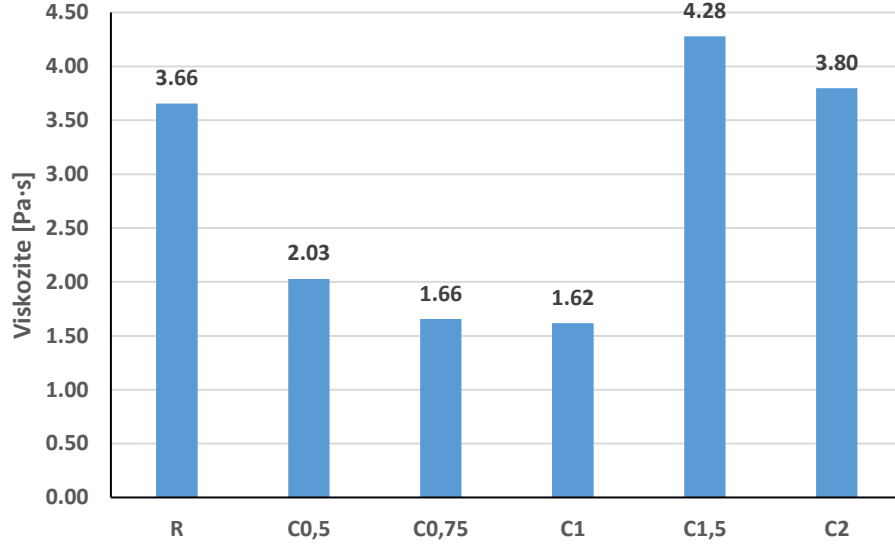


Şekil 6.8 C1,5 serisinin kayma gerilmesi-kayma hızı grafikleri



Şekil 6.9 C2 serisinin kayma gerilmesi-kayma hızı grafikleri

Kazein oranlarına göre viskozite değerleri Şekil 6.10'da, eşik kayma gerilmesi değerleri Şekil 6.12'de gösterilmektedir.



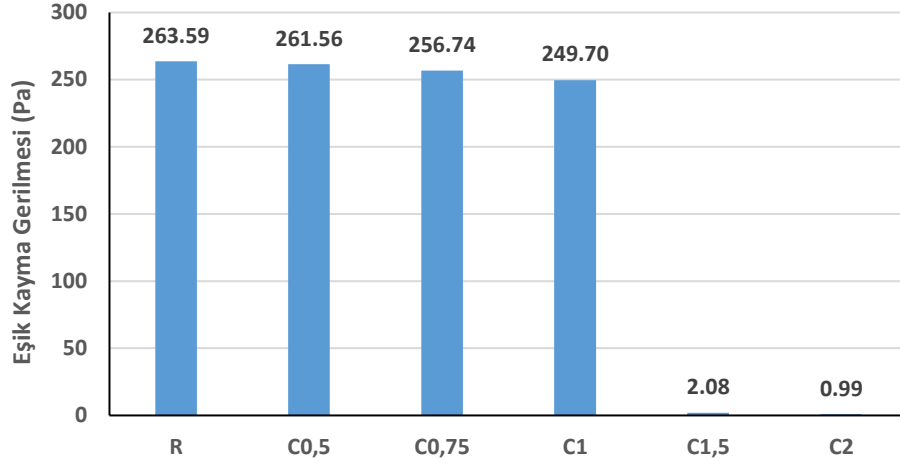
Şekil 6.10 Serilerin vizkozite değerleri

Şekil 6.12’de gösterilen verilere göre taze haldeki kireç hamuruna %1 oranında kazein ilave edildiğinde hamurun viskozite değeri referans numuneye göre %55,7 oranında düşmektedir. Hamura %1,5 oranında veya daha fazla kazein ilave edildiğinde viskozite değerleri artmaktadır. Deneylerden alınan veriler ve kireç hamurunun görüntüsü itibari ile yürütmüş olduğumuz deneylerde, serilerden, kazein oranı %1,5 olan C1,5 serisinde ve kazein oranı %2 olan C2 serisinde katı taneler kabın dibine çökerek ayrışma eğilimi göstermişlerdir. Bahsedilen durumu temsil eden, deney sonunda elde edilen görüntü Şekil 6.11’de gösterilmektedir.



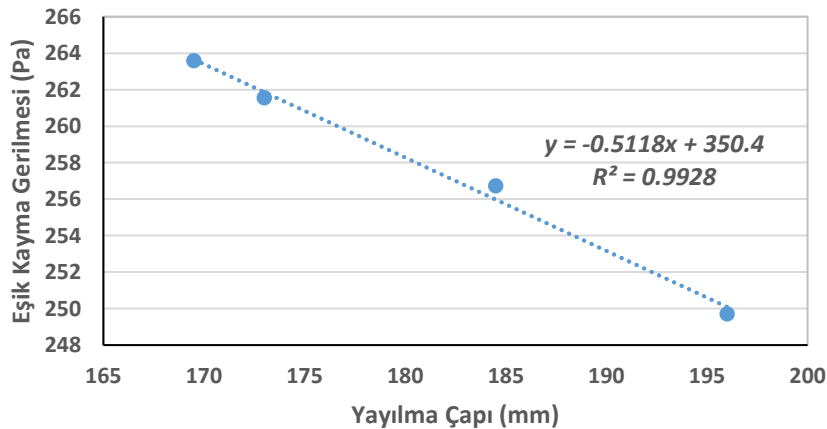
Şekil 6.11 Çöken katı malzemenin görüntüsü

Viskozite değerlerinde meydana gelen beklenmeyen artışın nedeninin katı tanelerin kabın dibine çökerek ayrışması olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.12 Serilerin eşik kayma gerilmesi değerleri

Şekil 6.14’de gösterilen verilere göre taze haldeki kireç hamuruna ilave edilen kazein oranı arttıkça kireç hamurunun eşik kayma gerilmesi düşmektedir. Hamura %1 oranında kazein ilave edildiğinde eşik kayma gerilmesindeki düşüş referans numuneye göre %5,3’tür. Hamura %1,5 oranında veya daha fazla kazein ilave edildiğinde eşik kayma gerilmesi değerlerinde beklenmeyen oranlarda düşüş meydana gelmektedir. Eşik kayma gerilmesi değerlerindeki bu düşüşün kazein oranı %1,5 olan C1,5 ve kazein oranı %2 olan C2 serilerinde gözlemlenen katı tanelerin dibe çökmesi olayından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu seriler dikkate alınmadığında daha önce yapılmış olan yayılma çapı deneyinden alınan sonuçlar ile eşik kayma gerilmesi değerleri arasında doğrusal bir ilişki söz konusudur. Doğrusal ilişkiye ait regresyon analizi Şekil 6.13’teki gösterilmiştir.



Şekil 6.13 Yayılma çapı ile eşik kayma gerilmesi arasındaki ilişki

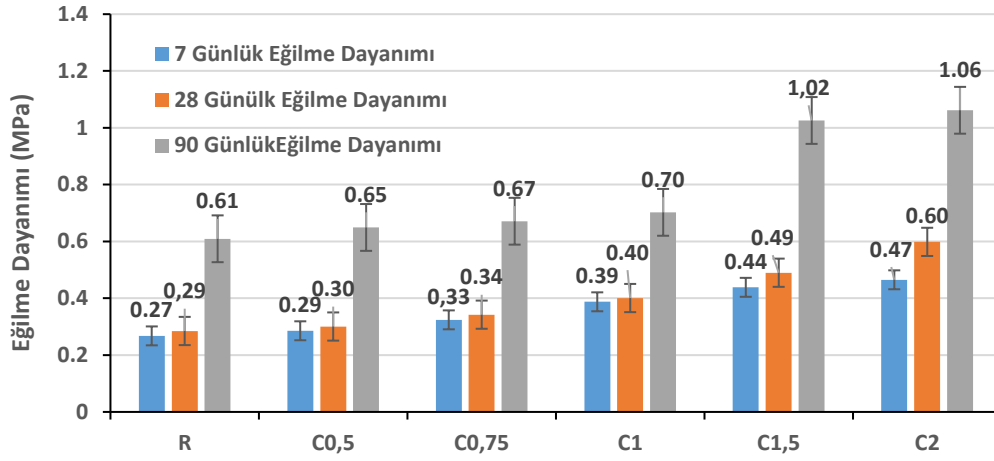
6.5 Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları

Eğilme deneyi sonucunda hesaplanan eğilme dayanımı değerleri Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2 Eğilme deneyi sonuçları

7 GÜNLÜK EĞİLME DENEYİ SONUÇLARI				
Seri Adı	Eğilme Dayanımı (Tekil Değerler, MPa)			Ortalama
R	0,26	0,26	0,28	0,27
C0,5	0,29	0,29	0,28	0,29
C0,75	0,32	0,33	0,33	0,33
C1,0	0,38	0,39	0,39	0,39
C1,5	0,46	0,43	0,43	0,44
C2	0,48	0,46	0,46	0,47
28 GÜNLÜK EĞİLME DENEYİ SONUÇLARI				
Seri Adı	Eğilme Dayanımı (Tekil Değerler, MPa)			Ortalama
R	0,28	0,29	0,29	0,29
C0,5	0,30	0,31	0,30	0,30
C0,75	0,34	0,35	0,34	0,34
C1,0	0,44	0,41	0,35	0,40
C1,5	0,48	0,49	0,50	0,49
C2	0,59	0,60	0,60	0,60
90 GÜNLÜK EĞİLME DENEYİ SONUÇLARI				
Seri Adı	Eğilme Dayanımı (Tekil Değerler, MPa)			Ortalama
R	0,75	0,58	0,50	0,61
C0,5	0,66	0,64	0,65	0,65
C0,75	0,68	0,67	0,66	0,67
C1,0	0,74	0,70	0,66	0,70
C1,5	1,11	1,03	0,93	1,02
C2	1,08	0,95	1,16	1,06

Tablo 6.2’de yer alan tekil değerler kullanılarak hesaplanan ortalama değerler Şekil 6.16’da grafik olarak verilmiştir.



