

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**BİNA ISI YALITIM UYGULAMALARINDA KULLANILACAK ALTERNATİF
ISI YALITIM MALZEMESİ ÖNERİSİ**

Neslihan AKIN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARLIK

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

HAZİRAN 2025

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**BİNA ISI YALITIM UYGULAMALARINDA KULLANILACAK ALTERNATİF
ISI YALITIM MALZEMESİ ÖNERİSİ**

Neslihan AKIN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİMARLIK

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

HAZİRAN 2025

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİNA ISI YALITIM UYGULAMALARINDA KULLANILACAK ALTERNATİF
ISI YALITIM MALZEMESİ ÖNERİSİ

NESLİHAN AKIN

MİMARLIK

ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

Bu tez 16/06/2025 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hacer MUTLU DANACI (Danışman)

Prof. Dr. Kemal Reha KAVAS

Prof. Dr. İlknur AKINER

Prof. Dr. Fatih CANAN

Dr. Öğr. Üyesi Hülya KESİCİ

ÖZET

BİNA ISI YALITIM UYGULAMALARINDA KULLANILACAK ALTERNATİF ISI YALITIM MALZEMESİ ÖNERİSİ

Neslihan AKIN

Doktora Tezi, Mimarlık Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hacer MUTLU DANACI

Haziran 2025; 109 sayfa

Küresel anlamda önemi her geçen gün daha da artan çevre sorunları, enerji etkin kullanımına olan ilgiyi arttırmaktadır. Enerji tüketiminde önde gelen sektörlerden biri inşaat sektörü olmakla birlikte binalardaki enerji kullanımının çoğu ısıtma ve soğutma kaynaklıdır. Kullanılan ısı yalıtım malzemelerindeyse tüm yaşam döngüsü boyunca kaynak tüketimini ve atık üretimini en aza indiren, sürdürülebilir, olumsuz çevre etkileri sınırlandırılmış ve insan sağlığı üzerinde risk oluşturmeyen ürünlerin kullanımı ön planda olmalıdır. Buradan hareketle alternatif ısı yalıtım malzemeleri üzerinde araştırma ve geliştirme çalışmaları mevcuttur. Alternatif ısı yalıtım malzemelerine olan yaklaşımlardan biri doğal içerikli, yöresel mimaride kendini kanıtlamış ürünlerin tekrar yapı uygulamalarına kazandırılması iken, bir diğeri ise ileri teknolojilerle geliştirilen üstün performanslı ürünlerin kullanımıdır. Bu çalışmanın amacı yöresel mimaride kullanılan doğal lifleri ve nanoteknoloji ürünü aerogeli kullanarak alternatif ısı yalıtım malzemesi önerisinde bulunmaktadır.

Çimento yapı uygulamalarında yaygın kullanım alanına sahip olmasının yanında çevre etkileri bakımından kullanımının azaltılması olumlu sonuçlar getirdiğinden çalışma kapsamında seçilmiştir. Keçi kılı yöresel mimaride kıl çadırlarda ve çulda geniş kullanım bulduğu için, keten ve kenevir lifleri ise üretimi kolay erişilebilir, geri dönüştürülebilir ve çevre dostu olduğundan çalışma kapsamına alınmıştır. Nanoteknoloji üretimi aerogel ise erişilebilir ve bu alanda üstün performansa sahip olduğu bilindiğinden tercih edilmiştir. Çalışma çimento karışımlarına liflerin ve aerogelin belirli oranlarda ilavesiyle üretilmiş 16 adet numune serisi ile sınırlandırılmıştır. Çalışmada üretilen numuneler agregalı ve agregasız, aerogel ilaveli ve ilavesiz olmasına göre 4 grupta incelenmiştir. Tüm karışımlarda su bağlayıcı oranı 0,5 olarak belirlenmiş, bağlayıcı hacminin %30'u kadar doğal lif ilavesi yapılmıştır. Aerogel ise agregadan ikame agrega hacminin %2 si olacak şekilde karışımlarda yer almıştır. Hazırlanan numuneler fiziksel, mekanik ve termal testlere tabii tutulmuş ve morfolojik değerlendirme için dijital mikroskop görüntüleri incelenmiştir.

Çalışmanın sonucunda, en düşük termal iletkenlik değerini 0,126 W/mK ile agregasız ve aerogel katkılı keten lifi içerikli numune gösterirken en yüksek değer ise 0,655 W/mK Ç kontrol numunesinde izlenmiştir. Çalışmada aerogel katkısı ile toplam porozitenin yükseldiği ve bununla ilintili olarak termal iletkenliğin düştüğü görülmüştür. Basınç dayanımında ise olumsuz etkiye sebep olduğu tespit edilmiştir. Doğal lif katkılarında ise üç lif tipinin de çimento matrisinde homojen dağılamadığı, ancak keçi kılının diğerlerine göre daha iyi matris bağı kurduğu görülmüştür. Tüm lif tiplerinde

termal iletkenlikte olumlu etki gözlenirken gözeneklilikle birlikte su emme oranı artmıştır. Keten ve kenevir lifleri arasında fiziksel, mekanik ve termal özellikler arasında önemli bir fark bulunamamıştır. Agreganın kullanımıyla basınç dayanımı artmış, daha düşük gözeneklilikle birlikte daha yüksek termal iletkenlik değeri ölçülmüştür.

Bu çalışma hem doğal liflerin hem de aerjel kullanımının bir araya getirilerek çevre dostu alternatif ürün ortaya çıkarılması ve bu alanda mimarlara ürün seçiminde farkındalık yaratması özelinde önemlidir.

Sonuç olarak bu çalışma çimento esaslı doğal lif ve aerjel içeren harç karışımlarının alternatif ısı yalıtım malzemesi olarak kullanımı ile ilgili araştırmaların devam edebileceğini göstermektedir.

ANAHTAR KELİMELEER: Aerjel, Çimento Esaslı Malzeme, Fiziksel Özellikler, Keçi Kılı, Kenevir ve Keten Lifi, Mekanik Özellikler, Termal İletkenlik

JÜRİ: Prof. Dr. Hacer MUTLU DANACI

Prof. Dr. Kemal Reha KAVAS

Prof. Dr. İlknur AKINER

Prof. Dr. Fatih CANAN

Dr. Öğr. Üyesi Hülya KESİCİ

ABSTRACT

PROPOSAL FOR AN ALTERNATIVE THERMAL INSULATION MATERIAL TO BE USED IN BUILDING THERMAL INSULATION APPLICATIONS

Neslihan AKIN

PhD Thesis in Architecture

Supervisor: Prof. Dr. Hacer MUTLU DANACI

June 2025; 109 pages

Environmental problems, whose importance is increasing day by day in the global sense, increase the interest in energy efficient use. While one of the leading sectors in energy consumption is the construction sector, most of the energy use in buildings is due to heating and cooling. Therefore, thermal insulation materials should prioritize products that minimize resource consumption and waste production throughout their entire life cycle, are sustainable, have limited adverse environmental impacts, and pose no risks to human health. Based on this approach, research and development efforts on alternative thermal insulation materials are ongoing. While one of the approaches to alternative heat insulation materials is to reintroduce products with natural content and proven themselves in vernacular architecture to building applications, another is to use high performance products developed with advanced technologies. The aim of this study is to propose an alternative thermal insulation material that combines natural fibers used in vernacular architecture with nanotechnology based product aerogel.

Cement, although widely used in building applications, has significant environmental impacts; thus, reducing its usage is considered beneficial and forms the basis for its selection in this study. Goat hair was included due to its historical use in traditional tents and mats, while flax and hemp fibers were selected for their ease of production, recyclability, and eco-friendliness. Aerogel, a nanotechnology product, was chosen for its high performance and accessibility in the insulation field. The study was limited to 16 sample series produced by adding varying proportions of fibers and aerogel to cementitious mixtures. The samples were categorized into four groups based on the presence or absence of aggregates and aerogel. A consistent water-to-binder ratio of 0.5 was used across all mixtures, and natural fibers were added at a volume ratio of 30% of the binder. Aerogel was included at 2% of the aggregate volume as a replacement.

The prepared samples underwent physical, mechanical, and thermal testing, and digital microscopy was used for morphological evaluations. The lowest thermal conductivity value (0.126 W/mK) was observed in the flax fiber sample without aggregate but with aerogel, while the highest (0.655 W/mK) was recorded in the control sample (Ç). Aerogel addition increased total porosity, resulting in reduced thermal conductivity but negatively impacting compressive strength. Among the fiber types, none achieved homogeneous distribution within the cement matrix, though goat hair demonstrated better matrix bonding than the others. All fiber types contributed positively to thermal insulation, albeit increasing water absorption due to higher porosity. No significant differences were observed between flax and hemp in terms of physical,

mechanical, and thermal properties. The use of aggregates improved compressive strength but also led to higher thermal conductivity due to reduced porosity.

This study is significant in combining natural fibers and aerogel to create an environmentally friendly alternative insulation product and in raising awareness among architects about sustainable material choices.

In conclusion, the research demonstrates that cement-based mortars incorporating natural fibers and aerogel have potential for continued development as alternative thermal insulation materials.

KEYWORDS: Aerogel, Cement-Based Material, Physical Properties, Goat Hair, Hemp and Flax Fiber, Mechanical Properties, Thermal Conductivity

COMMITTEE: Prof. Dr. Hacer MUTLU DANACI

Prof. Dr. Kemal Reha KAVAS

Prof. Dr. İlknur AKINER

Prof. Dr. Fatih CANAN

Asst. Prof. Dr. Hülya KESİCİ

ÖNSÖZ

Tez çalışmasında tecrübeleri ile bana rehberlik eden, akademik anlamda gelişimime katkı sağlayan ve manevi olarak da her zorlukta yanımda olan sevgili danışmanım sayın Prof. Dr. Hacer MUTLU DANACI' ya en içten dileklerimle teşekkür ederim. Tez İzleme Komitesi'nde yer alan sayın Prof. Dr. Kemal Reha KAVAS ile sayın Dr. Öğr. Üyesi Hülya Kesici hocalarıma da tez çalışması süresince gösterdikleri destek ve ilettikleri değerli görüşlerinden ötürü teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmamın son aşamasına kadar Tez İzleme Komitesi'nde yer alan sayın Prof. Dr. Çekdar Vakıf AHMETOĞLU'na değerli görüşleri, deneylerime yaptığı katkılar ve sağladığı laboratuvar olanakları için özellikle teşekkür ve minnetlerimi sunarım. Tez çalışmamın deneysel sürecinde laboratuvar imkanlarını kullanmama izin vererek sunduğu çalışma ortamı ile çalışmama katkılar sağlayan Prof. Dr. Niyazi Uğur KOÇKAL'a teşekkür ederim.

Özellikle laboratuvar çalışmalarına yaptıkları destek ve yardımlardan ötürü İpek KUL GÜL'e ve Ar. Gör. Öykü İÇİN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu zorlu yolda ilerlerken maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli annem Fatma BARDAK ve babam Nejat BARDAK'a teşekkür ederim. Birlikte yürüdüğümüz hayat yolunda her türlü zorluğun birlikte üstesinden geldiğim sevgili eşim Batuhan Nurettin AKIN'a bu süreçte de her türlü desteği bana sağladığı ve yanımda olduğu için sevgilerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bu çalışmayı, varlıklarından destek aldığım çok sevdiğim kızlarım Alin ve Lina'ya ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK TARAMASI	5
2.1. Isı Yalıtım Malzemeleri.....	6
2.2. Alternatif Isı Yalıtım Malzemelerine Ait Deneysel Çalışmalar	9
2.2.1. Keçi kılı kullanılarak yapılan çalışmalar	9
2.2.2. Kenevir kullanılarak yapılan çalışmalar	11
2.2.3. Keten kullanılarak yapılan çalışmalar	16
2.2.4. Aerojel kullanılarak yapılan çalışmalar	20
3. MATERYAL VE METOT	28
3.1. Materyaller	28
3.1.1. Çimento.....	28
3.1.2. Agregat.....	28
3.1.3. Keçi kılı	29
3.1.4. Kenevir	30
3.1.5. Keten.....	32
3.1.6. Aerojel	33
3.1.7. Karışım suyu.....	33
3.1.8. Kimyasal katkı.....	33
3.2. Kullanılan Karışım Oranları ve Karışımların Hazırlanması.....	33
3.2.1. Kullanılan karışım oranları	33
3.2.2. Karışımların hazırlanması.....	35
3.3. Deneysel çalışmalar.....	36
3.3.1. Fiziksel deneyler	36
3.3.2. Basınç dayanımı deneyi.....	40

3.3.3. Termal iletkenlik analizi	41
3.3.4. Dijital mikroskop ile görüntüleme analizi	41
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	43
4.1. Fiziksel Deney Sonuçları.....	43
4.2. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları.....	49
4.3. Termal İletkenlik Analiz Sonuçları	63
4.4. Porozite Analiz Sonuçları.....	77
4.4.1. Porozite ve su emme ilişkisi	80
4.4.2. Porozite ve basınç dayanımı ilişkisi	83
4.4.3. Porozite ve termal iletkenlik ilişkisi	85
4.5. Dijital Mikroskop ile Görüntüleme Analiz Sonuçları	88
5. SONUÇLAR	98
6. KAYNAKLAR	102
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Bina Isı Yalıtım Uygulamalarında Kullanılacak Alternatif Isı Yalıtım Malzemesi Önerisi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

16/06/2025

Neslihan AKIN

İmzası

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

°C : Santigrat derece

Ca(OH)₂: Kalsiyum Hidroksit

CaCl₂ : Kalsiyum Klorür

cm : Santimetre

cm³ : Santimetreküp

CO₂ : Karbon dioksit

g : Gram

g/cm³ : Gram bölü santimetreküp

HFC : Hidroflorokarbon

Hz : Hertz

J : Joule

Kg : Kilogram

kg/m³ : Kilogram bölü metreküp

kWh : Kilowatt-saat

ml : Mililitre

mm : Milimetre

MPa : Megapascal

Na₂SO₃: Sodyum Sülfid

NaOH : Sodyum Hidroksit

pH : Asitlik/bazlık ölçüsü

s : Saniye

W/m²K: Watt bölü metrekare-Kelvin

W/mK : Watt bölü metre-Kelvin

λ : Isıl iletkenlik katsayısı

μm : Mikrometre

Kısaltmalar

AÜ : Akdeniz Üniversitesi

BET : Yüzey Alanı ve Gözeneklilik Ölçümü

CEM : Çimento

CEN : Avrupa Standardizasyon Komitesi

CL : Kireç

EN : Avrupa Normu

EP : Genleştirilmiş Polistiren Köpük

ISO : Uluslararası Standardizasyon Örgütü

MÖ : Milattan Önce

MTA : Maden Tetkik Arama

NHL : Hidrolik Kireç

RILEM: The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (Uluslararası İnşaat Malzemeleri, Sistemleri ve Yapıları Laboratuvarları ve Uzmanları Birliği)

SDKY : Suya Doygun Kuru Yüzey

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

SLES : Sodyum Laurik Eter Sülfat

TC : Türkiye Cumhuriyeti

TGA : Termogravimetrik Analiz

TS : Türk Standartları

TSKB : Türkiye Sınai Kalkınma Bankası

TÜİK : Türkiye İstatistik Kurumu

UYPB : Ultra Yüksek Performanslı Beton

VIP : Vakum Yalıtım Panelleri

XPS : Ekstrüde Polistiren Köpük

XRD : X-Işını Difraktometresi



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. a) Keçi kılı tesisten alınmış hali; b) Keçi kılı kesilmiş hali.	29
Şekil 3.2. Keçi kılına ait SEM görüntüsü ve histogramı	30
Şekil 3.3. a) Kenevir tesisten alınmış hali; b) Kenevir kesilmiş hali.	31
Şekil 3.4. Kenevir lifine ait SEM görüntüsü ve histogramı	31
Şekil 3.5. a) Keten tesisten alınmış hali; b) Keten kesilmiş hali.	32
Şekil 3.6. Keten lifine ait SEM görüntüsü ve histogramı	33
Şekil 3.7. a) Kalıba dökülen harç; b) Kalıptan çıkarılan numuneler.	36
Şekil 3.8. Sıvı piknometresi.	37
Şekil 3.9. Tartım düzeneği.	38
Şekil 3.10. Toz haline getirilmiş numune.	39
Şekil 3.11. a) Piknometre hücresinin darası; b) Numune ile doldurulmuş hücre ; c) Cihaz içine yerleştirilmiş hücre.	40
Şekil 3.12. a) Cihaza yerleştirilmiş numune; b) Cihazda kırılmış numune.	41
Şekil 4.1. Numunelere ait kuru birim hacim ağırlık değerleri.	45
Şekil 4.2. Numunelere ait görünür birim ağırlık değerleri.	46
Şekil 4.3. Numunelere ait görünür boşluk oranı.	47
Şekil 4.4. Numunelere ait kütlece su emme oranı.	48
Şekil 4.5. Ç numunesine ait literatürdeki su/bağlayıcı oranı ve basınç dayanımı ilişkisi.	51
Şekil 4.6. KÇ numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisi.	52
Şekil 4.7. ÇA numunesine ait literatürdeki aerjel oranı ve basınç dayanımı ilişkisi. ...	53
Şekil 4.8. KAÇ numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisi.	54
Şekil 4.9. KEN numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisi.	55
Şekil 4.10. KKEN numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisi.	56