Şekil 6.14 Eğilme deneyi sonuçları

Şekil 6.14’te gösterilen sonuçlara göre, kireç harcına %2 oranına kadar kazein ilave edilmesi, harcın eğilme dayanımı artmaktadır; ancak bu artış %1,5-2 kazein oranları için yaklaşık aynıdır. Elde edilen sonuçlara göre %2 oranında kazein ilavesi eğilme dayanımı değerlerini 7 günlük serilerde %74; 28 günlük serilerde %114; 90 günlük serilerde %74 oranında arttırmaktadır.

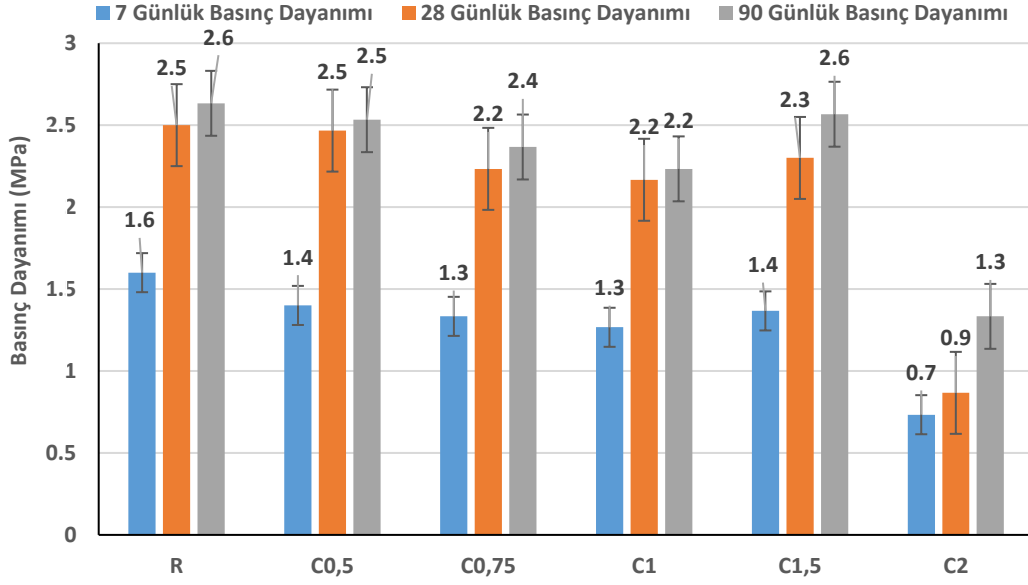
6.6 Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda alınan basınç dayanımına ilişkin veriler Tablo 6.3'te verilmiştir.

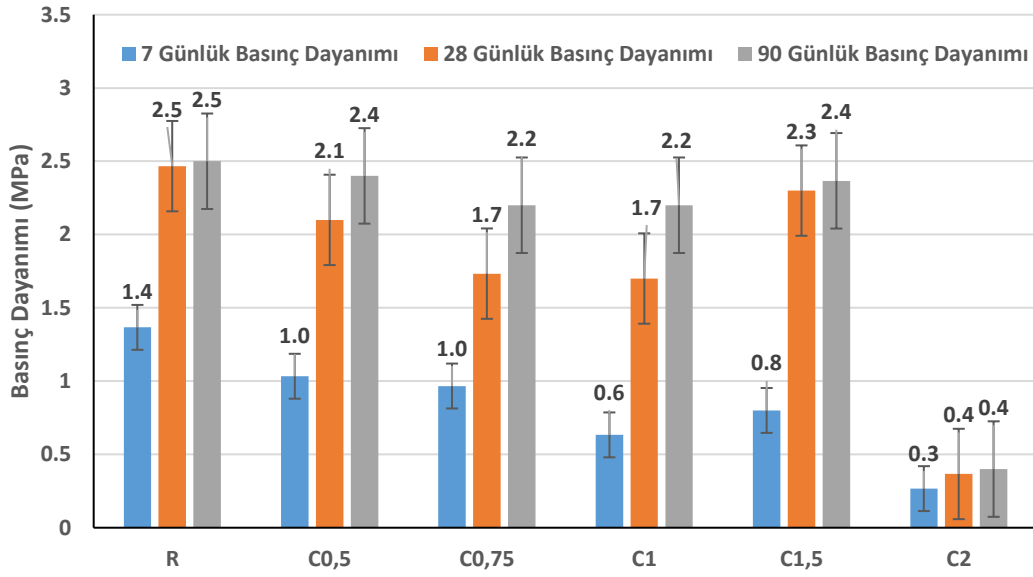
Tablo 6.3 Tek eksenli basınç dayanımı deney sonuçları

7 GÜNLÜK BASINÇ DENEYLERİ								
KÜP NUMUNELERİN BASINÇ DENEYLERİ					EĞİLME DENEYİ SONRASI BASINÇ DENEYLERİ			
Seri Adı	Basınç Dayanımı (MPa)			Ortalama	Basınç Dayanımı (MPa)			Ortalama
R	1,7	1,5	1,6	1,6	1,3	1,4	1,4	1,4
C0,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,1	1,0	1,0	1,0
C0,75	1,3	1,4	1,3	1,3	0,9	1,0	1,0	1,0
C1,0	1,3	1,3	1,2	1,3	0,6	0,7	0,6	0,6
C1,5	1,4	1,3	1,4	1,4	0,8	0,8	0,8	0,8
C2	0,6	0,8	0,8	0,7	0,2	0,3	0,3	0,3
28 GÜNLÜK BASINÇ DENEYLERİ								
KÜP NUMUNELERİN BASINÇ DENEYLERİ					EĞİLME DENEYİ SONRASI BASINÇ DENEYLERİ			
Seri Adı	Basınç Dayanımı (MPa)			Ortalama	Basınç Dayanımı (MPa)			Ortalama
R	2,5	2,4	2,6	2,5	2,5	2,4	2,5	2,5
C0,5	2,4	2,4	2,6	2,5	2,7	1,9	1,7	2,1
C0,75	2,1	2,4	2,2	2,2	1,7	1,9	1,6	1,7
C1,0	2,3	2,1	2,1	2,2	1,8	1,8	1,9	1,9
C1,5	2,4	2,4	2,1	2,3	2,2	2,4	2,3	2,3
C2	0,9	0,8	0,9	0,9	0,3	0,4	0,4	0,4
90 GÜNLÜK BASINÇ DENEYLERİ								
KÜP NUMUNELERİN BASINÇ DENEYLERİ					EĞİLME DENEYİ SONRASI BASINÇ DENEYLERİ			
Seri Adı	Basınç Dayanımı (MPa)			Ortalama	Basınç Dayanımı (MPa)			Ortalama
R	2,5	2,5	2,9	2,7	2,6	2,3	2,6	2,5
C0,5	2,5	2,7	2,4	2,5	2,3	2,4	2,5	2,4
C0,75	2,5	2,2	2,4	2,4	2,4	2,1	2,1	2,2
C1,0	2,1	2,3	2,3	2,2	2,3	2,2	2,1	2,2
C1,5	2,4	2,4	2,9	2,6	2,6	2,4	2,1	2,3
C2	1,3	1,5	1,2	1,3	0,4	0,4	0,4	0,4

Tablo 6.3'te yer alan tekil değerler Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da grafik olarak verilmiştir.



Şekil 6.15 Küp numunelerde basınç deneyi sonuçları



Şekil 6.16 Kırık prizma numunelerde basınç deneyi sonuçları

Yapılan deneylerde %1 oranına kadar kazein ilavesinin 90 günlük basınç dayanımını %10-15 oranında azalttığı gözlemlenmiştir. Bu düşüşün sebebinin malzemeye sürüklenen hava boşlukları olduğu düşünülmektedir. Yapılan deneylerin sonucunda %1,5 oranda kazein ilavesi ile basınç dayanımı değeri referans numuneye kıyasla azalırken %1 oranında kazein ilave edilen kireç harcına göre %8-13 oranında artış göstermiştir. Kazein ilave edildikçe azalan basınç

dayanımının %1,5'den yüksek oranda kazein ilave edildiğinde artıyor olmasının harç suyuna ilave edilmiş olan kazeinin aglomerasyon eğiliminin artmasından kaynaklanıyor olabileceği düşünülmektedir. Harca %2 oranında kazein ilave edildiğinde harcın basınç dayanımı değerleri beklenmedik oranda düşmektedir. Deneylerden alınan veriler ve kireç harcının görüntüsü itibari ile yürütülen deneylerde, serilerden C1,5 serisinde bir miktar, C2 serisinde ise yoğun miktarda segregasyon tespit edilmiştir. Belirtilen seriler ile diğer seriler arasındaki basınç dayanımı farkının söz konusu taze harç serilerinin kalıplara yerleştirilmesi esnasında segregasyon sonucu meydana gelebilecek hapsolmuş hava boşluklarından oluşmuş olabileceği düşünülmektedir.

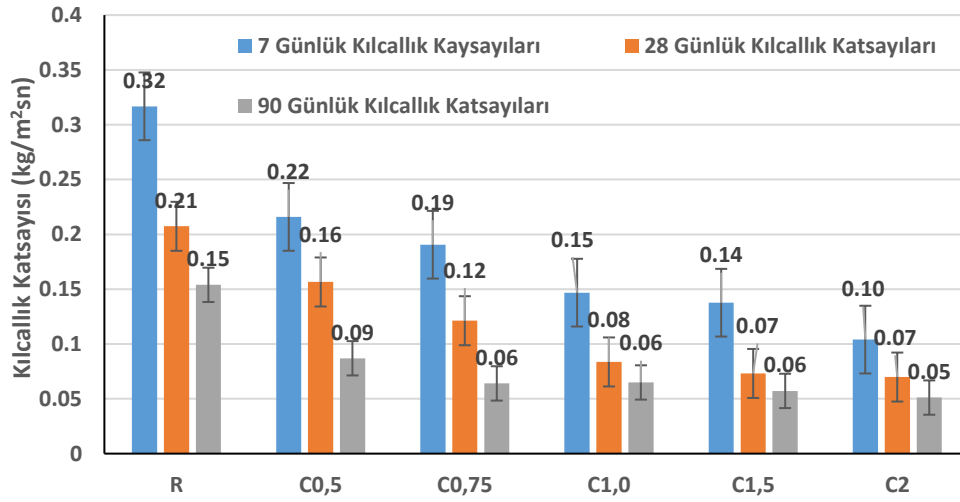
6.7 Kılcallık Deneyi Sonuçları

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda her bir numuneye ait Q_i/A grafiği oluşturulmuş, oluşturulan grafikler Ek-A'da sunulmuştur. Grafiklerden belirlenen kılcallık katsayılarına ilişkin veriler Tablo 6.4'te verilmiştir.

Tablo 6.4 Kılcallık deneyi sonuçları

Kılcallık Katsayısı ($kg/m^2\sqrt{sn}$)				
	Seri Adı	Numune 1	Numune 2	Numune 3
7. Gün	R	0,304	0,315	0,332
	C0,5	0,216	0,215	0,217
	C0,75	0,185	0,200	0,186
	C1,0	0,143	0,150	0,148
	C1,5	0,117	0,121	0,175
	C2	0,110	0,098	0,103
28. Gün	R	0,215	0,181	0,226
	C0,5	0,147	0,158	0,164
	C0,75	0,106	0,130	0,128
	C1,0	0,085	0,092	0,074
	C1,5	0,067	0,085	0,067
	C2	0,067	0,084	0,067
90. Gün	R	0,154	0,152	0,156
	C0,5	0,076	0,088	0,096
	C0,75	0,064	0,064	0,064
	C1,0	0,048	0,085	0,062
	C1,5	0,059	0,058	0,055
	C2	0,050	0,057	0,046

Tablo 6.4'te yer alan veriler kullanılarak hesaplanan ortalama değerler üzerinden hazırlanan kılcallık katsayısı değerleri Şekil 6.17'de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 6.17 Kılcallık deneyi sonuçları

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre kireç harcına ilave edilen kazein oranı arttıkça kılcallık katsayısı azalmaktadır. 7. gün yapılan deneyde kireç harcı numunesine %2 oranında kazein ilave edilmesi ile numunenin kılcallık katsayısında %68,75 azalma gözlemlenmiştir. 28. gün ve 90. gün yapılan deneyde kireç harcı numunesine %2 oranında kazein ilave edilmesi ile numunenin kılcallık katsayısında %66,7 azalma gözlemlenmiştir. Bu da kireç harcına eklenen kazein oranı arttıkça kireç harcının içerisindeki kılcal boşluklarının azaldığını göstermektedir.

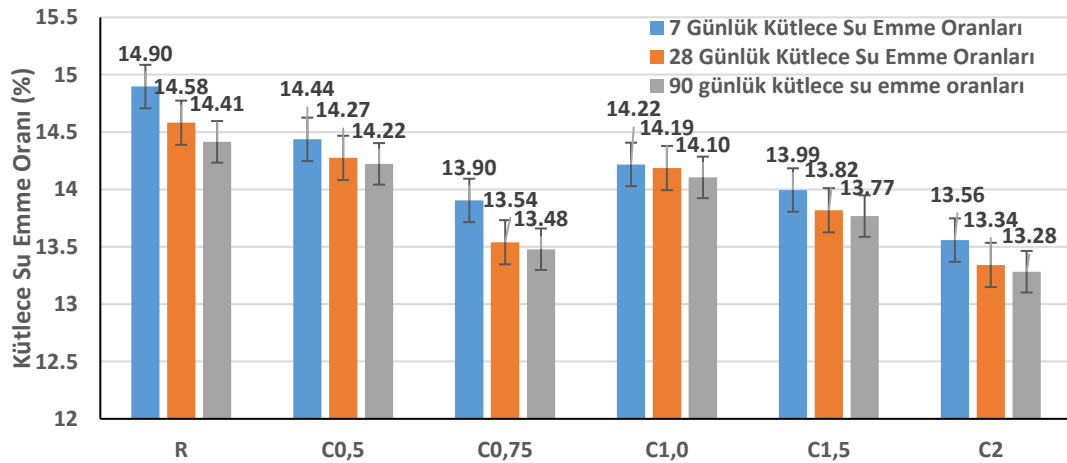
6.8 Su Emme Deneyi Sonuçları

Yapılan su emme deneyine ilişkin sonuçlar Tablo 6.5'te verilmiştir.

Tablo 6.5 Su emme deneyi sonuçları

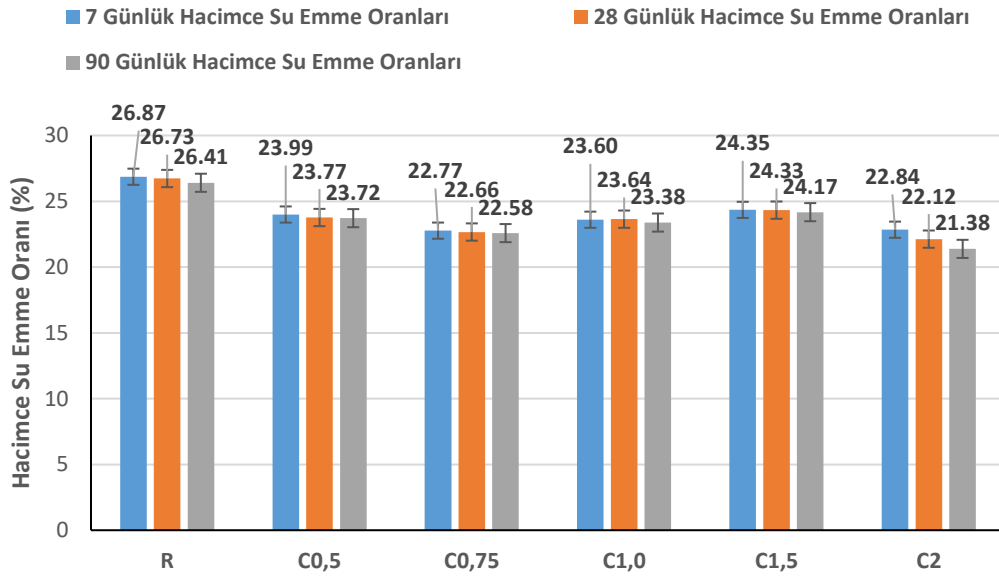
Deney Yaşı	Seri Adı	Kütlece Su Emme %	Hacimce Su Emme %
7. Gün	R	14,9	26,9
	C0,5	14,4	24,0
	C0,75	13,9	22,8
	C1,0	14,2	23,6
	C1,5	14,0	24,3
	C2	13,6	22,8
28. Gün	R	14,6	26,7
	C0,5	14,3	23,8
	C0,75	13,5	22,7
	C1,0	14,2	23,6
	C1,5	13,8	24,3
	C2	13,3	22,1
90. Gün	R	14,4	26,4
	C0,5	14,2	23,7
	C0,75	13,5	22,6
	C1,0	14,1	23,4
	C1,5	13,8	24,2
	C2	13,2	21,4

Tablo 6.5'te yer alan veriler kullanılarak deney sonuçları aşağıdaki grafiklerde düzenlenmiştir (Şekil 6.18 ve 6.19).



Şekil 6.18 Kütlece su emme oranları

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre kireç harcına belirli bir orana kadar kazein ilave edilmesi ile harcın kütlece su emme oranı düşmektedir. Şekil 6.18’de gösterilen verilere göre kireç harcına %0,75 oranında kazein ilave edilmesi ile harcın kütlece su emme % 6-10 oranında düşmektedir. Kireç harcına %1 oranında kazein ilave edildiğinde harcın kütlece su emme oranı, referans numuneye göre bir miktar azalırken %0,75 oranında kazein içeren C2 serisine ait numunelere göre artmaktadır.



Şekil 6.19 Hacimce su emme oranları

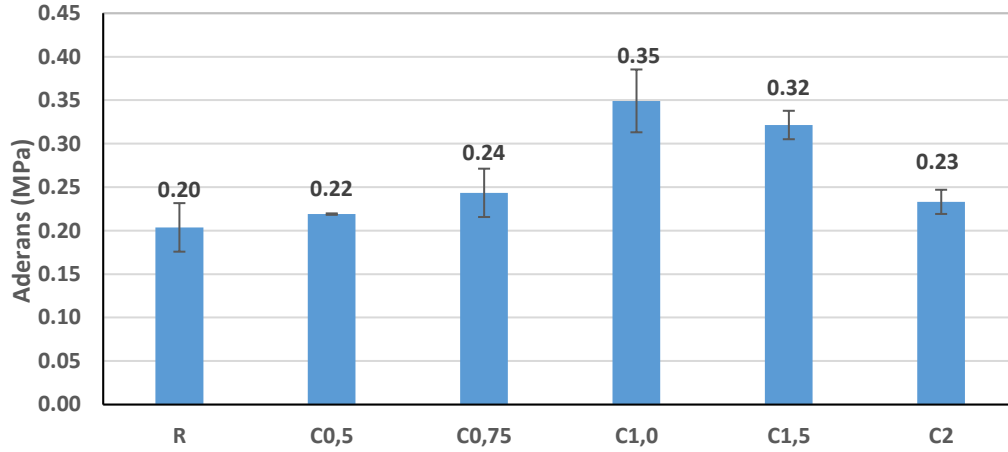
Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre kireç harcına kazein ilave edilmesi ile harcın hacimce su emme oranı %6-10 oranında düşmektedir.