Şekil 4.11. KKET numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisi.	58
Şekil 4.12. Agregasız ve arojel ilavesiz grup numunelerine ait birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisi.	59
Şekil 4.13. Agregasız ve arojel ilaveli grup numunelerine ait birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisi.	60
Şekil 4.14. Agregalı ve arojel ilavesiz grup numunelerine ait birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisi.	61
Şekil 4.15. Agregalı ve arojel ilaveli grup numunelerine ait birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisi.	62
Şekil 4.16. Ç numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.	64
Şekil 4.17. KÇ numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.	65
Şekil 4.18. ÇA numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.	66
Şekil 4.19. KAÇ numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.	67
Şekil 4.20. KEN numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.	69
Şekil 4.21. KKEN numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.	70
Şekil 4.22. KET numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.	71
Şekil 4.23. KKET numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.	72
Şekil 4.24. Agregasız ve arojel ilavesiz grup numunelerine ait birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.	73
Şekil 4.25. Agregasız ve arojel ilaveli grup numunelerine ait birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.	74
Şekil 4.26. Agregalı ve arojel ilavesiz grup numunelerine ait birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.	75
Şekil 4.27. Agregalı ve arojel ilaveli grup numunelerine ait birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.	76
Şekil 4.28. Numunelere ait gerçek yoğunluk değerleri.	77

Şekil 4.29. Numunelere ait toplam porozite yüzdeleri.	79
Şekil 4.30. Agregasız numunelere ait toplam porozite ve su emme oranı ilişkisi.	81
Şekil 4.31. Agregalı numunelere ait toplam porozite ve su emme oranı ilişkisi.	82
Şekil 4.32. Agregasız numunelere ait toplam porozite ve basınç dayanımı ilişkisi.	83
Şekil 4.33. Agregalı numunelere ait toplam porozite ve basınç dayanımı ilişkisi.	84
Şekil 4.34. Agregasız numunelere ait toplam porozite ve termal iletkenlik ilişkisi.	86
Şekil 4.35. Agregalı numunelere ait toplam porozite ve termal iletkenlik ilişkisi.	87
Şekil 4.36. Ç numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.	88
Şekil 4.37. K numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.	89
Şekil 4.38. KEN numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.	90
Şekil 4.39. KET numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.	90
Şekil 4.40. ÇA numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.	91
Şekil 4.41. ÇAK numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.	91
Şekil 4.42. ÇAKEN numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.	92
Şekil 4.43. ÇAKET numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.	92
Şekil 4.44. KÇ numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.	93
Şekil 4.45. KK numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.	93
Şekil 4.46. KKEN numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.	94
Şekil 4.47. KKET numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.	94
Şekil 4.48. KAÇ numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.	95
Şekil 4.49. KAK numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.	95
Şekil 4.50. KAKEN numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.	96
Şekil 4.51. KAKET numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.	96

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Kumun elek analizi	29
Çizelge 3.2. Çimentolu numunelere ait hacimce karışım miktarları	34
Çizelge 3.3. Çimentolu numunelere ait karışım miktarları (g)	35
Çizelge 4.1. Numunelere ait fiziksel deney sonuçları.....	43
Çizelge 4.2. Numunelere ait basınç dayanımı deney sonuçları.	49
Çizelge 4.3. Numunelere ait termal iletkenlik katsayısı deney sonuçları.	63
Çizelge 5.1. Numunelere ait özelliklerin yüzdece değişim oranları.	98



1. GİRİŞ

Küresel anlamda enerji kaynaklarının hızla tükenmesi, artan nüfus ve kentleşme, yoğun atık üretimi gibi sebepler çevre sorunlarını giderek arttırmakta, bu sorunlar dünya gündeminde önemli yer tutmaktadır. Uluslararası platformlarda enerji ihtiyacını kontrol edebilmek ve çevre sorunlarını azaltabilmek yönünde kararlar alınmaktadır. Bununla birlikte ülkeler ulusal çıkarları doğrultusunda da adımlar atmakta ve çevre bilinci oluşturmaya çalışmaktadır. Bu ülkelerden biri de Türkiye'dir.

Türkiye'deki nihai enerji tüketim sektöründeki enerji verimliliğini Avrupa Birliği standartlarına çekmeyi hedefleyen Enerji Verimliliği Stratejisi, 2004 yılında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından onaylanarak yürürlüğe sokulmuştur. Avrupa Komisyonu Enerji ve Ulaşım Genel Müdürlüğü'nün verilerine göre, toplam enerji kullanımının dağılımında %28'ini endüstri, %32'sini ulaşım ve %40'ını binalar oluşturmaktadır. Binalar kullanılan enerjinin %85'inin ısıtma kaynaklı olduğu belirtilmektedir (Arslan ve Aktaş, 2018).

Türkiye'de ısı yalıtımı ile ilgili ilk düzenleme 1989 yılında kabul edilen ve 2000 yılında uygulanması zorunlu hale getirilen 'TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları'dır. 'Binalarda Isı Yalıtım Yönetmeliği' 2000 yılında, 'Binalarda Enerji Performans Yönetmeliği' 2008 yılında yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmelik ile binalara enerji kimlik belgesi alınması zorunlu hale getirilmiştir (Özer ve Özgünler, 2019).

'Enerji Verimliliği Strateji Belgesi' 2012 yılında yayımlanarak, 2023 yılı enerji verimliliği hedefleri ortaya konmuştur. 2012 yılında yayımlanan bu strateji, dünya üzerindeki uygulamalar da dikkate alınarak 2017 yılında geliştirilmiş 'Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı' yayımlanmıştır (TSKB 2021).

Türkiye Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2017-2023' e göre bina ve hizmet sektöründeki nihai enerji tüketimi yükselmekte ve bina sektörü nihai enerji tüketiminde %32,8'lik paya sahip olmaktadır. Türkiye'de her yıl 100.000'den fazla yapı stoku artışı meydana gelmektedir (T.C. Resmî Gazete 2017). Bu noktada binalardaki uygulamalar enerji verimliliğine büyük katkı sağlayacak ve belirtilen hedeflere yaklaşılabilecektir. Binalarda uygulanan ısı yalıtımı enerji verimliliğinde yüksek oranda tasarruf potansiyelini içermektedir. Buradan hareketle binalardaki ısı yalıtımının araştırılması yapılmaktadır.

Binalarda enerjinin verimli kullanılması yönünde ön plana çıkan ısı yalıtımında malzeme seçimi çevre etkileri bakımından çok önemlidir. Gelişen teknolojiler ile birlikte enerji kaybını azaltan ısı yalıtım malzemeleri ortaya konmuştur. Fakat bu malzemelerin tüm yaşam döngüsü süreçlerine bakıldığında çevre etkileri anlamında olumsuz yönleri bulunmaktadır. Örneğin yaygın olarak kullanılan ısı yalıtım malzemelerinden taş yünü; dolomit, bazalt ve diyabaz gibi taşların 1400-1600 °C'de elyaf haline getirilmesi ile üretilmektedir. Taş yünü gibi cam yünü de doğal silis kumu ve genellikle geri dönüştürülmüş cam karıştırılarak 1300-1450 °C gibi yüksek sıcaklıklarda üretilen ısı yalıtım malzemesidir (Kırbyık 2012). Taş yünü ve cam yünü ekolojik özellikler bakımından benzerlik göstermekte olup, hammaddeler yüksek sıcaklıkta eritildiğinden enerji kullanımı yüksektir. Üretim aşamasında toz ve partiküller sebebiyle deri, gırtlak ve göğüs hastalıklarına neden olabilmektedir. Hammadde eldesinde kalker ve silis

çıkarmasına bağlı yerel toprak kalitesi üzerinde olumsuz etki potansiyeline sahiptir. Geri dönüştürülmesi konusunda hava kalitesi üzerinde olumsuz etki ortaya çıkarabileceği düşünülmektedir (Arslan ve Aktaş 2018). Kullanımda olan diğer ısı yalıtım malzemelerinden polistren köpük (EPS) ve ekstrüde polistren köpük (XPS) içeriği petrol türevli ürünlerdir. EPS üretiminde ekolojik bağlamda; hammadde olarak petrokimyasal, yağ ve gaz kullanımından kaynaklı yüksek enerji kullanımı söz konusudur. Ayrıca ağır metaller gibi atıklar üretim sırasında oluşabilmektedir. Yangın anında karbon monoksit ve karbon dioksit dumanı ve buharı meydana getirerek toksik etki yaratabilmektedirler. Benzer şekilde XPS de aynı etkilere sahiptir (Arslan ve Aktaş 2018). Bu noktadan hareketle ısı yalıtım malzemeleri kaynaklı olumsuz çevre etkilerinin azaltılması, doğal kaynakların minimize edilmesi, atıkların en aza indirilmesi ve insan sağlığına risk oluşturmaması için alternatif ısı yalıtım malzemeleri arayışları bulunmaktadır. Alternatif ısı yalıtım malzemelerine olan yaklaşımlar çeşitlidir. Bunlardan biri geçmişte zor çevre şartlarında kullanılmış doğal içerikli yöresel malzemelerin tekrar yapı uygulamalarına kazandırılması yönündedir.

Yöresel mimari özünde iklim ve çevre koşullarına dayanan ilkelere göre tasarlanmış mimaridir (Mutlu Danacı 2012). Yöresel mimaride kendine özgü bir tasarım yöntemi olmamakla birlikte, strüktür, yöreye ait özellikler ve yapı malzemesi binanın formunu belirlemektedir. İçinde bulunduğu iklim şartlarına gerek bina formu gerekse yapı malzemesi konusunda uyumludur. Yapı malzemesi açısından en önemli nokta ise, yöresel mimaride teknik ve strüktür değişse bile doğal ve doğaldan üretilen yapı malzemeleri kullanılmaktadır (Sezgin, 2006). Yöresel mimaride kullanılan yöresel malzemelerin iklim şartlarına uyumlu olması ve doğal içerikli olması sebebiyle çevre etkileri de olumlu yönde olmaktadır. Bu bağlamda yöresel malzemelerin günümüz koşullarına uyarlanarak ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılması sürdürülebilirlik ve çevre etkileri bakımından faydalı bulunmaktadır. Bu noktadan da hareketle Türk kültüründe yaygın kullanım alanı bulmuş keçi kılının çağdaş ısı yalıtım malzemesi olarak kullanıma kazandırılmasının araştırılması, aynı zamanda yine yöresel mimaride kullanılan, bitkisel bazlı kenevir ve ketenin de farklı karışımlara eklenerek ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirliği üzerinde durulmaktadır.

Bu çalışmada, çevresel etkileri azaltmak ve sürdürülebilir yapı malzemesi geliştirmek amacıyla keçi kılı, kenevir ve keten gibi doğal lif katkıları içeren çimento ve aerjel kompozitlerin termal ve mekanik performanslarının deneysel olarak değerlendirilmesi hedeflenmiştir.

Çimento yapı sektöründe yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Çimento gelişiminde 1 kg çimento meydana getirilmesi esnasında yaklaşık olarak 1,0 kg CO₂ salımı meydana gelmekte ve aynı zamanda da kg başına 1,5 kWh enerji tüketilmektedir (Bostanci 2018). Bu bağlamda çimentonun çevre etkilerini azaltmak olumlu karşılanmaktadır. Çimento hamurları yerine bağlayıcı madde içeriğinde çimento oranının azaltıldığı doğa-dostu harç üretimi üzerinde durulacaktır.

Çalışma kapsamında seçilen aerjel, nanoteknoloji ürünü olmakla birlikte üstün yalıtım özellikleri sergilemektedir. Harçlara eklendiğinde termal performansı arttırması beklenmektedir. Bunun yanında doğal kaynaklı ürünler ile birlikte kullanımı düşünüldüğünde keçi kılı, keten ve kenevirin mevcut performansındaki olumsuzluklara katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ayrıca piyasada bulunan aerjel katkılı ısı yalıtım

malzemeleri diğer malzemelere kıyasla oldukça pahalıdır. Üstün termal performans göstermesine rağmen maliyet sebebiyle kullanımı sınırlı kalmaktadır. Aerojel, yanında daha uygun ve doğadan elde edilen, erişilebilir malzemelerin kullanılması maliyeti düşürerek, kullanımının yaygınlaştırılmak istenmesi sebebiyle de seçilmiştir.

Çalışmanın ilk aşaması olan literatür taramasından elde edilen veriler ışığında, Türk kültüründe yaygın olarak kullanılmış keçi kılının çağdaş teknoloji ve yapım teknikleri üzerine gidilmesi yönündeki çalışmaların sayısının az olduğu tespit edilmiştir. Türk kültüründe yaygın şekilde kullanılmış ve erişilebilir olması, mevcutta kullanılan aerojel katkılı malzemelerin cam elyafı gibi benzer nitelikte malzemeler ile kullanılıyor olması, hayvansal atıkların da değerlendirilecek olması nedeniyle keçi kılı çalışma kapsamında seçilmiştir. Bunun yanında keçi kılından üretilen kara çadırların iyi ısı yalıtım performansı göstermesi sebebiyle konar göçer kültürde kullanıldığı bilinmektedir.

Yöresel mimarinin malzemelerinden hayvansal kaynaklı keçi kılı seçilirken, bitkisel kaynaklı olarak kenevir ve keten seçilmiştir. Topografik ve ekolojik yönden kolay yetiştirilebilen ve kolay adaptasyona sahip bir bitki olan kenevir çeşitli sektörlerde kullanım alanına sahiptir. Endüstriyel kenevir, yapısındaki lif kaynağı sayesinde ekim alanları giderek artmaktadır (Göre ve Kurt 2021). Yenilenebilir bir kaynak oluşu, geri dönüşümünün kolay olması, literatürde yapılan araştırmalara göre kompozit üretimi yapılabildiği için bu çalışma kapsamında keten ve kenevir seçilmiştir.

Çalışma kapsamında üretilen numunelerde karışım oranları belirlenirken laboratuvar ortamında denemeler yapılmıştır. Özellikle kenevir ve keten liflerinin matris içindeki oranı belirlenirken, karışımın akışkanlığı ve işlenebilirliği bağlamında çimentonun hacimce %30'u ilave edilecek şekilde kısıtlanmıştır. Aerojel pahalı ve erişimi zor olduğundan karışımlarda agregadan hacimce %2 gibi düşük ikameli olacak şekilde sınırlandırılmıştır.

Mevcut kullanımdaki yapı malzemesi çimento, ileri teknoloji ürünü aerojel ve yöresel kullanıma sahip hayvansal kökenli keçi kılı, bitkisel kökenli kenevir ve keten kullanılarak ortaya çıkan çimentolu kompozitlerin, doğa dostu olduğu bilinen, eskinin çağdaş teknolojiler ile yeniden kullanımının değerlendirilmesi bağlamında araştırma özgündür.

Bu çalışmanın birinci bölümünde, inşaat sektöründe enerji tüketimi üzerinde durularak olumsuz çevresel etkilerin azaltılması bağlamında ortaya konan alternatif ısı yalıtım malzemelerine değinilmiş ve çalışmanın amacı, kapsamı, yöntemi ve sınırlılıkları gibi ana parametrelerden söz edilmiştir.

İkinci bölümde, kaynak taraması yapılmış, ısı ve ısı yalıtım hakkında terimlerden bahsedilmiştir. Yaygın olarak kullanılan ve alternatif ısı yalıtım malzemeleri hakkında bilgi verildikten sonra, literatürde yer alan alternatif ısı yalıtım malzemeleri üzerine yapılmış deneysel çalışmalar incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılan malzemeler ve özellikleri anlatılmış, karışım oranları ve karışımların hazırlanması konusunda bilgi verilerek, hazırlanan numunelere uygulanan deney yöntemlerine ayrıntılı olarak değinilmiştir.

Dördüncü bölümde, numunelere uygulanan deney sonuçları paylaşılmış ve yorumlama yapılarak tartışılmıştır.

Çalışmanın son bölümünde yapılan deneylerden elde edilen verilere göre değerlendirmede bulunularak, ileride yapılacak olan çalışmalar için öneriler sunulmuştur.



2. KAYNAK TARAMASI

Isı, bir sistem ile sistemin çevresi arasında sıcaklık farkı sebebiyle akan bir enerji şekli, sıcaklık ise bir noktadan ölçülebilen değerdir. Başka bir tarif ile kışın konfor şartları yerine getirilmeye çalışılan daha sıcak iç ortamlardan, dış ortamlara; yazın ise daha sıcak dış ortamlardan konfor şartları yerine getirilmeye çalışılan iç ortamlara ısı geçişinin olmasıdır. Yapı bileşenleri üzerinden farklı sıcaklıktaki iki ortam arasındaki ısı geçişini en aza indirmek için yapılan uygulamaya ısı yalıtımı denmektedir (Bayer 2006). Isı yalıtımında, kullanılan malzemeler ısı yalıtım malzemesi olarak isimlendirilmektedir. Isı yalıtımı konusunda ısı iletkenliği, ısı geçirgenlik direnci, ısı iletim katsayısı gibi temel kavramlar bulunmaktadır.

Kalınlığı 1m olan homojen bir malzemenin birbirine paralel iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı 1°C olduğunda ve bu sıcaklık sabit kaldığında birim zamanda geçen ısı enerjisi miktarına ısı iletkenlik katsayısı (λ , W/mK) denmektedir (Aydın 2010). Isı yalıtım malzemelerinin en temel özelliği ısı iletim katsayısıdır. Isıl geçirgenlik direnci, ısıнын ne kadar iletildiğinin toplam değeridir ve malzemenin kalınlığına bağlıdır (Çöl 2020). Sabit rejim koşullarında ‘d’ kalınlığındaki bir yapı elemanının iki tarafındaki sıcaklık arasındaki fark 1°C olduğunda birim alanından birim zamanda geçen ısı enerjisi miktarı ısı geçirgenlik katsayısı olarak tanımlanır ve ‘u’ ile gösterilir, birimi W/m²K'dir (Aydın 2010).