6.9 Aderans Deneyi Sonuçları

Deney sonunda elde edilen kopma yükü, kesit alanına bölünerek aderans değerleri hesaplanmıştır. Yapılan aderans deneyine ilişkin veriler Tablo 6.6’da ve Şekil 6.20’de verilmiştir.

Tablo 6.6 Aderans deneyi sonuçları

Seri	Ortalama Aderans (MPa)	Kırılma Modu
R	0,20	Arayüzeyden
C0,5	0,22	Arayüzeyden
C0,75	0,24	Harçtan-Arayüzeyden
C1	0,35	Harçtan
C1,5	0,32	Harçtan
C2	0,23	Harçtan-Arayüzeyden



Şekil 6.20 Aderans deneyi sonuçları

90. gün yapılan aderans dayanımı deneyi sonuçları, kireç harcının içerisine eklenen kazein miktarının %1 oranına kadar arttırılmasının aderans özelliğini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Kireç harcına %1 oranında kazein ilave edilmesi, harcın aderansını %60 oranında arttırmıştır. Kireç harcına %1 oranına kadar kazein eklenmesi ile harcın aderans özelliği referans numuneye göre artış gösterirken %1 oranında kazein ilave edilmiş olan kireç harcına göre %9 azalmıştır.

Doğal hidrolik kireç esaslı sistemlerin taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini araştırmak amacıyla yapılan deneysel çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Yayılma deneyi sonuçlarına göre harcın içerisindeki kazein oranı arttıkça yayılma çapı değerleri de artmaktadır.
- Birim hacim kütlesi deneyi sonuçlarına göre kireç harcı içindeki kazeinin %1 oranına kadar arttırılmasının harcın birim hacim kütlesini düşürdüğü; ancak bunun üzerinde kazein kullanımının birim hacim kütlesini arttırdığı tespit edilmiştir.
- Priz süresi deneyi sonuçlarına göre karışımlara eklenen kazein oranının artması ile priz başlangıç ve bitiş süreleri uzamaktadır.
- Reolojik analiz sonuçlarına göre taze haldeki kireç hamuruna %1 oranında kazein ilave edildiğinde hamurun viskozitesi referans numuneye göre düşmektedir. Hamura %1,5 oranında veya daha fazla kazein ilave edildiğinde viskozite değerleri artmaktadır. Taze haldeki kireç hamuruna ilave edilen kazein oranı arttıkça kireç hamurunun eşik kayma gerilmesi düşmektedir.
- Kazein oranı %1,5 ve %2 olan serilerden elde edilen sonuçlar hariç tutulduğunda, eşik kayma gerilmesi ve yayılma çapı arasında yapılan doğrusal regresyon analizi neticesinde yüksek korelasyonlu ($R=0,996$) bir ilişki kurulmuştur.
- Eğilme dayanımı deneyi sonuçlarına göre kazein ilave edilmesi ile harçların eğilme dayanımı -farklı oranlarda olmak üzere- genellikle artmaktadır.
- Basınç dayanımı deneyi sonuçlarına göre kazein ilavesi basınç dayanımını değişen oranlarda olmak üzere çoğunlukla azaltmaktadır.
- Kılcallık deneyi sonuçlarına göre kireç harcına ilave edilen kazein oranı arttıkça kılcallık katsayısı azalmaktadır.

- Su emme deneyi sonuçlarına göre kireç harcına belirli bir orana kadar (%1-1,5) kazein ilave edilmesi ile harcın kütlece ve hacimce su emme oranı az bir miktar da olsa düşmektedir.
- Aderans deneyi sonuçlarına göre kazein ilavesi ile tuğla-harç aderansı artmaktadır. Bu artış, %1 kazein oranı için maksimum olurken, artan kazein oranı için söz konusu etkinin azaldığı görülmüştür.

Yukarıda dikkate alınan taze ve sertleşmiş hal özelliklerine göre kazeinin doğal hidrolik kireç esaslı karışımlarda %1 oranına kadar kullanımının harcın işlenebilmesine ve yığma birim ile arasındaki aderansına belirgin şekilde olumlu etki ettiği görülmüştür. Bununla birlikte, kazein ilavesi ile artan priz süresinin ve değişen boşluk oranlarının da mutlaka dikkate alınması gerekmektedir. Ayrıca salt harcın mekanik özelliklerindeki değişimin daha detaylı ele alınması, bunların nedenlerinin içyapı özelliklerindeki değişim ile detaylandırılması ve kazein ile üretilen harçların dayanıklılık özelliklerinin de mutlaka araştırılması gerekmektedir.

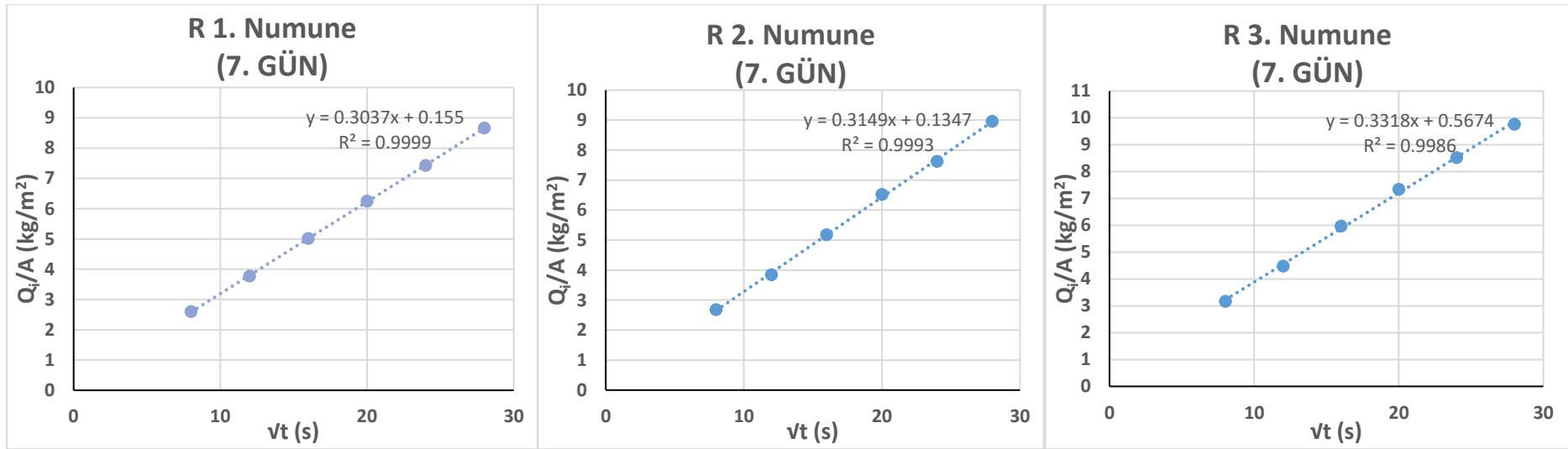
KAYNAKÇA

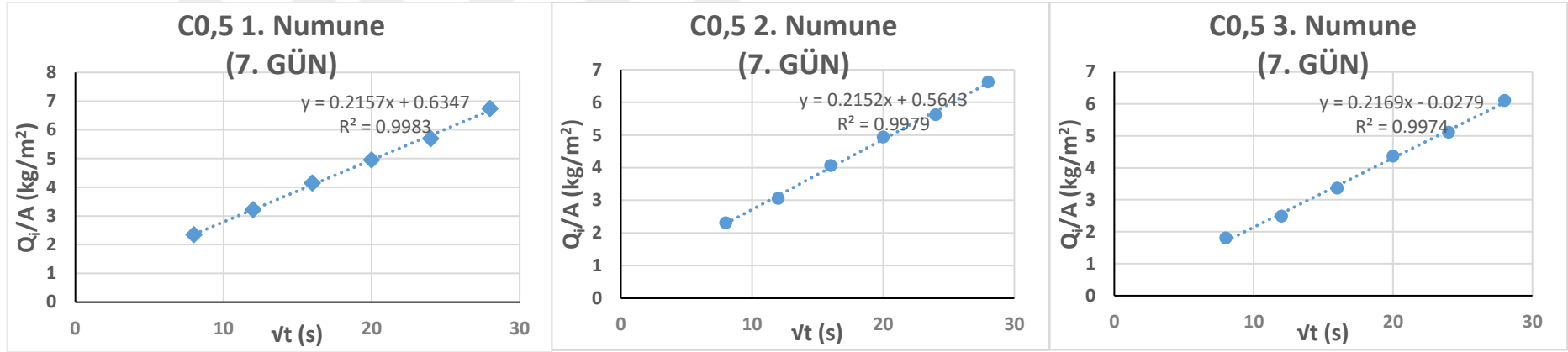
- [1] Ülkay, S., (1990). “Yapı Malzemesi, Yapı Elemanları ve Malzemeleri Bilim Dalı”, Yıldız Üniversitesi Yayın Evi, İstanbul.
- [2] Crhova, M., Kuckova, S., Hynek R., Kodicek, M., (2010). “Proteomic Identification of Milk Proteins in Historical Mortars”, 2. Historic Mortars, Prague, Czech Republic.
- [3] Doğru Ü., Dayıoğlu H., Aksoy, A., (1997), “Esmer, Siyah-alaca, Sarı-alaca Sığır Irklarının Süt Proteinleri Bakımından Genetik Yapısı”, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 28(1): 12-20.
- [4] Ginger M.R., Grigor M.R., (1999), “Comparative Aspects of Milk Caseins”, Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol, 124(2): 133-45.
- [5] Eriç, M., (1994) “Yapı Fiziği ve Malzemesi”, Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- [6] Mavi, Ö., (2004), “Kireç Harçlarının ve Sıvaların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [7] Eriç, M., Gürdal, E., Toydemir, N., Ersoy, H.Y., (1989). “Yapı Fiziği Açısından Cephe Kaplamaları Sorunları ve Çözüm Yolları 2”, Dizayn Konstrüksiyon, 1989-48: 18-22.
- [8] Lea M., Ma, X., (1983) “The Chemistry of Cement and Concrete”, İngiltere.
- [9] Laçinyurt, Ş., İstanbul Şehir Suları, Horasan Harçları Üzerine Bir Çalışma Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [10] Boynton, R.S., (1980), “Chemistry and Technology of Lime and Limestone”, 2nd edition. New York: Wiley; 1980.
- [11] Yang, T., Ma, X., Zhang, B., Zhang H., (2016), “Investigations into The Function of Sticky Rice on The Microstructures of Hydrated Lime Putties”. Construction and Building Materials, 102(1): 105-112.
- [12] Singh, M., (2015), “Characterization Of 6 – 11th Century A. D. Decorative Lime Plasters of Rock Cut Caves of Ellora”, Construction and Building Materials, 98: 156–170.
- [13] Ventolà, L., (2011), “Traditional Organic Additives Improve Lime Mortars: New Old Materials for Restoration and Building Natural Stone Fabrics”. Construction and Building, 25: 3313-3318.
- [14] Alvarez L.W., Anderson J.A., Bedwei F.E., et al., (1970) “Search for Hidden Chambers in The Pyramids: The Structure Of The Second Pyramid Of Giza Is Determined By Cosmic-Ray Absorption”, Science, 167: 3919.