Uluslararası Standartlar Örgütü (ISO) ve Avrupa Standardizasyon Komitesi (CEN) ‘ne göre ısı iletim katsayısı 0,065 W/mK değerinden küçük olan malzemeler ısı yalıtım malzemesi olarak tanımlanır. Diğer malzemeler yapı malzemesi olarak kabul edilmektedir (TS 825). Isı yalıtım malzemelerinde istenen özellikler: düşük ısı iletkenlik, düşük birim hacim kütle, yangın dayanımı, buhar difüzyon direnci, su emme, yeterli basınç dayanımı, kimyasal etkilere karşı dayanıklılık, çürümemezlilik, parazit barındırmama, ekonomik ve işlenebilir olma şeklinde sayılabilmektedir (Özer ve Özgünler 2019).

Isı yalıtımı sadece enerji verimliliği yönünden avantaj sağlamakla kalmayıp konfor şartları iyileştirilmiş yaşanılabilir mekanlar sunmaktadır. Isıl konfor şartları düzenlenen mekanlarda rutubet etkileri de düşünüldüğünde insan sağlığına uygun şartlar oluşturulabilmektedir. Daha sağlıklı binalar üretilerek dış etkenlere karşı daha korunaklı ve uzun ömürlü binalar üretilebilmektedir. Dış cephede, teraslarda, çatıda, bodrum ve girişlerde, mahalleri ayıran duvarlarda, toprak temaslı zeminlerde, döşemelerde ve tavanlarda ısı yalıtım uygulamaları yapılmaktadır (Kocagül 2013).

Geçmişten günümüze ısı yalıtım malzemelerine baktığımızda M.Ö 7000 ve öncesinde göçebe yaşam koşullarıyla birlikte insanlar kıyafet için kullandıkları malzemeler olan hayvan derileri, kürk, yün gibi doğal kaynaklı malzemeleri ısı yalıtım malzemesi olarak değerlendirmişlerdir. Milattan sonra 1870'lere kadar yerleşik yaşam ile birlikte daha dayanıklı malzemeler toprak, ahşap, tuğla kullanarak evlerini inşa etmiş bunun yanında saman, deniz yosunu, saz gibi bitkisel lifleri kullanmışlardır. 19.yüzyıl sonlarında sanayi devriminin de etkileriyle aşırı enerji tüketimi görülmüş, bu dönemde enerji tasarrufu bilinci ve ısı kaybı hesaplamaları yapılmaya başlanmıştır. Bu hesaplamalarla birlikte ısı yalıtım malzemelerinin endüstriyel anlamda üretimi

başlamaktadır. 1950 ve 2000 yılları arasında plastiklerin kullanımı yaygınlaşmış, 2000 yılından sonra ise plastik malzeme üretimi kaynaklı çevresel etkilerin ortaya çıkarılması sonucunda doğal malzemelere dönme eğilimi gösterilmiştir. Gelişen teknolojilerle birlikte aerojeller ve vakum yalıtım panelleri gibi ürünleri ortaya çıkarılmıştır (Bozasky 2010).

2.1. Isı Yalıtım Malzemeleri

İnşaat sektöründe bakıldığında; cam yünü, taş yünü, genleştirilmiş EPS, XPS, yaygın olarak kullanılan ısı yalıtım malzemeleri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Cam yünü, doğal silis kumu ve genellikle geri dönüştürülmüş cam karıştırılarak 1300-1450 °C'de üretilen bir ısı yalıtım malzemesidir. Liflere dönüştürülüp, toz önleyici yağ ve fenolik reçinelerin ilavesi ile lifler bağlanmaktadır (Arslan ve Aktaş 2018). Kullanım yeri ve isteğe göre farklı boyutlarda ve yoğunlukta, levha, boru, şilte ve dökme şeklinde üretimi sağlanmaktadır (Kırbiyık 2012). Dış kuvvet altında boyutsal değişim gösterebilmektedir. Hammaddeler yüksek sıcaklıkta eritildiğinden yüksek enerji tüketimi söz konusudur. Üretim aşamasında toz ve partiküller sebebiyle deri, gırtlak ve göğüs hastalıklarına neden olabilmektedir. Hammadde eldesinde kalker ve silis çıkarımına bağlı yerel toprak kalitesi üzerinde olumsuz etki potansiyeline sahiptir. Geri dönüştürülmesinde hava kalitesi üzerinde olumsuz etki ortaya çıkarabileceği düşünülmekte olup, geri dönüştürüldüğünde zemin dolgusu olarak kullanılabilir (Arslan ve Aktaş 2018).

Taş yünü dolomit, bazalt ve diyabaz gibi taşların 1400-1600 °C'de elyaf haline getirilmesi ile üretilmektedir. Nişasta, sıvı yağ ve reçineler gibi bağlayıcılar kullanılarak birbirine bağlanıp lif elde edilmektedir. Kullanım yeri ve isteğine bağlı olarak, farklı boyut ve kalınlıklarda panel, rulo, şilte, keçe, boru ve dökme şeklinde üretilebilmektedir. Sıcağa ve neme karşı dayanıklıdır ve genel olarak yanmaz özelliktedir. Bu özellikleri sebebiyle cephe kaplamalarının arkasında, havalandırmalı cephelerde yangın güvenliği sağlamak için yaygın olarak tercih edilmektedir (Kırbiyık 2012). Taş yünü ve cam yünü ekolojik özellikler bakımından benzerlik göstermekte olup, taş yünü malzemeler üreticiler tarafından geri dönüştürülebilir ya da katı atık sahalarında yok edilebilirler.

EPS petrolden elde edilen, köpük halindeki, termoplastik, kapalı gözenekli bir ısı yalıtım malzemesidir. Polistren taneciklerinin şişirilmesi ve birbirine kaynaşması ile üretimi yapılır ve pentan gazı kullanılmaktadır. Blok halinde ve kesilebilir levha şeklinde kullanım yeri ve amacına göre işlenebilmektedir (Bayer 2006). Kimyasal olarak çözücülere dayanıksız olmakla birlikte güneş ışınlarından etkilenebilir olmasının yanında çürümez özelliklere sahiptir. Ekolojik bağlamda, hammadde olarak petrokimyasal, yağ ve gaz kullanımından kaynaklı yüksek enerji tüketimi göstermektedir. Ayrıca ağır metaller gibi atıklar üretim sırasında oluşabilmektedir. Yangın anında karbon monoksit ve karbon dioksit dumanı ve buharı meydana getirerek toksik etki yaratabilmektedirler. Geri dönüşümlerinde dikkatli ve uzmanlaşmış kuruluşlar tarafından yapılabilmektedir (Arslan ve Aktaş 2018).

XPS eritilmiş polistrene genleştirici gazlar ve yangın geciktirici eklenerek bir ekstrüzyon makinasından geçirilmesiyle üretilen ısı yalıtım malzemeleridir. Kullanım yeri ve isteğe göre boyutlandırılıp kesilebilir, uygulaması kolaydır. Kapalı gözenekli yapıda olduğundan düşük su emmektedir. Bu bağlamda daha çok eğimli çatılarda,

sandviç duvarların yalıtımında tercih edilmektedir. Yüksek basınç dayanımı beklenen zemin altı yalıtımlarda ve döşemelerde kullanılabilmektedir (Özer ve Özgünler 2019). Ekolojik açıdan EPS ile benzer özelliklere sahip olmakla beraber pentan yerine genellikle hidro florokarbon (HFC) ve karbon dioksit (CO₂) gazı kullanımı kaynaklı çevre etkileri açısından tehlikeli olabilmektedir (Arslan ve Aktaş 2018).

Nanoteknoloji ile üretilmiş ısı yalıtım malzemelerine bakıldığında ise vakum yalıtım panelleri (VIP) ve aerogeller ön sırada yer almaktadır.

VIP, yüksek performanslı ısı yalıtım çözümlerinden biri olarak kabul görmektedir. Isı iletiminin düşük olduğu vakum ortamından yararlanılarak üretilmektedir. Yalıtım ürünü içindeki hava vakumlanarak uzaklaştırılır. Bu sayede çok daha ince ve ısı iletkenliği düşük paneller elde edilmektedir (Baetens vd. 2010). Kullanım ömürlerinin uzun olmasının yanında delinmeleri durumunda ısı iletim katsayılarında kayıp yaşanabilirken, işlenmesi de zor olmaktadır. Çok büyük oranda su geçirmez özelliğinden kaynaklı yoğunlaşma problemleriyle karşılaşılabilir (Arslan ve Aktaş 2018).

Aerogeller 1930'larda keşfedilen ve ana kullanım alanı uzay uygulamaları olan 1980'lerden beri ise yüksek yalıtım özellikleri ve şeffaflığı nedeniyle bina uygulamalarında kullanımına ilgi gösterilen bir malzemedir (Buratti vd. 2021). Literatürde aerogeller en hafif katkı maddesi olarak tanımlanmaktadır. Bir polimerin bir çözücü ile bir jel oluşturmak üzere birleştirilmesi ve daha sonra jelin içindeki sıvının uzaklaştırılması ve havayla değiştirilmesi yöntemiyle üretilmektedirler. Bu malzemeler nano boyutta boşluklar içermekte ve %90-98 aralığında gözenekli yapıya sahiptirler. Bu sebeple birim hacim kütlesi düşüktür. Silika, organik polimerler, metal oksitler, karbon ve metaller gibi değişik maddelerden üretimi söz konusudur (Yılmaz 2013). Yaklaşık olarak 1200 ° C sıcaklığa kadar dayanıklı olmakla beraber güneş ışınlarının uzun süre etkisiyle renk bozulması meydana gelmemektedir. Ayrıca nem ve küf oluşumunda karşı dayanıklı olup uzun kullanım ömrüne sahiptirler. (Özer ve Özgünler 2019). Aerogellerin ısı yalıtımı performansı ve optik şeffaflığı, pencere camlarında ve güneş kolektörü kapaklarında kullanımına izin verir. Düşük ısı iletkenlikleri ve gürültü azaltma için akustik özellikleri nedeniyle, aerogeller binalarda ve ayrıca iç mekan hava kalitesi için, çevre temizliğinde fotokataliz için, yanmazlık özelliğiyle de yangın geciktirici levhalarda kullanılabilmektedir. (Riffat ve Qiu 2013)

Dünya üzerinde her geçen gün artmakta olan çevre sorunları düşünüldüğünde doğa dostu alternatif malzemelerin ortaya çıkarılması yönünde araştırmalar önem kazanmaktadır. Bu bağlamda önceden de kullanılmış, doğal içerikli ve çevre dostu yalıtım malzemelerinin tekrar kullanılması yönünde çalışmalar bulunmaktadır. Bunlar kenevir, saman, keten, koyun yünü ve keçi kılı gibi malzemelerdir.

Tarih boyunca yetiştirilmekte olan kenevir, tek yıllık, otsu ve birçok alanda kullanılmakta olan endüstriyel bir bitkidir. Gıda, kağıt, ilaç, kozmetik, tekstil, biyoyakıt, otomotiv ve inşaat sektörü gibi yaygın bir kullanım ağına sahiptir. Topografik ve ekolojik yönden kolay yetiştirilebilen ve kolay adaptasyona sahip bir bitkidir. Endüstriyel kenevir, yapısındaki lif kaynağı sayesinde ekim alanları giderek artmaktadır (Göre ve Kurt 2021). Türkiye’ de 2015-2019 yılları arasında kenevir lifi üretim verilerine bakıldığında her yıl ekim alanının arttığı 2019 yılında üretim miktarının 19 tona ulaştığı görülmektedir. 2020

yılı verilerinde ise üretim miktarının 9 tona düştüğü raporlarda belirtilmektedir (TÜİK 2022). Bu durumda pandemi koşullarının etkili olduğu düşünülmektedir.

Kenevir bitkisi liflerinden ve hasat sonrası kalan kısımlardan yalıtım malzemeleri üretilmektedir. Bu bağlamda yenilenebilir bir kaynak oluşturmaktadır. Kenevir lifi, yüksek oranlarda kullanıldığında düşük yoğunluklu kompozit üretimi yapılabilirdiği, yüksek sağlamlık ve sertlik performansı sergilediği gösterilmektedir. Yapısının esnek olmasından kaynaklı uygulama sırasında kırılmaya karşı da olumlu performans sergilemektedir (Spoljaric 2009).

Kenevir yalıtım malzemesinin nem tutma eğilimi fazla olduğundan nem içeriği arttıkça malzemenin ısı iletim katsayısı artmaktadır. Nemden, kemirgenlerden, böceklerden ve suya karşı korunmalıdır. Düşük basınç dayanımı nedeniyle yük altında kalmayacağı çatı duvar ve normal kat döşemesi alt yüzeylerinde, ahşap çerçeve sistem arasında kullanılabilir (Özer 2017). Kenevir gibi selüloz içerikli malzemelerin yangın riskleri, yangın geciktirici kimyasallar ile işlendiğinde çözüme kavuşabilmektedir (Oldham vd. 2011) Bitkisel kaynaklı olduğundan geri dönüşümü de kolaydır (Arslan ve Aktaş 2018).

Çağdaş yalıtım malzemesi olarak kenevirin kullanımına bakıldığında kenevir lifleri ile üretilmiş yalıtım levhaları bulunmaktadır. Ayrıca keten ve kenevir liflerinin birlikte kullanıldığı keten yünü yalıtım levhaları kullanılmaktadır. Ekolojik özellikleri bağlamında kenevir kullanılarak geliştirilen bir malzeme de kenevir betondur. Kenevir liflerinin kireç ile bağlanarak hafif betona benzeyen bir malzeme şeklinde üretilmesiyle ortaya çıkarılmıştır. Kenevir beton blokları oldukça hafif ve negatif karbon olarak nitelendirilmektedir. Dünyanın birçok ülkesinde kullanılmakta ve üretilmektedir (Yardımlı 2021).

Keten lifleri, M.Ö. 5000'den beri Mısırlılardan günümüze kadar kullanılan bir bitkiden üretilmektedir. Keten bitkisi yaklaşık %70 selüloz içerir. Keten lifleri havayı muhafaza ederek iyi yalıtım özellikleri gösterir. Liflerin elastikiyeti ayrıca darbe ses yalıtımları olarak kullanılmasını sağlar. Keten lifleri genellikle mekanik direnci arttırmak için polyester ile, ateş ve güve direncini artırmak için bor tuzları gibi katkı maddeleri ile karıştırılır. Keten ve kenevir, yüksek performanslı ısı yalıtım malzemesi üretmek için birlikte karıştırılabilir. Keten yetiştirilmesi kolaydır ve gübreleme yada arındırma işlemine gerek duymadan herhangi bir toprakta yetiştirilip işlenebilir. Ketende polyester elyaf kullanılmadığında atık ürünleri tekrar kullanılabilir, geri dönüştürülebilir ve gübre üretimi için de kullanılabilir (Arslan ve Aktaş 2018).

Samanın M.Ö. 8300' e tarihlenen kerpiç tuğlalarının içinde ve antik Mısır türbelerinde pek çok kullanım örneklerine rastlanmıştır. Ülkemizde de saman yıllık olarak yenilenebilen, belli zamanlarda bol ve kolay bulunabilen bir malzemedir. Tahıl üretiminin olduğu bölgelerde buğday, yulaf, pirinç, arpa gibi ürünlerin sapları artık kabul edilerek atılır, çoğunlukla yakılarak yok edilir. Fakat bu atılan malzeme ile enerji performansı yüksek, korunaklı barınaklar inşa edilebilir. Selüloz içeren saman balyası iyi yalıtım özelliklerine sahiptir. Saman olarak nitelenen ve hasattan sonra tahılı alınmış saplar her yıl yeniden büyüyebilir bir üründür ve yenilenebilir bir kaynaktır. Sürdürülebilir bir sistemde saman bir yıldan az bir zamanda yeniden üretilir (İrklı Eryıldız ve Başkaya 2000).

Koyun yünü eski çağlardan beri iyi ısı yalıtım performansı sergilediği için giysilerde kullanılmaktadır. Sahip olduğu doğal yapı sayesinde iyi bir akustik performans göstermektedir. Yün liflerinin kalınlık ve yoğunluğuna bağlı olarak akustik performans değerleri yükselmektedir (Berardi and Lannace 2015). Kullanılmamış ve geri dönüşümlü yünler bina yalıtım malzemelerinin üretimi için kullanılmaktadır. Lifler polyester ile karıştırılabilir veya bir polipropilen ızgaraya sabitlenebilmektedir. Malzeme genellikle rulolar halinde satılır ve elastikiyeti yüzer döşemelerde esnek malzeme olarak kullanılmasını sağlar. Koyun yünü bina uygulamasında kullanılmadan önce yangın geciktirici anti-güve ve parazit öldürücü ile takviye edilmelidir. Atık koyun yünü malzemeleri tekrar kullanılabilir, plastiğin yünden ayrılması durumunda geri dönüştürülebilir, çöp sahasında stoklanabilir veya organik gübre üretimi için tercih edilebilir (Arslan ve Aktaş 2018).

Koyun yünü literatürde nano teknolojik, doğal ve akıllı bir lif olarak tanımlanmaktadır. Koyun yünü ile yalıtılmış bir konutun ısıtma soğutma sistemi olmaksızın hava sıcaklığını kışın 10°C daha sıcak, yazın ise 7° C serin tuttuğu belirtilmektedir (Polat, 2018). İnsan sağlığı ve çevre etkileri için tehlikeli olmayan, yenilenebilir, sürdürülebilir ve geri dönüştürülebilir olan koyun yünü temas durumunda solunum sistemi veya cilde zararlı bir durum oluşturmamaktadır. Ayrıca içeriğinde zararlı gaz salınımı yapabilecek madde olmadığından çevre etkileri bakımından olumlu karşılanmaktadır (Ayçam ve Tuna 2010).

Keçi kılı, yenilenebilir doğal hammadde olduğu için çevre dostudur. Kolaylıkla taşınabilirler ve herhangi bir sağlık tehlikesi olmaksızın binada kullanılabilirler. Binaya kurulum için herhangi bir koruyucu giysi, maske veya gözlük gerektirmez. Fiziksel ve kimyasal yapısındaki keratin adı verilen proteinler sayesinde iyi termal özelliklere sahip olmaktadır. Doğal özellikleri ile düşük termal iletkenliği sergilemektedir (Ahmed vd. 2019).

2.2.Alternatif Isı Yalıtım Malzemelerine Ait Deneysel Çalışmalar

Çalışmada çimentolu karışımlara eklenen yöresel ürünlerden keçi kılı, kenevir ve keten lifleri üzerinde yapılmış deneysel literatür çalışmaları irdelenmektedir. Bunun yanında nanoteknolojik bir malzeme olan aerogelin çimentolu karışımlardaki rolünü inceleyen deneysel çalışmalar incelenerek, yöresel ve çağdaş olanın birlikteliği tez kapsamında araştırılmaktadır.

2.2.1. Keçi kılı kullanılarak yapılan çalışmalar

Keçi kılı, Türk kültüründe de geçmişte kullanım alanına sahip doğal bir malzemedir. Literatür taramasında keçi kılı ile üretilmiş spesifik ısı yalıtım malzemesine rastlanamamıştır. Ancak yöresel çadırlarda kullanılan keçi kılından yapılmış malzemelerin ısı yalıtım performans değerlerinin yüksek olduğu bir çok kaynakta yer almaktadır.

Ahmed vd. (2019), doğal yalıtım malzemelerinin (keçi yünü, koyun yünü ve at yeleşi) bina ısı yalıtımı için etkinliğinin değerlendirmek amacıyla düşük sıcaklığa sahip bölgelerdeki termal davranışlarını araştırmıştır. Bu yalıtım malzemelerinin nem emme yüzdesi, ısı iletkenlik, termogravimetrik analiz (TGA) ve diferansiyel taramalı

kalorimetri gibi analizleri yapılarak, elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Araştırma sonucunda 269,874 kg/m³ yoğunluğa sahip keçi yünü, 0,0314 W/mK gibi düşük ısı iletkenlik katsayısı değerini göstermiş, bu değerler ışığında da keçi yününün sahip olduğu düşük termal iletkenlik bağlamında binalarda kullanılabilecek ısı yalıtımında doğal bir alternatif yalıtım malzemesi olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada keçi yününün güncel kullanılan yalıtım malzemelerine göre çevre açısından sürdürülebilir olduğu, aynı zamanda sera gazı emisyonunu azalttığı belirtilmiştir. (Ahmed vd. 2019).

Jayaseelan vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada maliyeti düşük ve sürdürülebilir doğal kompozit malzeme geliştirmek amacıyla epoksi bazlı, keçi kılı lifi içerikli doğal bir kompozit malzemenin teknik özellikleri incelenmiştir. Uygulama alanları olarak tekneler, jeneratör ses yalıtımı, kask yapımı ve yol kaplamaları seçilmiştir. Kompozit malzemelerde keçi kılı lifi oranı %20 ile %50 arasında değişkenlik göstermiştir. Numunelere çekme, eğilme, darbe ve kesme dayanımı testleri uygulanmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen verilere göre %37,5 keçi kılı lif oranı içerikli numune en iyi mekanik özellikleri sergilemektedir. Çalışmada maksimum 33 MPa çekme dayanımı tespit edilirken 2,6 MPa eğilme dayanımı ölçülmüş olup 0,81 J darbe dayanımı ve 8,15 MPa kesme dayanımı değerleri elde edilmiştir (Jayaseelan vd. 2017).

Gündüz ve Atalayer (2019) yaptıkları deneysel çalışmada, farklı kültürel bölgelerde üretilen geleneksel dokumaları araştırarak incelemelerde bulunmuştur. Keçi kılı, tiftik ve yün liflerinden üretilmiş dokumalar çalışma kapsamında seçilmiştir. Çalışmanın sonucunda geleneksel kıl ve tiftik dokumaların, çağdaş zamana yeniden kazandırılmasının mümkün olduğu belirtilmektedir. Bunun yanında çalışmada kıl lifinin teknik özellikleri ve görsel estetiğinin modern tasarımlara katkısının olduğu ve kültürel miras olarak gelecek kuşaklara aktarılabilir olduğunu savunulmuştur (Gündüz ve Atalayer 2019).

Şimşek (2021) hazırladığı tez çalışmasında tarihi binaların restorasyonlarında kullanılan horasan harcının çeşitli lif katkı maddeleriyle (keçi kılı, kenevir lifi ve elyaf) birleşiminde oluşacak malzemenin fiziki ve mekanik özellikleri incelemektedir. Katkı maddeleri ağırlıkça %0,2; 0,4; 0,6; 0,8 ve 1,0 oranında karışımlarda kullanılmış ve numuneler üretilmiştir. Numuneler 40x40x160 mm ebatlarında kalıplara dökülerek; yayılma, su emme, eğilme dayanımı, basınç dayanımı testlerine tabi tutulmuştur. Yapılan testlerde keçi kılı harçta donatı görevi görmüş, çatlak ve dayanıklılık konusunda olumlu etki göstermiştir. Çalışmanın sonucunda her lif grubunun karışımlarda fiziksel ve mekanik özellikler bakımından olumlu yönde etkiler gösterdiği belirtilerek, tarihi yapılarıdaki restorasyon çalışmalarında harçlarda doğal katkı maddesi olarak kullanılması önerilmiştir (Şimşek 2021).

Kanıt ve Işık (2004) yaptıkları çalışmada horasan harcının tarihi kemer tipi taşıyıcı sistemlerdeki etkisi incelemiştir. Çalışmada 0,01 m³ harç için 86 g keçi kılı kullanılmıştır. Yapılan deneylerde sayısal analizlerin uyumlu olduğu sonucuna varılmış, keçi kılının çekme dayanımı üzerinde artırıcı ve olumlu etkisi olduğu görülmüştür. Yapılan deneyler ışığında tarihi restorasyon çalışmalarında keçi kılının kullanılabilir olduğu ortaya çıkmıştır (Kanıt ve Işık 2004).

Yarbaşı (2020) tarafından yapılan çalışmada keçi kılı lifleriyle güçlendirilmiş killi zeminlerin donma ve çözülme testlerindeki mukavemet değişimleri incelenmiştir. Keçi kılı lifleri %0,5; 1,0; 1,5 ve 2,0 oranlarında kil zemin karışımlarına eklenmiştir. Kür uygulanmış karışımlar -21°C ve 21°C'lik döngülerde testlere tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda keçi kılı lifi katkısının, donma ve çözülme koşullarında kil zeminlerin dayanımını arttırdığı gözlemlenmiştir. Deneysel analizlere göre en uygun katkı oranının %1,5 olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada keçi kılı ilaveli karışımların maliyeti düşük, çevreci bir zemin malzemesi olarak kullanılabilirliği desteklenmektedir (Yarbaşı 2020).

2.2.2. Kenevir kullanılarak yapılan çalışmalar

Demir ve Doğan (2020), kenevir betonunun çevresel etkilerini ve yapım yöntemlerini araştırmak amacıyla kenevir betonu üzerine yapılmış çalışmalardan bir derleme makalesi hazırlamışlardır. Bu derlemede incelenen deneysel çalışmalar tabloyla özetlenmiştir. Oluşturulmuş tabloda incelenen çalışmalar bağlayıcı türü, su/bağlayıcı ve kenevir/bağlayıcı oranları, kürlenme koşulları, kalıp ya da sprej olarak uygulanması gibi başlıklar altında toplanmıştır. Ayrıca çalışmalarda elde edilen fiziksel ve mekanik deney sonuçları tabloda belirtilmiştir. Kenevir betonun yoğunluk, ısı iletkenlik, buhar geçirgenliği, higrometrik davranış, dayanıklılık, akustik emilim, mekanik özellikler ve yaşam döngüsü analizi karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada, deneysel çalışmalardan yola çıkarak kenevir betonunun üstün termal ve higrometrik performans sergilediği, çevre dostu ve ekonomik olması sebebiyle de yapım sektörü için kullanılabilirliğinin avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır (Demir ve Doğan 2020).

Candamano vd. (2021), kenevir lifi ile takviye edilmiş çimento harçlarında lif-matris arayüzündeki etkileşimi iyileştirmeyi hedefleyen bir strateji üzerine araştırma yapmışlardır. Bu strateji, Ca(OH)_2 ön işlemi ile kenevir liflerinin kimyasal olarak modifiye edilmesi ve akrilik elastomerik polimer dağılımın matris modifikasyonu olarak gerçekleştirilmektedir. Uygulanan ön işlem ile kenevir liflerinin termal ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kimyasal ön işlemin hemiselüloz, lignin ve balmumunu etkili bir şekilde uzaklaştırarak temiz bir lif yüzeyi sağladığını ve daha yüksek bir termal stabilite sunduğunu sonucuna varılmıştır. Yapılan bu çalışmada çimento harç karışımlarında, su/çimento oranı 0,52 ve kum/çimento oranı 2,3 olarak sabit tutulmuştur. İşlenmemiş ve işlenmiş kenevir lifleri 12 mm uzunluğunda ve bağlayıcı ağırlığının %0,5, %1 ve %1,5'i olacak şekilde karışımlara eklenmiştir. Elde edilen numunelere fiziksel ve mekanik testler uygulanmıştır. İşlem görmüş kenevir lifi takviyeli harçlar işlem görmemiş kenevir lifli harçlara göre daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir (Candamano vd. 2021).

Yapılan başka bir çalışmada 0,5, 1 ve 2 cm uzunluklarda kesilmiş kenevir lifleri çimento harç karışımlarına dahil edilerek harçların; yayılma çapları, kuru birim ağırlıkları, gözeneklilik, eğilme ve basınç dayanım değerleri ve kılcalık özellikleri değerlendirilmiştir. Yapılan karışımlarda bağlayıcı olarak CEM I 42.5R tipi çimento, agrega olarak 0-4 mm elek açıklığına sahip kireçtaşı kullanılmıştır. Karışımlardaki su/çimento ve agrega/çimento oranları sırasıyla 0,5 ve 3,0 olacak şekilde, kenevir lifleri ise karışıma çimento ağırlığının %1, %2 ve %3'ü olarak 3 farklı oranda ve 3 farklı uzunlukta ilave edilmiştir. Karışımlardaki kenevir liflerinin uzunluğunun ve oranının artmasıyla yayılma çapı ve homojen dağılım azalmıştır. Harçlara, %2'lik keten lifleri eklendiğinde kuru birim ağırlık değeri artarken lif oranı %3'e çıktığında işlenebilirlik zor

olduğundan kuru birim ağırlık değerinin düştüğü sonucuna varılmış ve bu lif oranlarında referans numuneye göre gözeneklilik artmıştır. Bu çalışmada 28 günlük mekanik testlerde, lif oranı arttıkça eğilme dayanımı artmış, basınç dayanımı ise azalmıştır. Çalışma kapsamında yapılan fiziksel ve mekanik testlerden elde edilen verilere göre %1 veya 2 oranında eklenen 1cm uzunluğundaki keten liflerinin optimum performansı sergilediği belirtilmiştir (Kaplan ve Bayraktar 2021).

Çomak vd. (2018) tarafından yapılan bir araştırmada, kenevir liflerinin çimento esaslı harçların özelliklerine olan etkisi incelenirken çimento, akışkanlaştırıcı, su, silis kumu ve kenevir lifleri kullanılmıştır. Kenevir lifleri 6 mm, 12 mm, 18 mm uzunluğunda kesilerek farklı oranlarda karışıma dahil edilmiştir. Karışımın içeriğinde çimento ve su ağırlığı sabit tutularak su/çimento oranı 0,5 olarak belirlenmiş olup silis kumundan %1, %2 ve %3 oranında kenevir lifi ikamesiyle numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere fiziksel ve mekanik testler uygulanmıştır. Uygulanan test sonuçlarına göre numunelerin yoğunluğu 2065 kg/m³ ile 2156 kg/m³ arasında olup farklı lif uzunluğu ve miktarının önemli bir farka yol açmadığı gözlemlenmiştir. Numunelerde yüzde su emme oranı 2 ve 19 arasında olup, üç farklı lif uzunluğuna sahip numune gruplarının hepsinde, 28 günlük basınç dayanım testi sonucu lif oranının %2 olarak kullanıldığı numunelerde en yüksektir. Bu bilgiler ışığında, çalışmanın sonucunda 12 mm uzunluğa sahip kenevir liflerinin %2-3 oranında çimento harçlarına ilave edilmesiyle optimum değerlere ulaşıldığı belirtilmektedir (Çomak vd. 2018).

Kenevir-çimento içerikli yapı malzemelerinin akustik ve termal özellikleri Fernea vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada incelenmiştir. Bu çalışma kapsamında çimento, su, kenevir lifi ve kenevir talaşı kullanılan 4 adet numune üretilmiş ve numunelere akustik ve termal analiz testleri yapılmıştır. Numunelerden iki tanesi tek katmanlı diğer ikisi ise çok katmanlı olarak üretilmiş olup tüm numunelerde kenevir/çimento ve su/çimento oranı sırasıyla 0,5 ve 1'dir. Tek katmanlı iki numunenin biri kenevir lifi diğeri ise kenevir talaşı içeriğine sahiptir. Çok katmanlı numunelerin biri; bir katman kenevir talaşı iki katman kenevir lifi ve diğer numune ise; ara katman kenevir lifi iki katman kenevir talaşı olacak şekilde hazırlanmıştır. Numunelerin nihai birleşimi ise kenevirlerin çimento bazlı çözelti ile karıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Numunelere uygulanan akustik testler sonucunda, 50-6400Hz frekans aralığındaki ses yutma katsayısı değerleri incelendiğinde en yüksek performansı kenevir lifli tek katmanlı numune göstermiştir. Çok katmanlı numuneler 50-400Hz aralığında en yüksek ses yutma katsayısı değerlerini sunarken, tek katmanlı numuneler 800-1200Hz aralığında en yüksek değerlere ulaşmıştır. Çalışma kapsamında uygulanan termal iletkenlik test sonuçlarına göre kenevir lifli tek katmanlı numune 0,061 W/mK değeri ile en iyi performansa sahip olup katmanlarda kenevir talaşı kullanılmasıyla termal iletkenlik performansında düşüş söz konusu olmuştur. Bu bağlamda tek katmanlı ve kenevir lifi ile üretilmiş numune hem akustik hem de termal performans olarak en iyi değerleri sergilemiştir (Fernea vd. 2019).

Çimento harçlarına kenevir lifi eklenerek yapılmış bir diğer çalışmada; kenevir uzunluğu ve ağırlıkça karışımdaki içerik miktarı, agrega boyutu ve karıştırma yöntemi deneysel olarak değişkenleri oluşturmaktadır (Li vd. 2006). Karışımlarda 10- 20- 30 mm uzunluğunda kenevir lifleri, 20-14-7 mm dane boyutunda agregalar tercih edilmiştir. Numunelerin karışım oranlarına bakıldığında kenevir lifleri en yüksek ağırlıkça %1,06 oranında en düşük ise %0,18 oranında kullanılmıştır. Çimento/kum/agregadan oluşan beton karışım tasarımı ağırlıkça 1:1,5:2,5 olup, her iki grupta da su/çimento oranı 0,5'tir.

Bu deneysel çalışmada kuru ve yaş karıştırma prosedürü uygulanmıştır. Hazırlanan numuneler fiziksel ve mekanik deneylere tabi tutulmuştur. Çalışmanın sonuçlarında; kenevir lifinin beton matrisine eklenmesi, karışımların özgül ağırlık ve su emme oranında doğrusal bir azalma meydana gelmiştir. Çalışmada kenevir lifi takviyeli betonların basınç dayanımı, eğilme dayanımı, tokluk ve tokluk indeksleri, özgül ağırlığı ve su emme oranının tümü agrega boyutu, lif faktörleri ve matrisin başlangıç mekanik özellikleri ile bağlantılı olduğu sonucuna değinilmektedir. Ayrıca farklı karıştırma yöntemlerinin oluşturulan kompozitlerin mekanik ve fiziksel performansı etkilediği sonucuna varılmıştır. Çalışmada test verilerine göre basınç dayanımı 15,40 ile 35,22 MPa arasında olup, kenevir takviyeli betonlarda basınç dayanımının geleneksel betona kıyasla daha zayıf olduğu belirtilmektedir (Li vd. 2006).