- [15] Spence K., (2000), "Ancient Egyptian Chronology and The Astronomical Orientation of Pyramids", *Nature* 2000, 412: 699-700.
- [16] Demortier G., (2004), "PIXE, PIGE And NMR Study of The Masonry Of The Pyramid of Cheops At Giza", *Nucl Instrum Methods Phys Res B*, 1-2 Kasım 2024, 226(1-2): 98-109.
- [17] Delaine J., (1990), "Structural Experimentation: The Lintel Arch, Corbel and Tie in Western Roman Architecture", *World Archaeology*, 21(3): 407-424
- [18] Chu G.C., Ju Y., (1993), "The Great Wall in Ruins: Communication and Cultural Change in China." State University of New York Press, Albany, NY, USA 1993.
- [19] Fang S, Zhang H, Zhang B, Wei G, Li G, Zhou Y., (2013), "A Study of The Chinese Organic-Inorganic Hybrid Sealing Material Used in Huaguang No.1 Ancient Wooden Ship". *Thermochimica Acta*, 551: 20–26
- [20] Xiao Y, Fu X, Gu H, Gao F, Liu S., (2014), "Characterization and Decay of Sticky Rice-Lime Mortars from The Wugang Ming Dynasty City Wall", *Materials Characterization*, China.
- [21] Zeng Y, Zhang B, Liang X., (2008), "A Case Study and Mechanism Investigation of Typical Mortars Used on Ancient Architecture in China". *Thermochimica Acta*, 473(1–2): 1-6, China.
- [22] Maria, S., (2010), "Methods for Porosity Measurement in Lime-Based Mortars". 24(12): 2572-2578.
- [23] Veiga, R., (2017), "Air Lime Mortars: "What Else Do We Need to Know To Apply Them in Conservation and Rehabilitation Interventions". *Construction and Building Materials*, 30 Aralık 2017, 157: 132-140.
- [24] Schneider, M., (2015), "Process Technology for Efficient and Sustainable Cement Production", *Cement and Concrete Research*, 78(A).
- [25] Moorehead, D.R., (1986), "Cementation by The Carbonation of Hydrated Lime". *Cement and Concrete Research*, 16(5): 700-708.
- [26] Athira, V.S., Lekshmi, S., Sharanya, A.G., Tripathi, A., Manohar, S., (2024), "Potential Application of Bio-Admixtures in Synthesizing Traditional Lime Binders- A Comprehensive Review". *Journal of Building Engineering*, 90: 109464.
- [27] Sungur, O., (2013), "Katkılı Taze Betonların Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [28] Brzyski, P., Suchorab, Z., Lagod, G., (2021), "The Influence of Casein Protein Admixture on Pore Size Distribution and Mechanical Properties of Lime-Metakaolin Paste", *Materials. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Lublin University of Technology, Nadbystrzycka*, 40: 20-618 Lublin, Poland.
- [29] Çiçek, T., (1999), "Kireç ve Kullanımı", 3. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir.
- [30] Pitkowski A., Durand D., Nicolai T., (2008), "Structure and Dynamical Mechanical Properties of Suspensions of Sodium Caseinate", *J Colloid Interface Sci.*, 1 Ekim 2008, 326(1): 96-102.

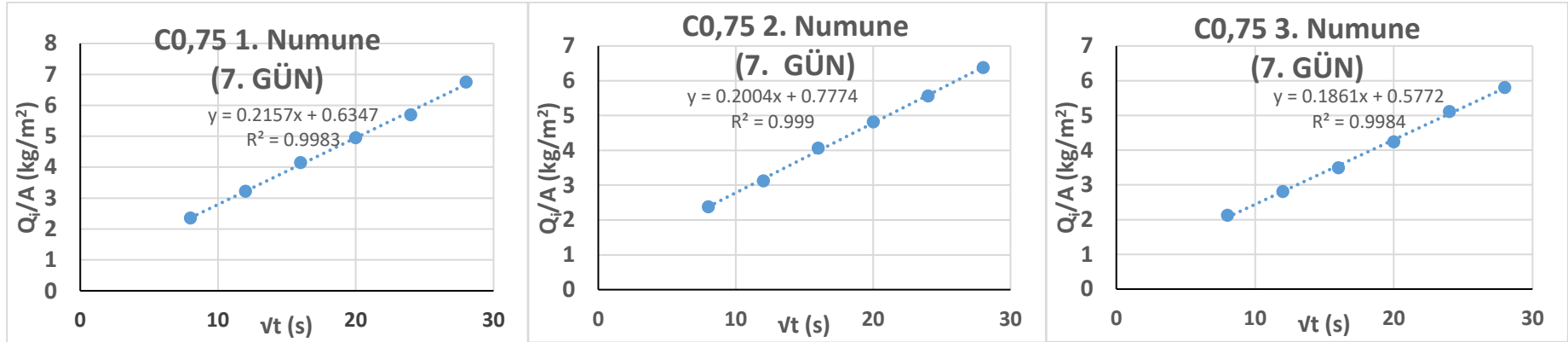
- [31] Brzyski, P .; Boris, R., (2023), “The Influence of Acid Casein on the Selected Properties of Lime–Metakaolin Mortars Materials”. *Materials*, 16(21): 7050
- [32] Chu, B., Zhou, Z., Wu, G., Farrell, H.M., (1995), “Laser Light Scattering of Model Casein Solutions: Effects of High Temperature”. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1 Mart 1995, 170(1): 102-112
- [33] Bian, H., Plank, J., (2013), “Effect of Heat Treatment on The Dispersion Performance of Casein Superplasticizer Used in Dry-Mix Mortar”. *Cement and Concrete Research*, 51: 1-5
- [34] Lanás J, Álvarez-Galindo JI., (2003), “Masonry Repair Lime-Based Mortars: Factors Affecting the Mechanical Behavior”, *Cem Concr. Res.*, 33(11): 1867–76.
- [35] Falkjar, K., Erochko, J., Santana M., Lacroix D., (2019) “An Experimental Study on The Effects of Casein Protein in Unreinforced Lime Mortar Specimens”. Carleton University Ottawa, Ontario
- [36] Chandra S. Aavik, J., (1987), "Influence of Proteins on Some Properties of Portland Cement Mortar", *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 9:2 91-94.
- [37] Bras, A.M.A., Henriques F.M.A., Cidade, M.T., (2013), “Rheological Behaviour of Hydraulic Lime-based Grouts Shear-Time and Temperature Dependence”, 17(2).
- [38] Bras, A.M.A., (2011). “Grout Optimization for Masonry Consolidation”, *Doktora Tezi, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa*.
- [39] Yüzer, N., (2017), “Yapı Malzemelerinin Şekil Değiştirme Özellikleri”, *Yayınlanmamış Ders Notu, YTÜ, İstanbul*.
- [40] TS EN 1015-2, (2000). Kâgir Harcı-Deney Metotları-Bölüm 2: İmalatta Kullanılan Harç Yığınlarından Numune Alma ve Deney İçin Hazırlama, TSE, Ankara.
- [41] TS EN 1015-3, (2000). Kâgir Harcı-Deney Metotları-Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası ile), TSE, Ankara.
- [42] TS EN 1015-6, (2000). Kâgir Harcı-Deney Metotları-Bölüm 6: Taze Harcın Boşluklu Birim Hacim Kütlesinin Tayini, TSE, Ankara.
- [43] TS EN 1015-11, (2000). Kâgir Harcı-Deney Metotları-Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini, TSE, Ankara.
- [44] TS EN 1015-18, (2000). Kâgir Harcı-Deney Metotları-Bölüm 18: Sertleşmiş Harcın Kapiler Etkiden Kaynaklanan Su Emme Katsayısının Tayini, TSE, Ankara.
- [45] TS EN 459-1, (2015). Yapı kireci - Bölüm 1: Tarifler, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, TSE, Ankara.

KILCALLIK KATSAYISI ANALİZ GRAFİKLERİ

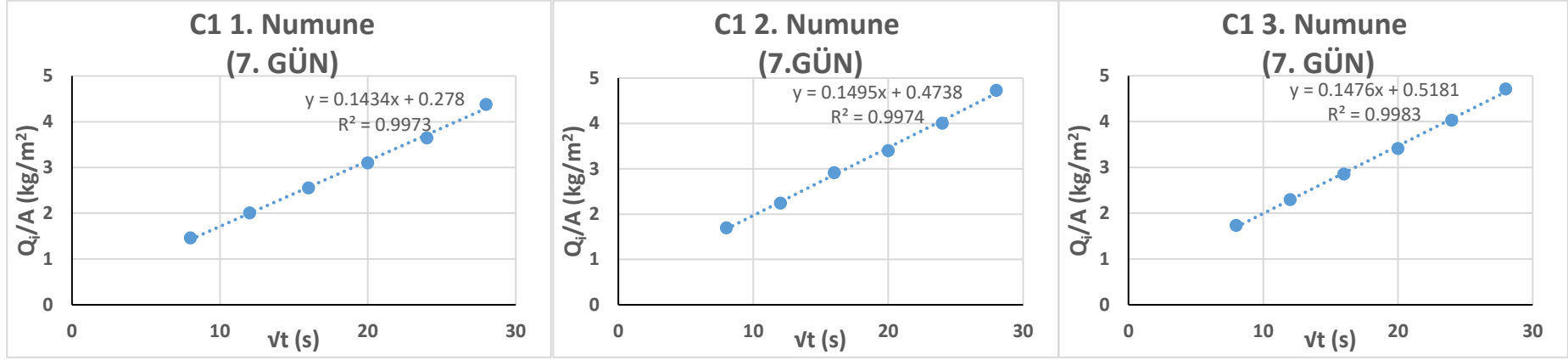
Şekil Ek A.1 R serisine ait 7 günlük (Q_i/A) - ($\sqrt{t}$) grafikleri



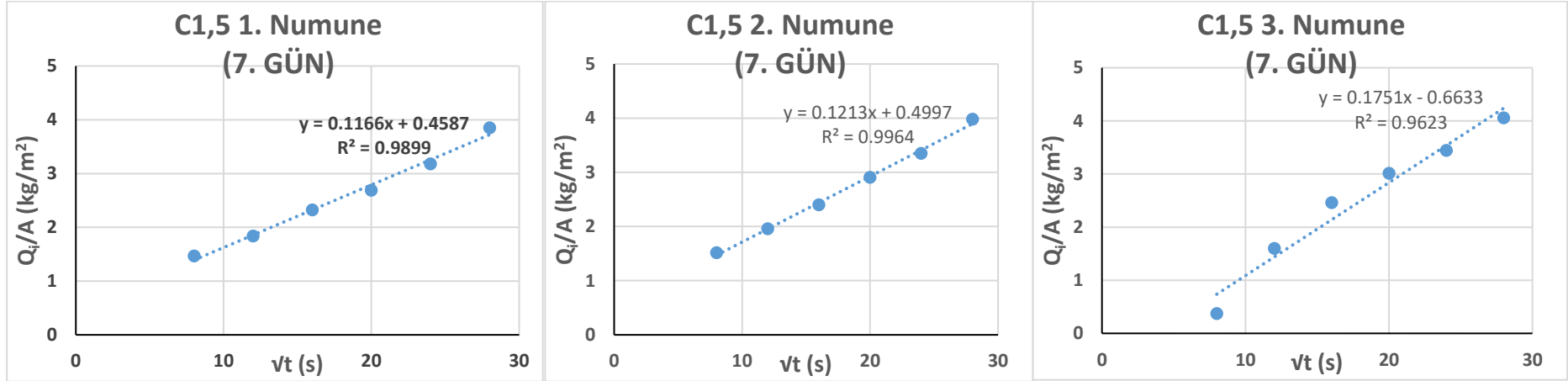
Şekil Ek A.2 C0,5 serisine ait 7 günlük (Q_i/A) - ($\sqrt{t}$) grafikleri



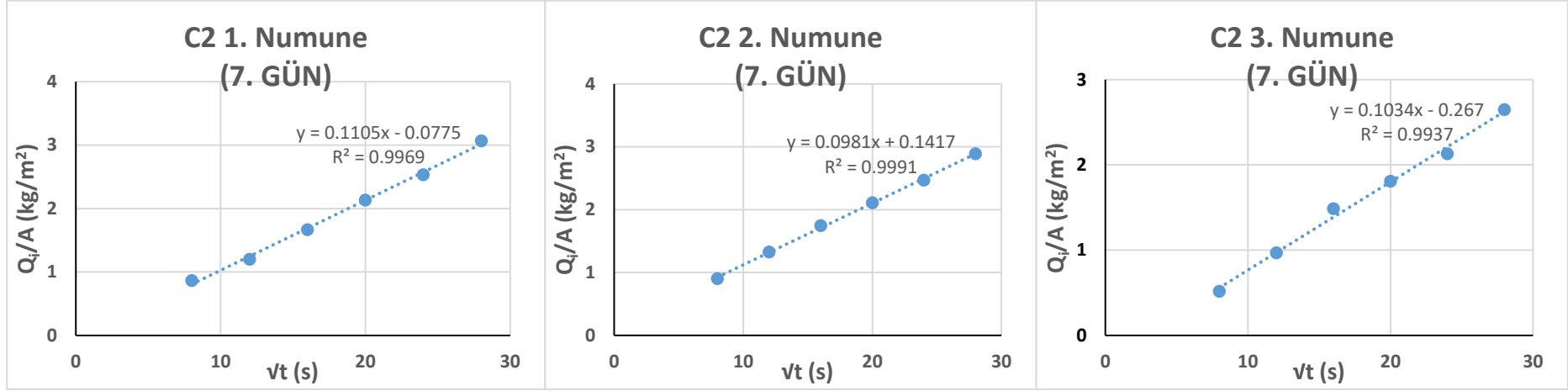
Şekil Ek A.3 C0,75 serisine ait 7 günlük (Q_i/A) - ($\sqrt{t}$) grafikleri



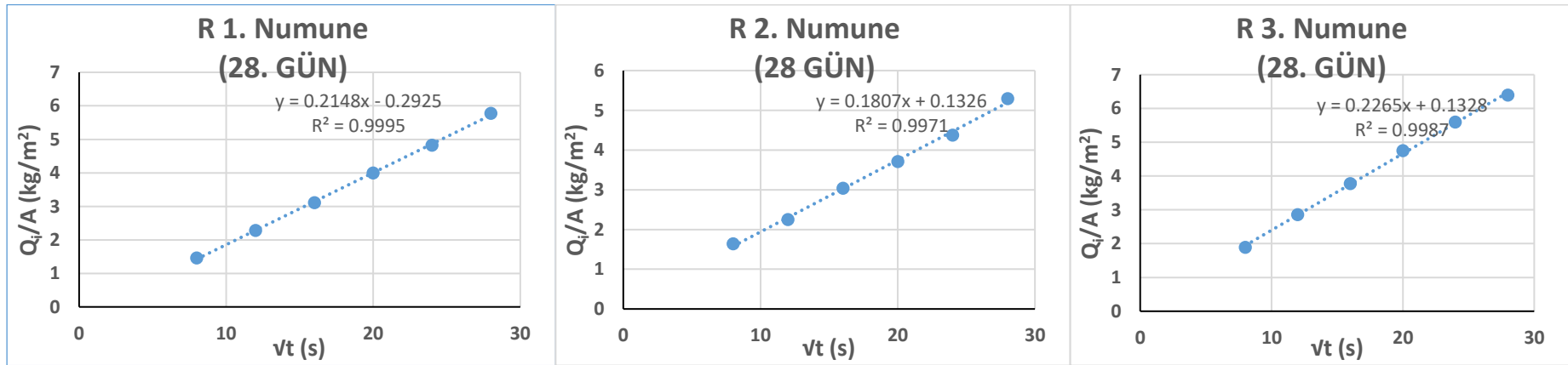
Şekil Ek A.4 C1 serisine ait 7 günlük (Q_i/A) - ($\sqrt{t}$) grafikleri



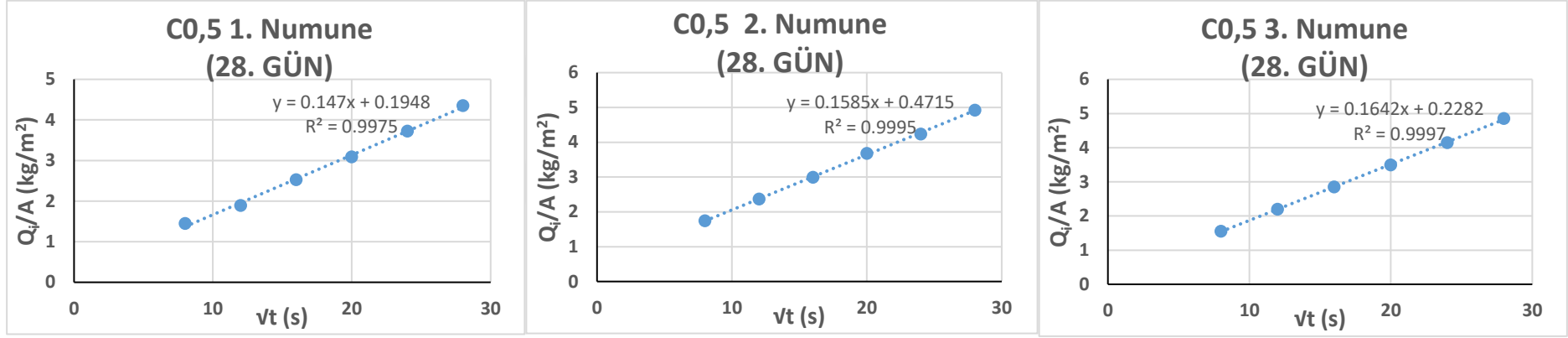
Şekil Ek A.5 C1,5 serisine ait 7 günlük (Q_i/A) - ($\sqrt{t}$) grafikleri