Poletanovic vd. (2020) kenevir lifi takviyeli alkali ile aktifleştirilen uçucu kül ve uçucu kül/cüruf harçlarının fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde analiz çalışması yapmışlardır. Çalışmada; uçucu kül, uçucu kül ve cüruf karışımı, sodyum silikat çözeltisi, kenevir lifleri ve agrega olarak da dere kumu kullanılmıştır. Hazırlanan harçlar uçucu kül kullanılanlar ve uçucu kül/ cüruf kullanılanlar olarak 2 gruba ayrılmıştır. Kenevirler ise 10 mm uzunluğunda kesilip, iki gruba da hacimce %0,5 ve %1,0 oranlarında olmak üzere eklenmiş ve kenevir lifi takviyeli karışımlara emme oranlarına göre su ilave edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlarda cüruf kullanılmayan numune grubunun, cüruf kullanılan numune grubuna göre daha yüksek gözenekliliğe ve daha düşük yoğunluğa sahip olduğu görülmüştür. Her iki numune grubunda yoğunluk, kenevir lifi miktarından bağımsız olarak %5 oranına kadar azalmıştır. Cüruf içeren numune grubunda su emme oranları kenevir lifi oranıyla birlikte %15 ve %20 oranında artarken, cüruf içermeyen numune grubunda su emme oranı %23'e kadar çıkmaktadır. Cüruf içeren numune grubunun, cüruf içermeyen numune grubuna göre %48 daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Poletanovic vd. 2020).

Juradin vd. (2021) çimento harçlarına, ön işleminden geçirilmiş doğal kenevir ve katırtırnağı lifleri ilave ederek deneysel çalışmalarda bulunmuşlardır. Lifler alkali çözeltilere batırılarak (NaOH, NaOH ve Na₂SO₃, deniz suyu, deniz suyu ve NaOH) ön işleme tabi tutulmuş çimento harçlarına eklenmiştir. Bu çalışmada, CEM I 42.5 R tipi çimento, standart kuvars kumu, 10 mm uzunluğunda kesilmiş kenevir ve katırtırnağı lifleri kullanılmış toplam 27 adet harç karışımı üretilmiştir. Referans karışımlar EN 196-1: 2016 standardına göre 450 g çimento, 225 g su ve 1350 g standart kuvars kumu; diğerleri ise bu karışıma toplam hacmin %0,34, 0,5, 0,68 veya %1'i oranında lif içeriği eklenerek oluşturulmuştur. Oluşturulan karışımlara 56 gün sonra mekanik testler yapılmıştır. Çalışmada lifleri çeşitli alkali çözeltilerde bekletme işlemi, işlemin verimliliği ve liflerin yapısal düzenlemesi için ortamın yüksek pH değerinin kritik önemine işaret etmekte olduğu sonucuna varılmıştır. Hem kenevir hem de katırtırnağı liflerinin harçların basınç ve eğilme dayanımları üzerinde önemli bir etki sağlamadığı fakat sünekliği arttırdığı belirtilmiştir. Daha az oranda lif içeren karışımların daha iyi mekanik performans sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. Tüm bunların yanında çalışmada, liflerin hazırlanmasında deniz suyunun kullanılması ekolojik ve ekonomik açıdan potansiyeli yüksek bulunmaktadır (Juradin vd. 2021).

Gencel vd. (2021) tarafından yapılan bir araştırmada, uçucu kül ve kenevir lifleri takviyeli köpük betonun mikroyapısal, mekanik, dayanıklılık ve termal özellikleri incelenmiştir. Çalışmada Taguchi optimizasyon yaklaşımı yöntemi kullanılmıştır. Köpük

içeriği 50, 75 ve 100 kg/m³ olan 3 grup köpük beton karışımı hazırlanmıştır. Çalışmada bağlayıcı olarak CEM I 42.5 R tipi çimento ve %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında çimentodan ikame uçucu kül, silika kumu, köpürtücü ajan ve kenevir lifleri kullanılmıştır. Kenevir lifleri 5- 10- 20 mm uzunluğunda bağlayıcı ağırlığının %0,75'i, %1,5'i ve %3'ü oranında karışımlara eklenmiştir. Köpük beton karışımlarında toplam 450 kg/m³ bağlayıcı kullanılırken, su/bağlayıcı oranı 0,5'tir. Hazırlanan numuneler 28 gün kürlenmiştir. 28 gün kürlenmiş köpük beton numunelerin gözenekliliği ve su emme oranı artan köpük içeriğiyle birlikte artmıştır. Numunelere yapılan testler sonucunda termal iletkenlik değeri en düşük 0,226 W/mK olarak 100 kg/m³ köpük ve %30 uçucu kül içeren numunede bulunmuştur. Bununla birlikte termal iletkenlik değerlerinde %0,75 ve %1,5 oranında kenevir içeriğinde düşüş gözlenirken, %3 oranında kenevir içeriğinde bir miktar artış gözlenmiştir. Çalışma kapsamında köpük içeri arttıkça basınç dayanımının düştüğü sonucuna ulaşılmıştır. Yüksek köpük içeriklerinde kenevir lifi ilavesinin basınç dayanımında artışa sebep olduğu belirtilmiştir (Gencel vd. 2021).

Balciunas vd. (2015), kenevir lifini agrega olarak çimento pastası ile birleştirilmesi üzerinde yaptıkları çalışmada, çimento hidrasyonu üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için kenevir liflerine kompleks bir mineralizatör ilave ederek bunun miktarı üzerinde deneysel çalışmaları ortaya koymuşlardır. Çalışmada, çimento hamurunun hidrasyon süreci ile kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerinde kompleks mineralizatörün oranı ve içeriğinin etkisini belirlemek için 8 farklı karışım oluşturulmuştur. Kompleks mineralizatörün içeriği kenevir lifi kütlesi üzerinden %30 ila %81'e kadar arttırmıştır. Kuru birim ağırlığa göre, belirlenen kalıplarda lif bağlayıcı oranı 0,25 su bağlayıcı oranı ise 0,32 olarak belirlenmiştir. Çalışmada CEM I 52.5R sınıfı çimento tercih edilmiştir. Çimento pastasının viskozitesine göre süper plastikleştirici kullanılmış ve çimento ağırlığınca %0,9 oranında süper plastikleştirici kullanımı uygun bulunmuştur. Çalışmanın sonucunda, kompleks mineralizatör içeriğinin %54 olması ile en yüksek basınç dayanımı (8,03 MPa) değerine ulaşılmış, daha yüksek kompleks mineralizatör içeriği mekanik özelliklerde olumsuz etki göstermiştir. %54'ün altındaki kompleks mineralizatör içeriğinin ise yeterli çimento hidrasyonunu göstermeyebileceği belirtilmektedir. Numunelerdeki termal iletkenlik değerlerine bakıldığında kompleks mineralizatör içermeyen kontrol numunesinde 0,103 W/mK, %54 içerende ise 0,179 W/mK sonucu elde edilmiştir (Balciunas vd. 2015).

Magnezyum fosfat içerikli çimentonun bağlayıcı olarak kullanıldığı bir çalışmada, karışımdaki katıların toplam ağırlığına göre kenevir yüzdesi %8, %12, %16 ve %20 olacak şekilde döküm yapılmıştır (del Valle-Zermeño 2016). Karışımda bağlayıcıyı karıştırmak için gereken suyun bağlayıcıya oranı 0,26 keneviri karıştırmak için ilave suyun kenevire oranı ise 0,8 olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda, geliştirilen malzemenin literatürde yayınlanan diğer çalışmalara göre daha iyi mekanik ve termal özellikler sergilediği vurgulanmıştır. Çalışmanın deneysel verilerine göre, 28 günlük basınç dayanım değerleri kenevir katkısız kontrol numunesinde 45,1 MPa iken, kenevir içeriği %8, %12, %16 ve %20 olduğunda sırasıyla, 12,4 MPa -5,1 MPa -1,1 MPa ve 0,7 MPa olarak ölçülmüştür. Bu çalışmada %16 ve %20 kenevir içeriği ile elde edilen termal iletkenlik değerleri ise sırasıyla 0,15 ve 0,103 W/ mK' dir (del Valle-Zermeño vd. 2016).

Dhokal vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada %70 hidrolik kireç, %20 portland çimentosu ve %10 puzzolan içerikli bağlayıcı ve 5 ila 25 mm uzunluğunda kenevirler kullanılmıştır. Hazırlanan karışımlarda kenevir/ bağlayıcı oranı sırasıyla 1:1, 1:1,5 ve

1:2'dir. Çalışmanın sonucunda bağlayıcı içeriğinin ne kadar yüksek olursa yoğunluğun da o kadar yüksek olduğu bu bağlamda da termal iletkenlik değerinin yükseldiği belirtilmektedir. Çalışmanın verilerine göre sırasıyla kuru yoğunluk ve termal iletkenlik ölçümleri 233 kg/m^3 ile 388 kg/m^3 ve $0,074 \text{ W/mK}$ ile $0,103 \text{ W/mK}$ arasında değişmektedir (Dhakal vd. 2017).

Sassu vd. (2016) biyodoğal bileşenlere sahip titreşimle sıkıştırılmış bloklar üreterek mekanik testler uygulamışlardır. Kenevir ve mantar granülleri kullandıkları bloklarda bağlayıcı olarak doğal hidrolik kireç veya Portland çimento kullanılmıştır (Sassu vd. 2016). Dördü kenevir parçalı, biri mantar granüllü olmak üzere beş farklı karışım tasarımı tipinde hazırlanan bloklardan sadece çimento içeren blok sonuçlarına bakıldığında, görünür yoğunluğun 638 kg/m^3 basınç dayanımının ise $0,62 \text{ MPa}$ olduğu belirtilmektedir. Basınç dayanımında doğal hidrolik kirece göre çimentonun daha yüksek dayanım sağladığı söylenebilmektedir (Sassu vd. 2016).

Marceau vd. (2017) hazırladıkları çimento ve kenevir karışımları ile bitkisel agrega türlerinin sertleştirilmiş malzeme özellikleri üzerindeki etkisine odaklanmaktadır (Marceau vd. 2017). Karışımlarda keneviri, lif hali ve kenevir samanının mekanik defibrasyonu ile elde edilmiş hali olmak üzere 2 şekilde kullanmıştır. Her iki karışım grubunda da su/bağlayıcı oranı 1,5 ve bağlayıcı/kenevir oranı 2 olarak belirlenmiştir. Numuneler 7 gün kapalı kalıplarda, 83 gün kalıplar açılıp laboratuvar ortamında ve 10 gün kalıptan çıkarılarak kurutma fırınında bekletilmiştir. Kenevir lifli karışımın yığinsel yoğunluğu ve su emilimi diğer karışıma göre daha düşüktür. Kenevir lifi kullanılan numunenin yoğunluğu, gözenekliliği ve ısı iletkenliği sırasıyla; 335 kg/m^3 , %72,5 ve $0,105 \text{ W/mK}$ 'dir. Diğer numunenin yoğunluğu, gözenekliliği ve ısı iletkenliği sırasıyla; 342 kg/m^3 , %75,5 ve $0,102 \text{ W/mK}$ 'dir. Çalışmanın sonucunda yaşlanmanın, kenevir betonun gözenekliliğini etkilediği ancak akustik ve termal performanslarda değişikliklere yol açmak için yeterli olmadığı belirtilmiştir. Aynı zamanda, bağıl nem yüksek olduğunda ve bağlayıcının pH'ı karbonasyon reaksiyonu nedeniyle azaldığında küf oluşumu meydana geldiği belirtilmektedir (Marceau vd. 2017).

Türkiye' de yetiştirilen endüstriyel kenevir sapı atıklarının kenevir betonu üretiminde kullanımını araştıran bir çalışmada; çimento (CEM I 42.35 R tipi Portland çimentosu), hidrolik kireç (NHL3,5 tipi) ve kireç (CL-80S tipi) olmak üzere 3 farklı bağlayıcı kullanılarak 7 farklı bağlayıcı hazırlanmıştır (Şahin 2022). Bu bağlayıcılar ve kenevir sapı atıkları ile kütlece bir kısım kenevir iki kısım bağlayıcı ve iki tam onda iki kısım su kullanılarak numuneler oluşturulmuştur. Oluşturulan numunelerin birim hacim ağırlıkları, basınç dayanımları ve su emme miktarları tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda 28 günlük birim hacim ağırlığı en yüksek sadece çimento kullanılan numunede (455 kg/m^3) ölçülürken en düşük değer 401 kg/m^3 ile hidrolik kireç (%50) ve kireç (%50) içeren numunede ölçülmüştür. Numunelerin basınç dayanımları $0,08 \text{ MPa}$ ile $0,28 \text{ MPa}$ arasında bulunurken, en yüksek değer sadece çimentonun bağlayıcı olarak kullanıldığı numunededir. Numunelerin birim hacim ağırlık değerleri yaklaşık değerler gösterirken basınç dayanımlarında farklılıklar gözlemlenmiştir. Çalışmada, kapiler su emme katsayısı ile bağlayıcı tipi arasında ise belirgin bir ilişki görülmediği belirtilmektedir (Şahin 2022).

2.2.3. Keten kullanılarak yapılan çalışmalar

Langlet vd. (2007) hafif yapı malzemeleri üretmek amacıyla, çimento matrisi içinde ağırlıkça bağlayıcının %0-5-10-15-20 oranında keten lifleri ikame ederek karışımlar hazırlamışlardır (Langlet vd. 2007). Kullanılan keten lifleri ortalama olarak 2 mm boyutundadır. Tüm karışımlarda toplam karışım suyu aynı kalacak şekilde, karışım oranları ağırlıkça çimento, kum ve su için 1:3:0,5 olarak belirlenmiştir. Çalışmada kimyasal aktivatörler kullanılarak liflerin hidrasyon üzerindeki olumsuz etkileri azaltılmıştır. Çalışma sonucunda keten lifi oranı arttıkça mekanik performansın düştüğü belirtilmiştir. Kimyasal aktivatör uygulanmamış keten içeren kompozitlerde %20 keten içeren numunede basınç dayanımı 4,8 MPa ve eğilme dayanımı 1,2 MPa ölçülmüştür. Çalışmanın bulgularından hareketle, keten atıklarının kullanımı çevresel ve ekonomik olarak olumlu karşılanmakta, ancak dayanıklılık ve boyutsal kararlılık gibi konuların daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyduğu sonucuna varılmıştır (Langlet vd. 2007).

Aamr-Daya vd. (2008) keten parçacıklarının, yük taşıyıcı duvarlarda kullanılabilecek hafif yapı malzemesi geliştirmek amacıyla, çimento karışımlarında agrega katkı maddesi olarak potansiyel kullanımını araştırmaktır (Aamr-Daya vd. 2008). Çalışmada CEM 1 52,5 türü Portland çimentosu, geri dönüşümle elde edilmiş en uzun 2mm olarak belirlenmiş keten parçacıkları, karışımdaki içeriği çimento ağırlığının %1'i seviyesinde tutulmuş hava sürükleyici ajan kullanılmıştır. Keten parçacıkları çimentonun ağırlıkça %0-2,5-5-7,5-10 oranında kısmi ikame olacak şekilde karışımlara eklenmiştir. Çalışmada karışım oranları ağırlıkça çimento, kum ve su için 1:3:0,5 olarak belirlenmiş bağlayıcı ağırlığının %2'si oranında CaCl₂ kimyasal hızlandırıcı kullanılmıştır. Keten parçacıklarının, çimentonun hidrasyon sürecini yavaşlattığı ancak kimyasal katkı ile bunun önemli ölçüde azaltıldığı ve yine keten ilavesiyle basınç dayanımının azaldığı belirtilmektedir. Çalışmanın sonucunda basınç dayanımı, kontrol numunesine (32 MPa) göre %67 oranında düşüşle %10 keten parçacıkları içeren karışımda (10,5 MPa) görülmüştür (Aamr-Daya vd. 2008).

Tung vd. (2012) keten lifleri ile güçlendirilmiş çimento kompozitlerinin mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin araştırılması amacıyla yaptıkları çalışmada 10-30-40 mm uzunluğunda keten liflerini CEM I 52.5 N türü Portland çimentosu ve kum karışımlarına eklemişlerdir (Tung vd. 2012). Karışımlardaki çimento, kum ve su oranları ağırlıkça 1:3:0,5 olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda keten lifleri eklenmesiyle eğilme dayanımının %60 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Lif içeriği %4'e kadar arttığında eğilme dayanımının artarken, karışımın işlenebilirliğinin azalmakta olduğu bununla birlikte 30 mm uzunluğundaki liflerin optimum sonuçları verirken, mikro yapısal kusurların azaltılması ile daha iyi performans sağlanabileceği belirtilmiştir (Tung vd. 2012).

Keten ve kenevirin, sıkıştırılmış toprağa çimento ve alçı ilavesiyle birlikte basınç dayanımını inceleyen deneysel bir araştırma yapılmış (Zak vd. 2016). Toplamda 21 farklı karışım test edilmiştir. Çalışmada kil toprak ana malzeme olup, bu toprak %26 kil, %66 silt, %5 kum ve %3 çakıldan oluşmaktadır. Bağlayıcı katkı olarak çimento ve alçı, lif katkısı olarak keten ve kenevir kullanılarak 21 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışımlarda %1 ve %3 oranlarında keten ve ya kenevir lifi, %5 ve %10 oranlarında alçı veya çimento kullanılmıştır. Deneysel analizler sonucunda, liflerin basınç dayanımı üzerinde sınırlı etkisi olduğu, kırılma şekli üzerinde ise olumlu bir etki verdiği belirtilmektedir. Bununla

birlikte keten liflerinin numunenin daha sünek davranmasını sağlarken, kenevir liflerinin ise daha ince ve zayıf yapısı nedeniyle yoğunluğu azaltarak dayanımı düşürdüğü sonucu çıkarılmaktadır. Alçı katkısının genel olarak basınç dayanımını düşürdüğü, çimentonun ise toprağın bağlayıcılığını zayıflattığı ve çimento katkılı tuğlaların basınç dayanımını önemli oranda düşürdüğü tespit edilmiştir. Çalışmada doğal liflerin katkı oranı ve lif tipi gibi parametrelerin mekanik dayanım üzerinde belirleyici olduğu vurgulanmaktadır (Zak vd. 2016).