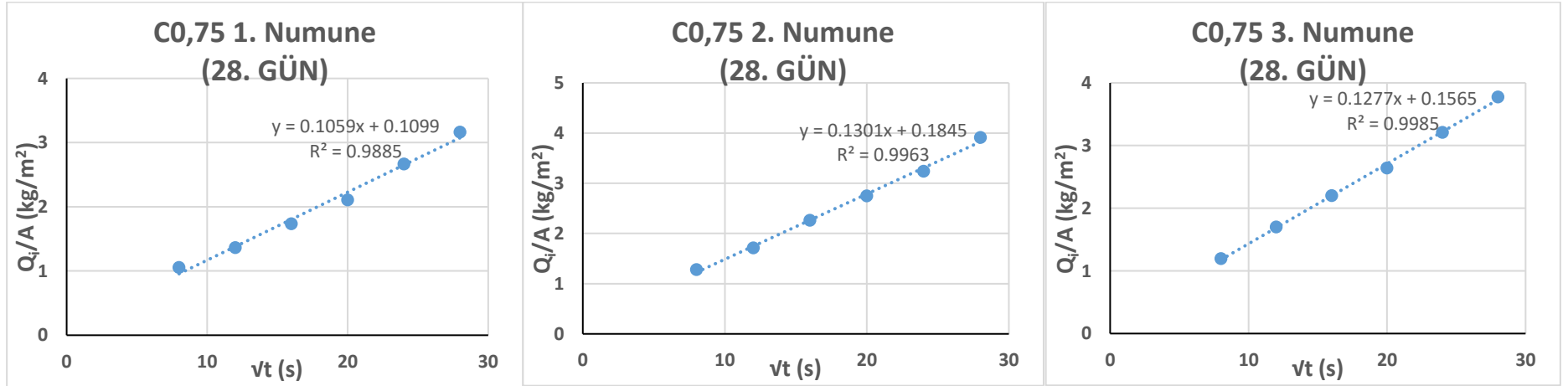
Şekil Ek A.6 C2 serisine ait 7 günlük (Q_i/A) - ($\sqrt{t}$) grafikleri



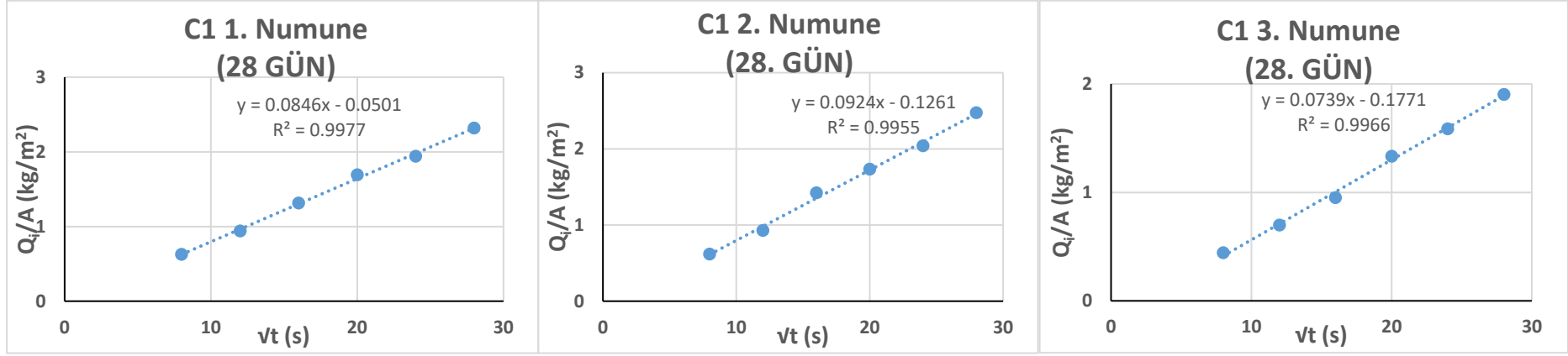
Şekil Ek A.7 R serisine ait 28 günlük (Q_i/A) - ($\sqrt{t}$) grafikleri



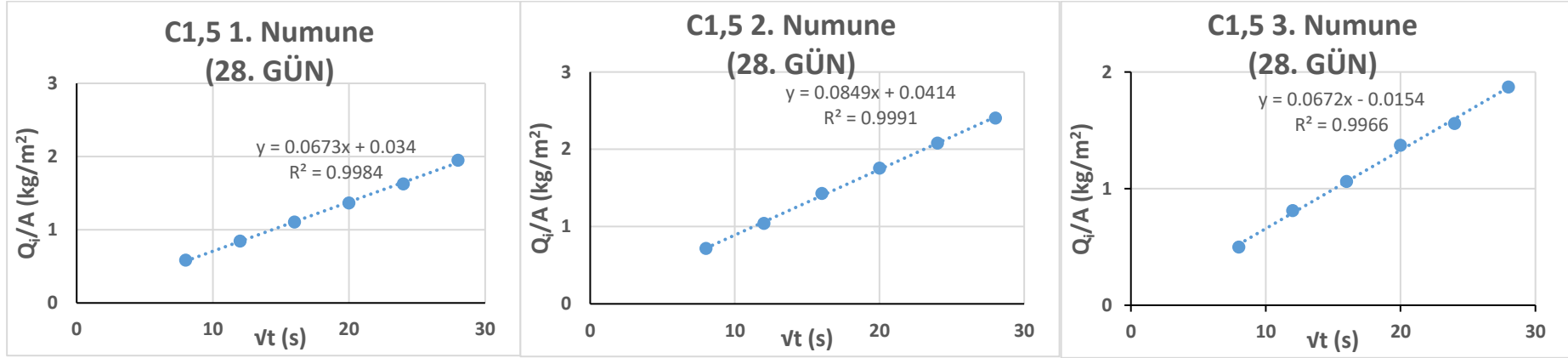
Şekil Ek A.8 C0,5 serisine ait 28 günlük $(Q_i/A) - (\sqrt{t})$ grafikleri



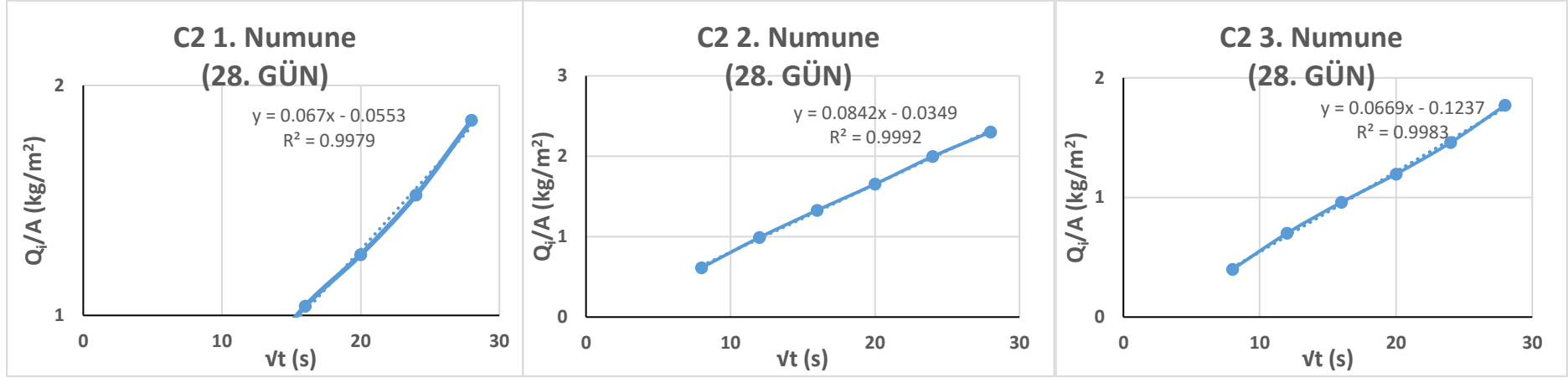
Şekil Ek A.9 C0,75 serisine ait 28 günlük $(Q_i/A) - (\sqrt{t})$ grafikleri



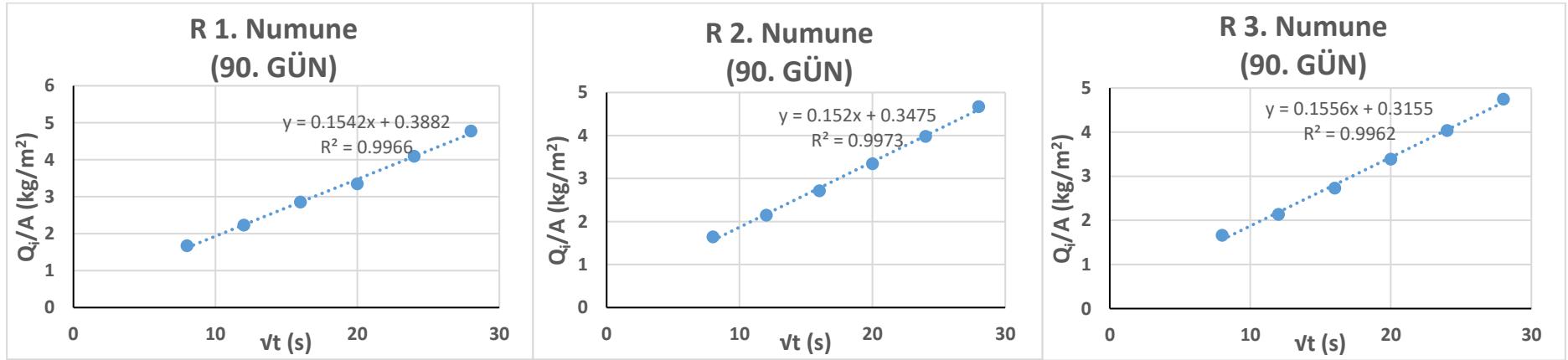
Şekil Ek A.10 C1 serisine ait 28 günlük (Q_i/A) - ($\sqrt{t}$) grafikleri



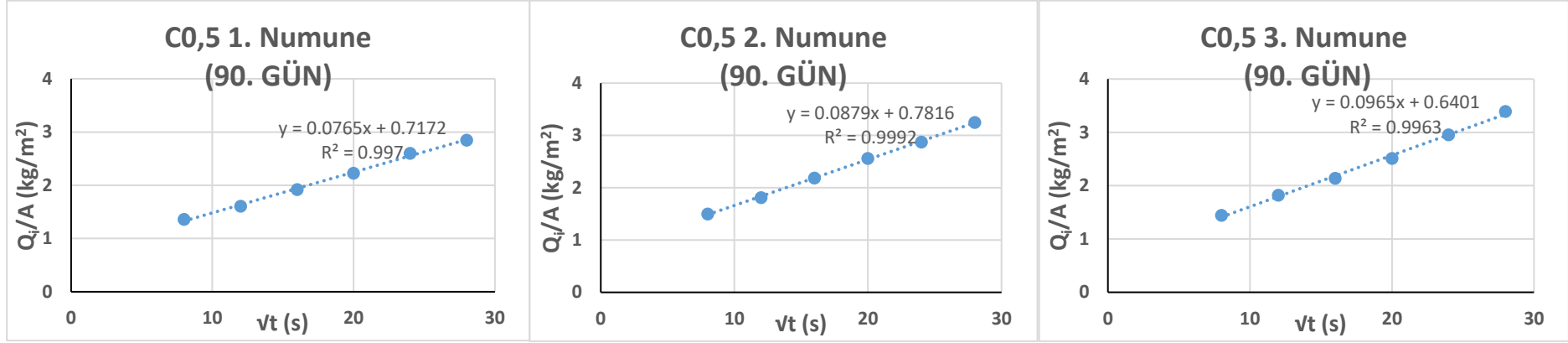
Şekil Ek A.11 C1,5 serisine ait 28 günlük (Q_i/A) - ($\sqrt{t}$) grafikleri



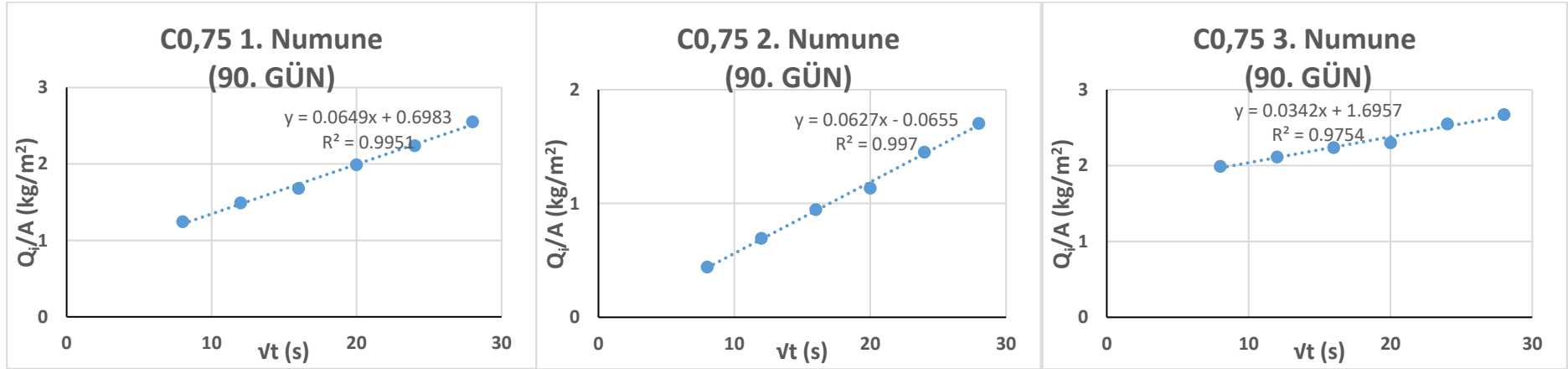
Şekil Ek A.12 C2 serisine ait 28 günlük (Q_i/A) - ($\sqrt{t}$) grafikleri



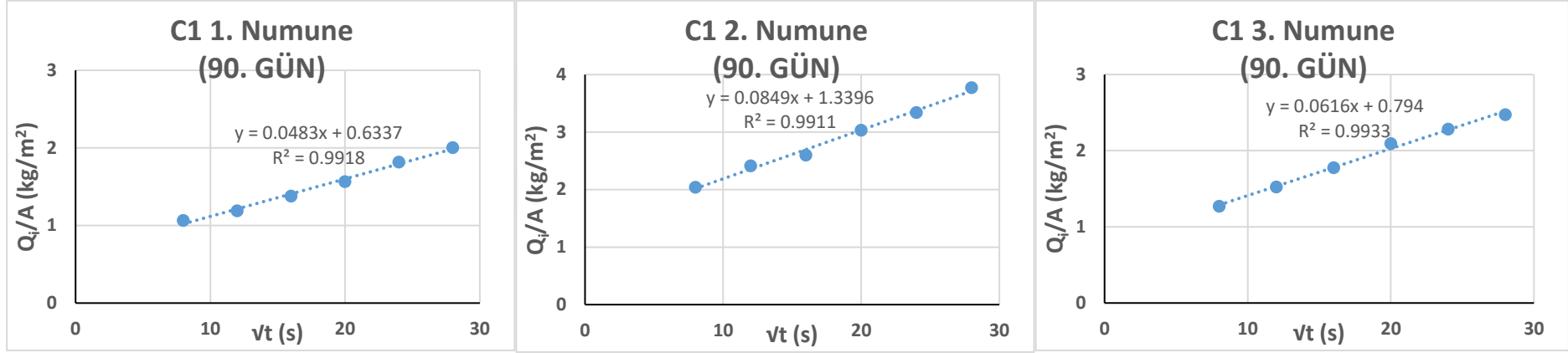
Şekil Ek A.13 R serisine ait 90 günlük (Q_i/A) - ($\sqrt{t}$) grafikleri



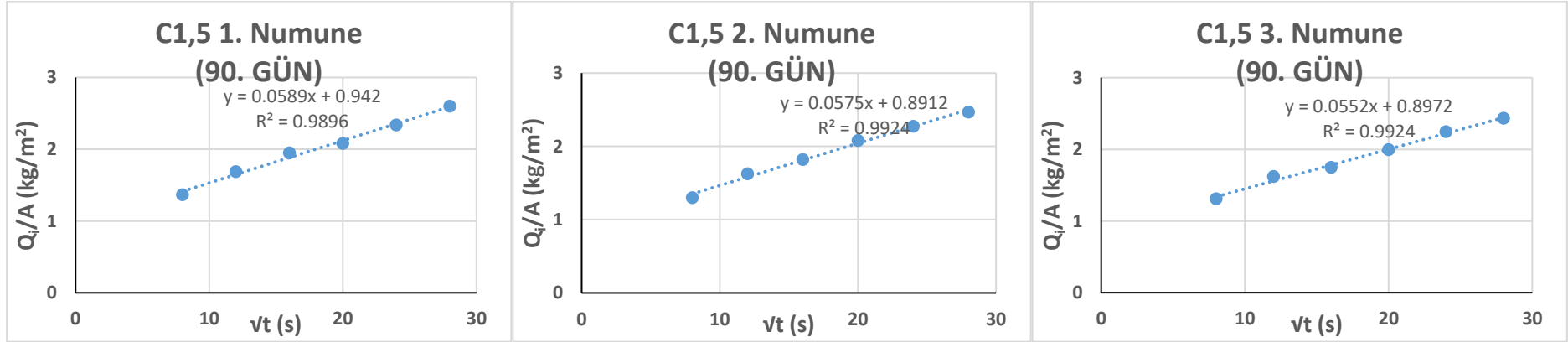
Şekil Ek A.14 C0,5 serisine ait 90 günlük (Q_i/A) - ($\sqrt{t}$) grafikleri



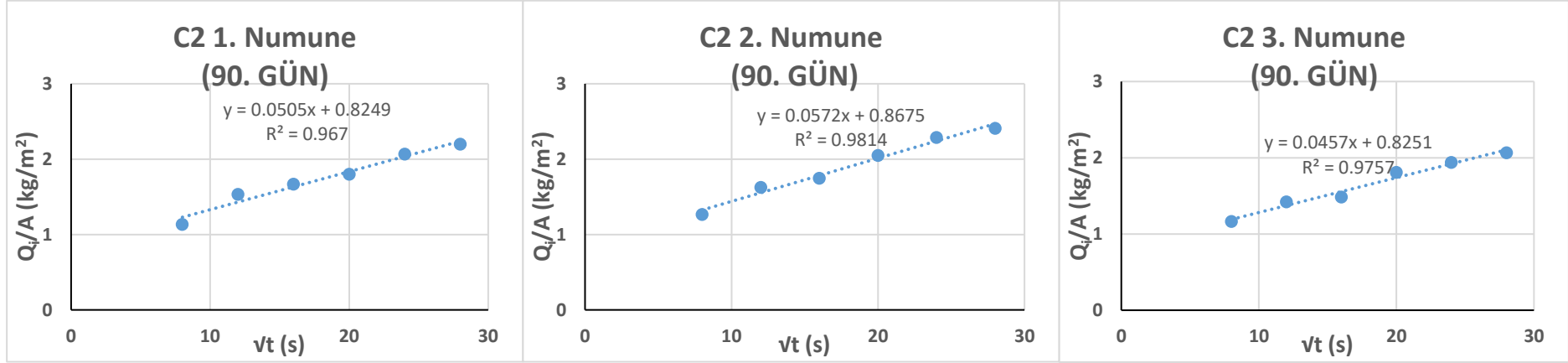
Şekil Ek A.15 C0,75 serisine ait 90 günlük (Q_i/A) - ($\sqrt{t}$) grafikleri



Şekil Ek A.16 C1 serisine ait 90 günlük (Q_i/A) - ($\sqrt{t}$) grafikleri



Şekil Ek A.17 C1,5 serisine ait 90 günlük (Q_i/A) - ($\sqrt{t}$) grafikleri



Şekil Ek A.18 C2 serisine ait 90 günlük (Q_i/A) - ($\sqrt{t}$) grafikleri

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

[1] İnan A., Ulukaya S., (2024), “Tarihi Yapıların Onarım Harçlarında Kazein Kullanımı”, 11. Uluslararası Mühendislik ve Teknoloji Yönetimi Kongresi, 16-17 Mart, İstanbul.