Page vd. (2017) keten lifleri takviye edilmiş betonun çoklu fiziksel ve mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmada, taze durumdaki harçların işlenebilirliği artırmak ve sertleşmiş durumda eğilme dayanımını iyileştirmeyi amaçlamışlardır (Page vd. 2017). Çalışmada CEM I 52.5 N tipi sıradan Portland çimentosu, çimentoya ek olarak, yüksek saflıkta bir kireçtaşı, daha iyi işlenebilirlik sağlamak için çimento ağırlığına göre %1 oranında süper akışkanlaştırıcı, çimento kütlesine göre %0,5 oranında viskozite düzenleyici katkı, kum, çakıl 12, 24 veya 36 mm uzunlukta kesilmiş keten lifleri kullanılmıştır. Keten lifleri içeren dokuz farklı beton grubu için karışıma katılım oranı hacimce %0,1-0,2 veya %0,3 olarak belirlenmiştir. Keten liflerinin eklenmesi, harçların fiziksel özelliklerini iyileştirmiştir; ancak lifler büyük miktarda su emmiş ve lif içeriği arttıkça basınç dayanımı azalmıştır. Bununla birlikte, optimum lif içeriği %1,0–2,0 arasında olup, bu oran daha yüksek eğilme mukavemeti sağlamıştır. Basınç dayanımına bakıldığında %0,1 hacim lif içeriğinde kontrol numunesine göre yaklaşık %4'lük bir azalma söz konusuken %0,3 hacim oranında 12 mm lif içeren numunede (38 MPa) %17 düşüş ölçülmüştür. Çalışmada daha kısa liflerin daha düşük basınç dayanımı gösterdiği belirtilmiştir (Page vd. 2017).

Smirnova (2017) tarımsal atık keten sapının ısı yalıtım malzemesi olarak tekrar kullanılabilirliğini araştırdıkları çalışmalarında, farklı bağlayıcı türleri ile keten atıklarını kullanmışlardır (Smirnova 2017). Üretilen yeni numunenin fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. İnce öğütülmüş keten atıkları 0,3-0,6 mm boyutunda kullanılırken, bağlayıcı olarak Portland çimentosu (32,5) seçilmiştir. Ortaya çıkartılan ürünün bileşimi: %27–35 çimento, %22–25 keten atığı, %13–15 kuvars kumu, %2,7–3,3 toz kireç ve %0,043–0,05 alüminyum tozu ve su şeklinde belirlenmiştir. Elde edilen üründe 300-400 kg/m³ yoğunluk ve 0,074-0,085 W/mK termal iletkenlik değeri ve 0,88-1,09 MPa 7 günlük basınç dayanımı tespit edilmiştir. Çalışmanın sonucunda keten atığının kullanılmasıyla sürdürülebilir ve çevre etkin bir yöntem sunması üzerine değinilmiştir (Smirnova 2017).

Kenevir ve keten sapı içeren doğal lifli malzemelerin kireç esaslı bağlayıcıda dolgu malzemesi olarak kullanıldığı bir çalışmada, iki farklı serinin üretimi gerçekleştirilmiştir (Brzyski vd. 2017). İki seride de bağlayıcı olarak kireç ve çimento kullanılmış, 2. seride buna kil de eklenmiştir. Portland çimentosu seri 1'de bağlayıcı ağırlığınca %9,5 ile %20,1 oranında, 2. seride ise %1 ile %20 oranında kullanılmıştır. İlk seride kenevir ve az miktarda kum matraste yer alırken, diğer seride ise keten lifi matraste eklenmiş kum çıkarılmıştır. Oluşturulan kompozitlerin gözeneklilik, yoğunluk, ısı iletkenliği, su emme oranı ve buhar geçirgenliği incelenmiş bununla birlikte mekanik özellikleri için de testler yapılmıştır. Çalışma sonucunda üretilen kompozitlerin düşük mekanik özellik sergilediği, düşük yoğunluğa ve düşük termal iletkenliğe sahip olduğu bu bağlamda da yüksek su emme oranı gösterdiği belirlenmiştir.

Kouta vd. (2020) keten liflerinin toprak beton üzerindeki etkisini araştırmak için yapay kil, çimento, kireç ve kumdan oluşan karışımlara farklı uzunluklarda (12 mm, 24 mm, 50 mm) ve oranlarda (%0-0,3 ve 0,6) keten liflerini eklenmiştir. Farklı karışımların 7, 28 ve 180 günlük maksimum basınç dayanımlarının liflerin eklenmesiyle arttığı ve 50 mm uzunluğunda %0,6 keten lifi eklenmesiyle yaklaşık 3,5 MPa ölçüldüğü belirtilmiştir. Çalışmada bu durum, lifler ile toprak beton matrisi arasındaki iyi yapışmaya bağlanarak yapışma ile çatlakların yayılmasının engellenmesi ile mekanik özellikleri iyileştirdiği çıkarımı yapılmaktadır (Kouta vd. 2020).

Yapılan bir diğer çalışmada, doğal toprağın homojenliğini ve dayanıklılığını artırmak için %30 kil ve %70 kumdan oluşan bir karışımla yapay toprak elde edilmiş, kuru karışıma kireç ve çimento eklenmiş, ardından su ve süper akışkanlaştırıcı eklenmiştir (Kouta vd. 2021). Kil ve kum karışımına göre %3 kireç ve %8 çimento kullanılarak, doğal keten lifleri hacimce %0,3 ve %0,6 oranında ikame edilip 12-24-50 mm uzunluğunda olacak şekilde yedi farklı karışım test edilmiştir. Karışımlardaki su/bağlayıcı oranı 0,45 olarak sabitlenip, keten liflerinin emdiği su için ilave su katılmıştır. Çalışmanın sonucunda üç noktalı eğilme testleri lif uzunluğunun ve içeriğinin artırılması ile numunelerin kırılma enerjisini ve çekme dayanımının yükseldiğini, sünekliliğin önemli ölçüde arttığını göstermektedir (Kouta vd. 2021).

Page vd. (2021a) keten lifi takviyeli çimentolu kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirmek ve su emme kapasitesini azaltmak için keten yağının bir kaplama maddesi olarak kullanımının etkileri araştırmıştır (Page vd. 2021). Çalışmada CEM I 52.5 R türü Portland çimentosu, sırasıyla bağlayıcı ağırlığının %0,30 ve %0,02 oranında süper akışkanlaştırıcı ve viskozite düzenleyici katkı maddesi, 0-2 mm tane boyutuna sahip kum, 12 mm uzunlukta kesilmiş keten lifleri ve keten yağı kullanılmıştır. Çalışma kapsamında hazırlanan numunelerde su/bağlayıcı oranı 0,5 ve kum/bağlayıcı oranı 1'dir. Keten lifleri ise toplam karışım hacmine göre %1,0-2,0 ve 3,0 oranlarında eklenirken, liflerin ve karışımdaki diğer malzemelerin su emme kapasitesi dikkate alınarak su ilavesi yapılmıştır. Çalışma sonucunda termal iletkenlik verilerine bakıldığında: kontrol numunesi 2,05 ile 2,37 W/mK ile en yüksek ısı iletkenlik değerlerini gösterirken, %1,0 lif içeriğine sahip numuneler 1,75 ile 2,08 W/mK, %3,0 lif içeriğine sahip numuneler 1,23 ile 1,68 W/mK arasında ısı iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Bu bağlamda keten lifleri ısı iletkenlik özelliklerini olumlu etkilemiştir. Ayrıca, aynı lif içeren numunelerde, keten yağı ile işlenmiş keten lifleri içerenler, ham lif içerenlere göre daha düşük ısı iletkenlik değerlerini vermiştir. Keten yağı işleminin, malzemenin yoğunluğunu düşürerek ısı iletkenliğinin düşmesine katkı sağladığı belirtilmektedir (Page vd. 2021a). Çalışma kapsamında basınç dayanım değerlerine bakıldığında, kontrol numunesine (39,6MPa) göre düşüş gözlemlenmiş, %2,0 lif içeriğinde 31,7 ile 33,9 MPa arasında, %3,0 lif içeriğinde 23,1 ile 26,8 MPa arasında ölçülmüştür. Keten yağı ile işlenmiş lifler, ham liflere göre daha düşük basınç dayanımı göstermiştir. Çalışmanın sonucunda keten yağı kullanılmasının, keten liflerinin su emme kapasitesini azaltarak hem taze hem de sertleşmiş durumda kompozitin performansını iyileştirdiği bu bağlamda da çevresel etkileri azaltarak sürdürülebilir malzeme geliştirme için umut verici bir çözüm olduğu belirtilmektedir (Page vd. 2021a).

Page vd. (2021b) tarafından yapılan çalışmada keten liflerin dayanıklılığını artırmak ve çevresel etkiyi azaltmak için Portland çimentosunun alternatif bağlayıcılarla (metakaolin, granüle yüksek fırın cürufu ve kalsiyum sülfat alüminat çimento) kısmen

veya tamamen değiştirilmesinin etkileri araştırılmıştır (Page vd. 2021b). Çalışmada farklı bağlayıcı oranları ile hazırlanmış harçların taze ve sertleşmiş durumdaki fiziksel ve mekanik özellikleri incelemiş 7, 28, 90 ve 320 günlük kür sürelerinden sonra üç nokta eğilme ve basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Metakaolin ve yüksek fırın cürufu içeren harçlar, uzun vadeli kür süresi sonrasında Portland çimentosu bazlı harçlarla benzer basınç dayanımı göstermiş olup kalsiyum sülfat alüminat çimento, 320 günlük kür süresi sonunda önemli ölçüde dayanıklılık ve tokluk sağlamıştır. Çalışmada keten lifleri toplam hacmin %1,0'i olacak şekilde kumdan ikame olarak kullanılmış, alternatif bağlayıcılar keten liflerinin bozulmasını geciktirmiştir (Page vd. 2021b).

Zhang vd. (2021) ultra yüksek performanslı betonun (UYPB) yüksek sıcaklık altında mekanik özelliklerine, keten ve çelik liflerin kombine etkisini incelemektedir (Zhang vd. 2021). UYP karışımlarında Portland çimentosu (CEM II 52.5 R), silis dumanı, silis kumu, ince agrega ve süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Karışımlara, farklı oranlarda (hacimce %0-1-2-3) mikro çelik lifler ve keten lifi (hacimce %0-2-4-6) ilave edilmiştir. Çalışmada keten liflerine temizleme amaçlı bir ön işlem uygulanmış ve 12 mm uzunluğunda kesilmiştir. Numuneler 200°C ila 800°C arasındaki sıcaklıklara maruz bırakılarak basınç dayanımı ölçülmüştür. Çalışmanın sonucunda basınç dayanımında keten liflerin dayanımı azalttığı ancak çelik liflerin eklenmesiyle dayanımın artırıldığı belirtilmiştir (Zhang vd. 2021). Keten lifi içeriği %6 olan numunelerde basınç dayanımında %15'lik düşüş keten liflerinin neden olduğu gözenek artışı ve liflerin büzülmesi ya da şişmesi sonucu oluşan boşluklara bağlanmıştır (Zhang vd. 2021).

Gonzalez-Lopez vd. (2021) çimento ve oranı %0 ile %40 arasında değişen metakaolin ikamesi kullanarak, dokunmamış kumaş donatı olan 2 mm kalınlığında ve 60 mm uzunluğundaki keten lifleri ekledikleri çalışmalarında 300x300 mm boyutlarında kalıplarla karışımlar üretmiştir (Gonzalez-Lopez vd. 2021). Karışımlarda nihai su bağlayıcı oranı 0,45 iken toplam ağırlığın %5'i keten lifi içeriği olarak hesaplanmıştır. Üretilen kompozitlerin termal ve yangın davranışı araştırılmıştır. Kompozitler alev oluşturmamış aynı zamanda pul pul dökülme yapmayıp, duman çıkarmamıştır. Çalışmada keten liflerinin 250 °C'ye kadar takviye edici özelliklerini koruduğu, çimento matrisinin ise 450°C'ye kadar performansını sürdürdüğü sonucuna varılmıştır. Metakaolin ilavesinin ısı iletkenliğini düşürdüğü ve dış cephe kaplamaları gibi yangına hassas dikkat gerektiren yapı bölümlerinde kullanılabilir olduğu belirtilmiştir (Gonzalez-Lopez vd. 2021).

Keten liflerin çimento esaslı karışımlara eklenmesinde, taze ve sertleşmiş durumlarda liflerin topaklanması ve büzülmesi durumlarıyla karşılaşılmaktadır. Rahimi vd. (2022a) buradan hareketle karıştırma yöntemlerinin ve keten liflerinin işlenmesinin, harçların taze ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyerek yöntem önerisinde bulunmuştur (Rahimi vd. 2022a). Keten lifleri, farklı yüzey koşulları (hidrotermal, alkali işlem görmüş ve işlem görmemiş) ve doygunluk seviyelerinde (kuru ve önceden doymuş) kullanılmış karışımlara çimento ağırlığının %0,3-0,6-0,9-1,2-1,5-1,8 oranında ilave edilmiştir. Karışımlarda kütlece çimento/kum oranı 1:2,75 ve su/çimento oranı 0,45 olarak belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda keten lifleri ilavesinin, liflerin su emme kapasitesi nedeniyle karışımın akışkanlığını azalttığı ancak, liflerin hidrotermal ve alkali yüzey işlemlerine tabi tutulmasıyla karışımın akışkanlığının iyileştirildiği belirtilmektedir (Rahimi vd. 2022a). Çalışmada, işlem görmüş liflerin işlem görmemişlere göre daha az büzüldüğü görülmüş, alkali işlem uygulananların betonun kütleme ajanı olarak kullanıma

uyun potansiyelde olduğu sonucuna varılmıştır (Rahimi vd. 2022a). Basınç dayanımı testlerinde tüm numunelerde %0,9 keten lifi içeren numuneler en yüksek dayanımı göstermekte, lif oranı artmasıyla gözeneklilik artışına bağlı dayanım düşmüştür. Alkali işlem görmüş keten lifi, daha iyi bağlandığından, işlem görmemiş ve hidrotermal işlem görmüş keten liflerine kıyasla en yüksek basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarını sergilemiştir (Rahimi vd. 2022a).

Yapılan başka bir çalışmada Portland imentosu, silis dumanı, kum, iri agrega karışımlarına, 15mm uzunluğunda kesilmiş işlem görmemiş ham haldeki ve alkali işlem görmüş keten lifleri olarak iki şekilde ilave edilmiştir (Rahimi vd. 2022b). Keten lifleri bağlayıcı ağırlığının %0,15-0,30-0,50'si oranında karışımlara eklenmiştir. Çalışmada, alkali işlem görmüş liflerin büzülmeyi %26 oranında azalttığı, işlenebilirliği arttırdığı, mekanik performansa olumlu katkıda bulunduğu belirtilmiştir. Bu liflerle hazırlanan numunelerin basınç dayanımını %12 oranında arttırdığı aynı zamanda eğilme dayanımını %23 oranına kadar yükselttiği belirtilerek, keten liflerinin %0,3 oranında ilavesiyle elde edilen numunelerin optimum mekanik özellikler sergilediği sonucuna varılmıştır (Rahimi vd. 2022b).

Keten tohumu müsilajının, Portland çimentosuna katkı maddesi olarak keten tohumu müsilajının eklenmesi ile hazırlanmış harçların özelliklerini inceleyen bir çalışmada, imento ağırlığına göre farklı oranlarda (%0,1-0,25 ve 0,75) keten tohumu müsilajı kullanılmıştır (Brevet vd. 2024). Müsilaj keten tohumunun işlenmesi sırasında ortaya çıkan, yüksek oranda polisakkarit, protein ve mineral içeren doğal bir yan üründür ve karışımlara ilavesiyle, çimentonun priz süresi artmıştır. Yüksek oranda kullanımının harcın daha kuru, kumlu ve kalıplama sırasında kırılğan bir yapıya dönüşmesine yol açtığı belirtilmektedir. Ayrıca düşük oranlı kullanımda 28 günlük basınç dayanımı referans karışımla benzer iken %0,75 oranlı kullanımında daha düşük basınç dayanımı tespit edilmiştir. Buradan hareketle çalışmanın sonucunda düşük oranlı kullanımın priz süresi kontrolü, hidrasyona olumlu katkı sağlama ve sürdürülebilir evre dostu bir katkı olarak kullanılabileceği vurgulanmaktadır (Brevet vd. 2024).

2.2.4. Aerojel kullanılarak yapılan alışmalar

Kim vd. (2013) aerojel katkılı kompozit malzemelerin yalıtım değerleri ve uygulanabilirliği üzerinde araştırma yapmıştır (Kim vd. 2013). Bilindiği üzere aerogeller hidrofobik özelliğe sahiptir, bu nedenle aerogelin çimentoyla karıştırılabilmesi için metanol kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda aerogellerin yüksek sıcaklıklarda termal olarak kararlı olduğu ve 1150°C'ye kadar herhangi bir bozulma göstermedikleri TGA analizi ile kanıtlanmıştır. Çalışmada, SEM görüntülerinde aerogelin kimyasal yapısının değişmediği ve imento içerisinde fiziksel olarak kararlı olarak yerleştiği grlmştir. Aerojelin bağlayıcı ağırlığının %2,0'si oranında kullanılması ısı iletkenliğini 0.533 W/mK'den 0.135 W/mK'ye indirgememiştir. Ancak artan aerojel içeriği basınç ve eğilme dayanımını ciddi oranda dşrmştir; basınç dayanımı %80 düşüşle 5.9 MPa'ya, eğilme dayanımı ise %70 düşüşle 2.0 MPa'ya kadar zayıflamıştır. Artan aerojel miktarıyla beraber su emme oranı artmış ancak taze harçlarda akışkanlık azalmıştır. Araştırma sonucunda, aerojel katkılı karışımların yüksek yalıtım kapasitesi sunduğu ve sürdürülebilir yapı sktrnde kullanıma uygun olduğunun grldği vurgulanmaktadır. Ancak mekanik olarak dayanım düşüşüne sebep olduğu için taşıyıcı olmayan, yalıtım

amaçlı uygulamalarda kullanılmasının daha uygun olduğu çıkarımı yapılmıştır (Kim vd. 2013).

Gao vd. (2014) beton karışımlarına silika aerjel partikülleri ekleyerek hafif ve daha iyi termal performans gösteren aerjel içeren beton üretmişlerdir (Gao vd. 2014). Çalışmada çimento (CEM I 42.5 R), silis dumanı, kum, su, süper akışkanlaştırıcı ve aerjel partikülleri kullanılmıştır. Karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0,4 olarak belirlenmiş olup toplam karışımın hacimce %60'ı agregadır. Agreganın ise hacimce %10-20-30-40-50-60 oranında aerjel ikamesiyle karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan beton karışımlarda aerjel içeriğinin artmasıyla yoğunluk, termal iletkenlik ve basınç dayanımı düşmüştür. %60 aerjel içeriğine sahip numunenin yoğunluğu 1,0 g/cm³ ve basınç dayanımı 8,3 MPa ölçülürken, termal iletkenlik 0,26W/mK ile kontrol numunesine göre %86 azalmıştır. Çalışmanın sonucunda aerjelin maliyetini düşürmek ve üretim süreçlerinin optimize edilebilmesi için daha fazla araştırma yapılması önerilmektedir (Gao vd. 2014).

Ng vd. (2015) aerjel içeren yüksek performanslı beton karışımlarının mekanik ve ısı iletkenliği özellikleri incelenmiştir (Ng vd. 2015). Yapı alanında verimli, dayanımı yüksek ve düşük iletkenliğe sahip yeni betonların geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Deneyler sonucunda aerjel'in oranı arttıkça; yoğunluğu azalmış, ısı yalıtımı artmıştır. Ancak basınç dayanımı önemli ölçüde azalmıştır. Hacimce %50 aerjel içeren karışımlarda; basınç dayanımı 20 MPa, ısı iletkenliği ise yaklaşık 0,55 W/mK ölçülmüştür. Hacimce %70 aerjel içeren karışımlarda; basınç dayanımı yaklaşık 5,8 MPa'ya düşmüş, ısı iletkenliği ise sadece %20 oranında artmıştır. SEM analizleri incelendiğinde karışımlar arasında uyumsuzluk ve bağlanma boşlukları olduğu gözlenmiştir. Elde edilen bütün veriler değerlendirildiğinde yüksek performanslı beton tarifi için %50 aerjel içeriği optimum özelliklere sahip olarak kabul edilmiştir. Çalışmada betonların yapı içerisinde verimli kullanılabilmesi için yüzel modifikasyonlarının yapılması, lif katkıları gibi ek yöntemler ile bağ kuvvetinin artırılması tavsiye edilmektedir (Ng vd. 2015).

Ng vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, geleneksel harçlarda bulunan çimentonun bir kısmının kalsine kil ile yer değiştirilerek, aerjel katkısı ile birlikte yeni harç üretiminde bulunmuşlardır (Ng vd. 2016). Harç içeriğindeki değişimin etkisi incelenerek mekanik dayanım üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Araştırmada aerjel oranı %70'in altındayken ısı iletkenliği %20'ye kadar düşmüş, aerjel oranı %70'in üstündeyken ısı iletkenliği %40'a kadar düşmüştür. Karışımda %35 kalsine kil bulunan harçta benzer mekanik dayanım görülmüştür ancak %65 oranlarına çıkıldığında mekanik dayanım %50'ye kadar düşmüştür. Aerjel'in miktarı arttıkça ısıl iletkenlik ve mekanik dayanım azalmıştır. Yapılan deneyler sonucunda aerjel katkılı harçlarda çimento yerine kalsine kil kullanımı ısı yalıtımını önemli ölçüde arttırmıştır. Kalsine kil için optimum oran %35 olarak kabul edilmiş, bu oran aşıldığında mekanik özelliklerde ciddi ölçüde azalma görülmüştür. Çalışma sonucunda sürdürülebilir yalıtım malzemeleri için potansiyele sahip olduğu bilgisi verilmiştir (Ng vd. 2016).

Hanif vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada üstün ısı yalıtımı ve mekanik özelliklere sahip, oldukça hafif çimento esaslı kompozit malzeme geliştirilmesi amaçlanmıştır. Agregat olarak uçucu kül, silika aerjel ve polivinil alkol lifleri kullanılarak karışımlar hazırlanmıştır (Hanif vd. 2016). Deneysel analizler sonucunda,

aerojel miktarına göre, basınç dayanımı 23,54 ile 18,63 MPa arasında, eğilme dayanımı 4,94-3,66 MPa arasında ölçülürken, ısı iletimi katsayısı 0,319 W/mK' e kadar düşmüştür. SEM analizlerinde aerojel miktarının gözenekliliği arttırdığını ve gözeneklerin mikro boyutlarda olduğu görüntülenmiştir. Karışımların TGA verilerine göre yüksek sıcaklıklarda da termal olarak kararlı olduğu gözlenmiştir. Deneyler ışığında karışımın yeterli mekanik dayanım sunduğu ve etkili ısı yalıtımı sağladığı bu bağlamda da sürdürülebilir yapı uygulamalarında kullanımının uygun olduğu belirtilmektedir (Hanif vd. 2016).

Liu vd. (2016) silika (SiO_2) aerojel katkılı ısı yalıtım malzemesi geliştirilmesi konusunda araştırma yapmıştır (Liu vd. 2016). Yapılan çalışma kapsamında yoğunluğunun düşük ve ısı iletkenlik performansının yüksek olması, bunun yanında yüksek gözeneklilik özelliklerinden dolayı aerojel seçilmiştir. Araştırmada farklı hacimsel oranlarda %10-%60 SiO_2 aerojel parçacıkları kullanılarak çimento harçları üretilmiş ve incelenmiştir. Üretilen %60 aerojel içerikli karışımın yoğunluğu 1231,4 kg/m³, basınç dayanımı 2,15 MPa ve eğilme dayanımı 0,45 MPa bulunmuştur. Deneyler sonucunda aerojel oranı arttıkça hem basınç hem de eğilme dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Termal iletkenlik katsayısı ise 0,152 W/mK olarak ölçülmüştür. Bu çalışmadan elde edilen verilere göre yeni üretilen harç geleneksel harçlara göre daha düşük ısı iletkenliğine sahiptir. Buna bağlı olarak da ısı yalıtımı amacıyla özellikle dış cephe yalıtımı ve sürdürülebilir binalarda kullanılabilir bir malzeme olduğu çıkarımı yapılmıştır. Ancak mekanik özelliklerinden dolayı taşıyıcı özelliği bulunmayan alanlar için daha uygun olduğu çalışmanın sonucunda yer almaktadır. (Liu vd. 2016).

Wang vd. (2018) tarafından agrega olarak kullanılmak üzere geliştirilmiş perlit içerisine aerojel enjekte ederek oluşturulan yeni malzemeyle birlikte termal yalıtım ve mekanik dayanımı sağlayan hafif betonlar üretmeyi amaçladıkları bir çalışma ortaya koymuştur (Wang vd. 2018). Aerojel ile doldurulmuş granül boyutlarına göre derecelendirilmiş (GEPA) ve derecelendirilmemiş (NEPA) perlit ayrı ayrı olacak şekilde betona eklenmiştir. Karışımlarda su/çimento oranı 0,5 ile 0,7 olarak tutulmuştur. Üretilen numunelere mekanik dayanım testleri, termal iletkenlik ve SEM analizleri yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda hacimce %100 oranında derecelendirilmiş aerojel dolgulu geliştirilmiş perlit içeren numunenin termal iletkenlik değeri 0,098 W/mK ve basınç dayanımı ise 3,71 MPa olarak ölçülmüştür. Çalışmada aerojel dolgusunun betonun termal iletkenliğine önemli ölçüde etkisinin olduğu belirtilmekle birlikte, su/çimento oranının artması ile termal iletkenliğin düştüğü ve basınç dayanımının azaldığı tespit edilmiştir. Çalışmada, yapılan analiz verilerine göre üretilen yeni kompozitlerin düşük ısı iletkenliğine sahip, hafif ve yalıtkan beton üretimi potansiyeli olduğu üzerinde durulmaktadır (Wang vd. 2018).

Zeng vd. (2018) sürdürülebilir ve enerji tasarrufu sağlayan binalar için termal yalıtımı yüksek, hafif ve mekanik olarak standartları karşılayan çimento bazlı kompozit malzeme geliştirilmesi amacıyla iki tür yalıtım katkı malzemesi üzerinde inceleme yapmıştır (Zeng vd. 2018). Yapılan deneylerde cam kürecikler ve nano silika aerojel katkı malzemesinin birlikte kullanılmasıyla oluşturulan çimento esaslı kompozitlerin gözenek yapısı, mekanik ve termal özellikleri araştırılmıştır. Çalışmada %25 aerojel içeren karşımda 0,08 W/mK termal iletkenlik değeri elde edilmiştir. Aerojel oranı arttıkça kompozit malzemenin yoğunluğu azalmakta ve gözeneklilik artmaktadır. Nano silika

aerojel, matrisleri ve matrislerle cam kürecikler arasındaki ilişkiyi zayıflatıldığından basınç ve eğilme dayanımları azalmaktadır. Yapılan testlere göre optimum performans için aerojel oranının %10'un altında tutulması gerektiği sonucuna varılmıştır. Çalışma sonucunda bütün veriler analiz edildiğinde, çimento karışımlarına nano silika aerojel ve diğer dolgu maddelerinin kullanılması yönteminin, sürdürülebilir ve çevre dostu alternatif yapı malzemesi geliştirmek için etkili olduğu çıkarımı yapılmaktadır (Zeng vd. 2018).

Zhu vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada, tünel içlerinde yüksek performanslı beton kaplamaların yangın dayanımını iyileştirmek amacıyla, aerojel çimento karışımı harçların fiziksel özelliklerini ve yapısını incelemiştir (Zhu vd. 2019). Tünel yangınlarında betonun düşük gözenekliliği ve geçirgenliği nedeniyle içindeki su buharı basıncını dışarıya atamamakta, betonun dökülmesine ve parçalanmasına sebep olmaktadır. Çalışma kapsamında bu durumun önüne geçebilmek için yapıların yüzeyine aerojel katkılı çimento içerikli sıva katmanı uygulanarak yangın korunumunu arttırmak amaçlanmıştır. Aerojel gözenekli yapısı ve yüksek ısı iletkenliği performansı sayesinde; yangın esnasında ısı transferini geciktirmekte, betonun maruz kaldığı sıcaklık artışını yavaşlatabilmektedir. Yapılan araştırma ve deneylerde aerojel takviyeli çimento harçların 0,17-0,40 W/mK arasında düşük ısı iletkenliğine sahip olduğu sonucu çıkarılmıştır. Aerojel oranı arttıkça termal iletkenlik düşmekte ancak mekanik dayanım azalmaktadır. Çalışmada yapılan BET analizi aerogelin büyük ölçüde yapısını koruduğunu göstermektedir. Ayrıca 40-50 mm kalınlıktaki harç katmanı büyük ölçüde beton dökülmesini ve parçalanmasını engellemekte, 13-18 mm'lik daha ince harç katmanları beton dökülmesini ve parçalanmasını yalnızca geciktirmektedir. Çalışmanın sonucunda, yüksek performanslı beton yapıların yüzeyine yalıtım özelliği kazandırmak için aerojel takviyeli çimento harç uygulanarak, yangın durumunda ısınmayı geciktirme ve ana taşıyıcı beton yapının performansını etkilenmemesini sağlamak bu doğrultuda da yapının bütünlüğünü korumak amacıyla silika aerogelin etkili bir koruyucu olduğu belirtilmektedir (Zhu vd. 2019).

Wang vd. (2019) yüksek ısı yalıtımına sahip betonlar geliştirmek amacıyla aerojel katkılı betonlar üretmiştir (Wang vd. 2019). Aerogelin farklı oranlarda kullanılarak üretilen betonların termal iletkenlik değerinin nem ve sıcaklık koşullarına göre tepkileri incelenmiştir. Yapılan karışımlarda kum yerine hacimce %0 ila %60 aralığındaki oranlarda aerojel kullanılmıştır. Deneyler sonucunda sıcaklık arttıkça termal iletkenliğin arttığı ve en yüksek artışın %15,5 ile %30 oranında aerojel katkılı numunede olduğu ayrıca en düşük termal iletkenliğin 20°C'de %60 oranında aerojel içeren numunede 0,18 W/mK olarak ölçüldüğü görülmektedir. Nemin etkisi incelendiğinde ise bağıl nem %0'dan %100'e çıkarıldığında termal iletkenlik artmıştır. En fazla değişim %60 oranında aerojel içeren numunede %76,3 olarak tespit edilmiştir. Aerojel oranı arttıkça yoğunluk azalmıştır. Yoğunluk referans numunesinde 1826 kg/m³ iken %60 oranında aerojel içeren numunede 1183 kg/m³ olarak ölçülmüştür. Aerogelin hidrofobik yapısı nedeniyle, aerojel oranı arttıkça su emme katsayısı düşmüştür. En düşük su emme oranı %60 oranında aerojel içeren numunede elde edilmiştir. Aerojel eklenmesi termal iletkenliği büyük ölçüde azaltmıştır, nem ve sıcaklıkla birlikte iletkenliği kontrol edilebilir seviyede tutmaktadır. Deneysel verilere göre %60 oranında aerojel içeren numunede optimum sonuçlara ulaşıldığı ve numunenin ideal iletkenlik seviyelerini verdiği belirtilmektedir (Wang vd. 2019).

Al Zaidi vd. (2019a) tarafından yapılan bir başka çalışmada, bağlayıcı olarak kullanılan çimentonun hacimce %60'ının aerojel ile, kumun ise hacimce %50'sinin uçucu kül ile ikame edilerek, nano silika (%1-3 oranlarında) eklenmesiyle numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerde farklı kür ortamlarına bağlı oluşan ısı ve mekanik performans incelemesi yapılmıştır (Al Zaidi vd. 2019a). Çalışmada en iyi kürleme ortamı olarak 1 hafta boyunca suda bekletilen numunelerin sonrasında 28. gün bitimine kadar havada bekletilmesi yöntemi belirlenmiştir. 28 gün kürlenene numunelerde basınç dayanımı 31,00 MPa ile 29,30 MPa arasında olup, 28 gün suda kürlenene numunelerde ise bu değer 28,90 MPa ile 26,00 MPa arasında ölçülmüştür. Çalışma sonucunda en düşük ısı iletkenlik değerleri 0,762 W/mK ile 0,865 W/mK arasında bulunmuştur. Suda 28 gün kürlenene numunelerde ise bu değer 0,918 W/mK ile 1,051 W/mK arasındadır (Al Zaidi vd. 2019a).

Al Zaidi vd. (2019b) nano silika ve hidrofobik silika aerojel karışımli betonların mekanik ve termal yalıtım özellikleri incelemiştir (Al Zaidi vd. 2019b). Çalışmada hem mekanik dayanım hem de ısı yalıtımı sağlayan hafif betonların geliştirilmesi amaçlanmıştır. Betonun içerisinde yer alan tüm kum, silika aerojel tozu ile değiştirilmiştir. Değişim sonrasındaki gözlemlerde ısı iletkenliğinin referans betona göre %58 oranında azalarak 0,866 W/mK olduğu, yoğunluğun %22,8 oranında düştüğü ve 28 günlük basınç dayanımının 27,11 MPa olarak ölçüldüğü belirtilmektedir. SEM analizinde çimento matrisine iyi bağlandığını ve çatlak oluşumunun azaldığı sonucu çıkarılmıştır. Optimum oranlarda hazırlanan karışımların; hafif, termal yalıtım performansı yüksek ve yeterli dayanım sağlayan özelliklerde olduğu belirtilmiştir. Bu veriler ışığında silika aerojel kullanımıyla elde edilen hafif betonun; enerji kullanımını azaltma potansiyeli olduğu, ısıtma/soğutma ihtiyacını düşürdüğü, duvarda nem ve küf oluşumunu azalttığı sonucuna varılmıştır (Al Zaidi vd. 2019b).

Li vd. (2019) yüksek ısı yalıtımına sahip düşük yoğunluklu aerojel köpük beton geliştirmeyi amaçlayan araştırmada; çimento, aerojel ve köpük bileşenlerini içeren karışımlar hazırlayarak incelemelerde bulunmuştur (Li vd. 2019). Optimum oranlar (%5 çimento, %30,8 aerojel ve %64,2 köpük) kullanılarak hazırlanan beton; 198 kg/m³ gibi düşük yoğunluk ve 0,049 W/mK düşük ısı iletkenlik değerini göstermiştir. Aerojel yaklaşık %94 oranında yüksek gözenekliliğe sahip olup, ısı yalıtım performansını arttırmıştır. Çalışmada termal iletkenlik deneylerinde Hamilton ve Maxwell modelleri kullanılmıştır. Karşılaştırmalı analizlerin de gösterdiği üzere geleneksel köpük betonlara göre çalışmada üretilen betonun %50 daha hafif ve %50 daha düşük ısı iletkenliğe sahip olduğu gözlenmiştir. Ayrıca aerojelin kullanılması sadece ısı yalıtımını iyileştirmekle kalmamış aynı zamanda mekanik dayanımı arttırmış ve şekillendirilebilirlik gibi özelliklerini iyileştirmiştir. Araştırma sonucunda, aerojel kullanılarak oluşturulan yeni köpük betonun, sürdürülebilir bina uygulamaları ve düşük enerji tüketimli yapı projeleri için uygun yapı malzemesi olarak öne çıkabileceği belirtilmektedir (Li vd. 2019).

Adhikary vd. (2020) bağlayıcı olarak CEM I 42.5 R tipi çimento ve uçucu kül karışımlarına genişmiş cam agrega, prefabrike plastik boncuk ve silika aerojel kullanarak hafif beton ortaya çıkarmayı hedefledikleri çalışmalarında numunelerin mekanik ve termal performansını tespit etmişlerdir (Adhikar vd. 2020). Çalışmada dört farklı beton numune serisi hazırlanıp, su/bağlayıcı oranı 0,65 olarak belirlenmiş, ilk seride uçucu kül çimento ağırlığının %0 ila %30'u arasında ikame edilerek en iyi performansı gösteren oran belirlenerek diğer seriler buna göre üretilmiştir. Aerojel karışımlarda

hacimce toplam agregâ içeriğinin %15-30-45-60 oranında eklenerek kullanılmıştır. Çalışma sonucunda uçucu kül ve plastik baloncuk eklenmesiyle basınç dayanımının düştüğü, karışımlardaki aerojel oranının artmasıyla önemli ölçüde azaldığı belirtilmektedir. Aerojel, beton karışımına %15'ten %60'a kadar eklendiğinde, 28. gün basınç dayanımını %42,8 ile %60,7 arasında ve yoğunluğunu %3,7 ile %11,6 arasında azaltmıştır. Aynı zamanda aerojel içeren karışımlarda termal iletkenlik değeri 0,337 W/mK ile 0,318 W/mK arasında olup, aerojel içermeyen kontrol numunesinde bu değeri 0,356 W/mK'dir (Adhikar vd. 2020).

Üstündağ (2020) silika bazlı aerojel kullanılarak elde edilen harç örneklerinde termal yalıtım sağlanmasını amaçlamıştır (Üstündağ 2020). Araştırmada çimento harçlarına %0,25 ve %0,50 oranlarında aerojel eklenmiş, silis dumanı %10 oranında sabitlenmiş ve %30, 40 ve 50 oranlarında uçucu kül çimento matrisine ilave edilmiştir. Deneyler sonucunda en düşük termal iletkenlik %0,25 aerojel katkılı 7 numaralı numunede 1,458 W/mK olarak ölçülmüştür. Basınç dayanımı testlerinde ise en iyi değerleri %0,25 aerojel katkılı 2 ve 7 numaralı numuneler gösterirken sırasıyla 71,6 MPa 71,5 MPa olarak tespit edilmiştir (Üstündağ 2020).

Yoon vd. (2020) yaptıkları çalışmada, geleneksel köpük betonun ısı yalıtımı ve nem direnci özelliklerini geliştirmek amacıyla aerojel kullanılarak, yeni malzeme geliştirmeyi amaçlamaktadır (Yoon vd. 2020). Ayrıca aerojelin nano boyutta gözeneklere sahip olması, yüksek yalıtım özelliği göstermesi ve su itici yapısıyla homojen biçimde köpük betonla birleştirilmesi üzerinde araştırmada bulunmuşlardır. Aerojeller belirli basınç altında köpük betona emdirilmiş ve sonrasında testlere tabi tutulmuştur. Isı iletkenliği geleneksel köpük betona göre %30-%50 oranında azalmış yaklaşık 0,08 W/mK ölçülmüştür. Su emme oranı ise 24 saatte %75 oranında düşmüştür. Su temas açısı 120,8° ölçülmüş olup, bu durum yüksek derecede su itici yüzey oluşturduğunu ifade etmektedir. Yapılan deneylerin sonucunda aerojel katkısının köpük betonda iyileşmelere sebep olduğu, bina yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirliğinin de önemli ölçüde arttığı vurgulanmıştır (Yoon vd. 2020).

Zhu vd. (2020) kendiliğinden yerleşen betonların tünel yangınlarında karşılaştığı beton dökülmesini ve parçalanmasını riskine karşı, beton yüzeyine uygulanan aerojel çimento harcının yangın koruması konusunda etkinliği araştırılmıştır (Zhu vd. 2020). Kendiliğinden yerleşen betonun yüzeyine 40 mm kalınlığında aerojel içeren çimento harç uygulanmış, 1100 °C sıcaklıkta 2,5 saat süren tünel yangını simüle edilmiştir. Aerojel harcın termal iletkenliği 0,167 W/mK, basınç dayanımı 3,5 MPa ölçülmüştür. Deney sırasında kendiliğinden yerleşen betonun yüzeyi 2,5 saat sonunda sadece 124 °C'ye ulaşmıştır. Beton dökülmesini ve parçalanmasını önleyen sınır sıcaklık 380 °C'dir. Aerojel harç kaplamada beton dökülmesi ve parçalanmasına rastlanmamış, kaplamasız olan numune ise tamamen parçalanmıştır. Kendiliğinden yerleşen betonun yangın sonrası basınç dayanımı 42,3 MPa olarak ölçülmüştür, kontrol numunesinin basınç dayanımı ise 42,8 MPa'dır. Mikroskop analizinde kendiliğinden yerleşen beton ve aerojel harç kaplamanın düzgün bir bağ oluşturduğu ve ısıya karşı direnç gösterdiği anlaşılmaktadır. Çalışmada XRD ve SEM gözlemlerinde aerojel harç kaplamanın kalınlığı arttıkça iç sıcaklık dağılımının daha dengeli olduğu ve bozulmaların azaldığı saptanmıştır. Bütün yapılan analiz ve değerlendirmeler sonucunda 400 mm kalınlığındaki aerojel harcın tünel yangını gibi yüksek sıcaklıklarda kendiliğinden yerleşen betonları etkili şekilde koruyabildiği belirtilmektedir. Aerojel çimento harç kaplamanın hem yapısal bütünlüğü

korumakta hem de beton dökülmesini ve parçalanmasını önlemekte etkili bir çözüm olduğu vurgulanmaktadır (Zhu vd. 2020).

Bostancı (2020) tarafından yapılan çalışmada çevre dostu ve sürdürülebilir yapı malzemesi geliştirilmek amacıyla, silika aerojel katkısının alkali aktive edilmiş uçucu kül harçlarında mekanik dayanım ve yapısal özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çimento karışımında %0,25 ile %0,50 oranlarınca silika aerojel ve %50 oranında uçucu kül kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda ortalama 20 MPa basınç dayanımına sahip karışımlarda %27'ye kadar basınç tokluğu ve %70'e kadar pik sonrası basınç tokluğu artışı gözlenmiştir. Aerojel karışımlarda deformasyon kapasitesini iyileştirmiştir. Optimum sonuç olarak yüksel aerojel katkısı %0,50 ile düşük aktivatör (%0,1) kullanımı ve düşük aerojel katkısı %0,25 ile yüksek aktivatör (%0,2) kullanımıyla ulaşıldığı belirtilmektedir. SEM görüntülerinde aerojel katkısının mikro yapıyı önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Araştırmada düşük oranlarda dahi silika aerojel karışımının dayanım, esneme gibi mekanik özelliklere pozitif etkisi olduğu, ikincil bir etkisinin ise ısı yalıtımı performansını artırması olduğuna değinilmektedir. Çalışmada, bulgular ışığında gelecekte dayanıklı ve sürdürülebilir yapı malzemelerinin tasarlanabileceği öngörülmektedir (Bostancı 2020).

Bostancı ve Sola (2018) tarafından sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesi amacıyla, silika aerojel katkısının alkali aktive edilmiş cüruf harçlarının dayanım, gözeneklilik ve ısı yalıtımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır (Bostancı ve Sola 2018). Karışımlarda %0,75 ile %1,00 oranında silika aerojel kullanılmış ve %0,03 ile %1,50 oranlarında lityum karbonatla aktive edilmiştir. Deneyler sonucunda en yüksek basınç dayanımı, %0,75 aerojel ve %1,5 lityum karbonat içeren karışımda, 36,9 MPa olarak ölçülmüştür. Gözenek hacmi %11,5 ile %15,5 arasında artış göstermiştir. En düşük ısı iletkenliği 1,32 W/mK olarak %0,75 aerojel ve %0,03 lityum karbonat içeren karışımda elde edilmiştir. Basınç dayanımı ve ısı iletkenliği arasındaki ilişkinin önemli olduğu bu bağlamda da yüksek gözenek çapına sahip karışımda en iyi ısı yalıtımı sağlandığı belirtilmiştir. Çalışmanın sonucunda optimum oranlarda yapılan silika aerojel ve lityum karbonat aktivatör kullanımda, yüksek dayanım ve yüksek ısı performansı elde edilebileceği ortaya çıkarılmaktadır. Bu çalışma ile sürdürülebilir yapı malzemeleri yapımında silika aerojelin önemini ortaya çıkarılmak istenmiştir (Bostancı ve Sola 2018).

Lu vd. (2020) silan bağlayıcı ajan kullanarak yüzey modifikasyonu yapılmış aerojel karışımının, nano silika ile güçlendirilmiş çimento hamuruna eklenmesiyle hafif aerojel çimento kompozitleri üretmişlerdir (Lu vd. 2020). Yapılan modifikasyon işleminin kompozit üzerinde gözenek yapısı ve sertleşmiş hal özellikleri olan etkisi araştırılmıştır. Aerojelin çimento ile uyumunu arttırmak için KH-550 silan bağlayıcısı ile modifikasyonu yapılmış ve %1,5 oranında silika eklenmiştir. Çimento hamurunun hacimce %66'sı oranında modifikasyon yapılmış aerojel katkısı ile 0,067 W/mK ısı iletkenliğine, 1,2 MPa basınç dayanımına ve 390 kg/m³ yoğunluğa sahip kompozit malzeme üretilmiştir. Ayrıca kompozitin porozitesi %72,8 ve ortalama gözenek çapı 170,9 nm olarak ölçülmüştür. Araştırma sonucunda yüzey modifikasyonu, aerojel ve çimento arasındaki uyumu arttırmış bu sayede hem mekanik hem de termal özellikleri geliştirmiştir. Üretilen kompozitin dış cephe yalıtımı, çatı izolasyonu gibi binalarda enerji verimliliği gerektiren uygulamalar için kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır (Lu vd. 2020).

Kayır (2021) tarafından aerogelin yalıtım malzemesi olarak kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılmış, beş farklı sentez yöntemiyle aerogel üretimi gerçekleştirilmiştir (Kayır 2021). Ürünlerin yoğunluk, termal iletkenlik gibi temel özellikleri analiz edilmiştir. Çalışmada üretilen numunelerin yoğunluk değerleri 0,66-1,053 g/ml aralığında, ısı iletkenliği ise 0,067-0,097 W/mK aralığında tespit edilmiştir. Ortaya çıkan iletkenlik değerleri incelendiğinde iyi bir ısı yalıtım malzemesi olduğu çalışma kapsamında vurgulanmıştır. Ancak üretim süreci pahalı ve zor olduğundan yerli ve düşük maliyetli alternatiflerin geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğu belirtilmiştir. Araştırmada aerogel'in üstün yalıtım özelliğine sahip olduğu sonucuna varılmıştır (Kayır 2021).



3. MATERYAL VE METOT

Çalışmanın bu bölümünde, çalışma kapsamında kullanılan hammaddelerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine değinilmiş ve hazırlanan karışımlara yapılan analizler metot kısmında detaylı olarak anlatılmıştır.

3.1. Materyaller

Çimentolu karışımlarda kullanılan tüm hammaddelerin özelliklerine bu kısımda yer verilmiştir. Bu özelliklere karışım öncesinde bakılarak çimentolu karışımlarda kullanılan hesaplamalarda dikkate alınmıştır.

3.1.1. Çimento

Deneyisel çalışmalarda TS EN 197-1 (2012) standardına uygun olarak üretilmiş BATIÇİM A.Ş' nin İzmir Bornova'da yer alan tesislerinde üretilen CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır.

Çimentoya özgül ağırlık deneyi Le Chaletier balonu yöntemi kullanılarak Formül 3.1 ile hesaplanmıştır. Hesaplama sonucunda çimentonun özgül ağırlığı 3,09 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

$$d = \frac{m}{(v_2 - v_1)} \quad (3.1)$$

Burada,

d : çimentonun özgül ağırlık (g/cm³)

m : çimentonun kütlesi (g)

V_1 : Le Chaletier balonunda ilk okunan hacim (mL)

V_2 : Le Chaletier balonunda ikinci okunan hacim (mL)' dir.

3.1.2. Agrega

Çalışmada maksimum dane boyutu 2 mm olan, LİMAK Çimento San. Ve Tic. A. Ş. Trakya (Pınarhisar/Kırklareli) tesislerinden temin edilen, TS EN 196-1 standardında 1350±5 g'lık kullanıma hazır poşetler içerisinde RİLEM standart kumu kullanılmıştır. Kullanılan kumun elek analizi sonuçları Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

Kullanılan kumun özgül ağırlık tayini için Le Chaletier balonu yöntemi ve su emme deneyleri için kesik huni yöntemi kullanılmıştır. Belirli miktar kum 24 saat suda bekletilip daha sonrasında sıcak tabla üzerinde kurutularak suya doymun kuru yüzey (SDKY) haline getirilmiştir. SDKY hali kesik huniye gevşek olarak doldurulup 25 kez sıkıştırma tokmağı ile vurularak yerleşim sağlanmıştır. Kesik huni çekilip spatula ile yığın ortadan ikiye ayrılmıştır. Bölünmüş olan yığınların bozulma olmadan kalması durumunda dağılma olana kadar kurutma işlemine devam edilmiş ve su emme oranı bulunmuştur. Su emme oranı Formül 3.2 kullanılarak hesaplanmıştır. Kullanılan kumun özgül ağırlığı

2,67 g/cm³ olarak bulunmuştur.

Çizelge 3.1. Kumun elek analizi

Elek açıklığı (mm)	Elek üzeri %
0,08	98 ±2
0,16	87 ± 2
0,5	67 ±2
1,0	33 ±2
1,6	9 ±2
2,0	0 ±2

$$Su\ emme\ (\%) = \frac{m_{SDKY} - m_{EK}}{m_{EK}} \times 100 \quad (3.2)$$

m_{SDKY} : SDKY haldeki kumun kütlesi (g)

m_{EK} : Etüv kurusu haldeki kumun kütlesi (g)'dir.,

3.1.3. Keçi kılı

Çalışmada kullanılan keçi kılı, Aydın Nazilli'deki kara çadır dokuma tesislerinden elde edilmiştir. Tesisten alınan keçi kılları çimento karışımlarında daha homojen dağılım sağlamak için Şekil 3.1'de görüldüğü üzere kesilerek küçük parçacıklara ayrılmıştır.



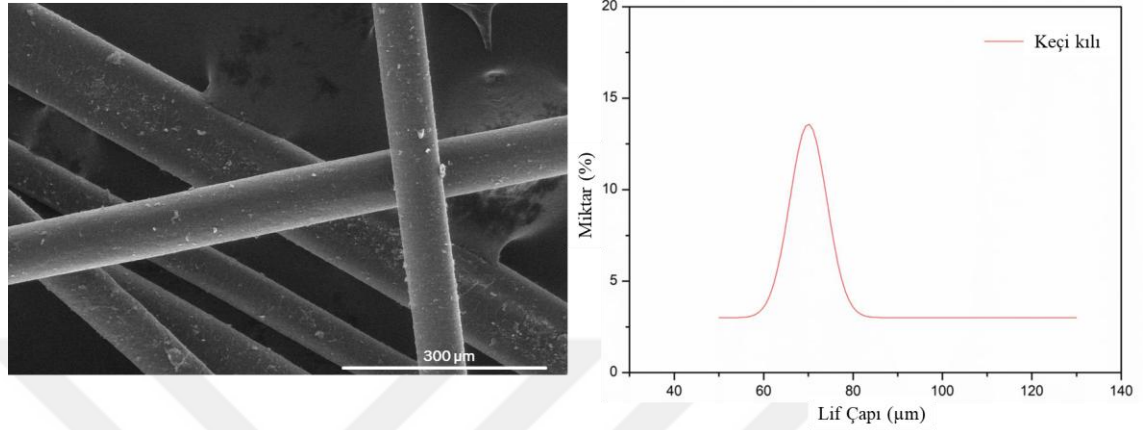
(a)



(b)

Şekil 3.1. a) Keçi kılı tesisten alınmış hali; b) Keçi kılı kesilmiş hali.

Tez kapsamında elde edilen keçi kılına Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi yapılmıştır. Şekil 3.2’de SEM görüntüsü ve lif çapı dağılımını gösteren histogram bulunmaktadır.



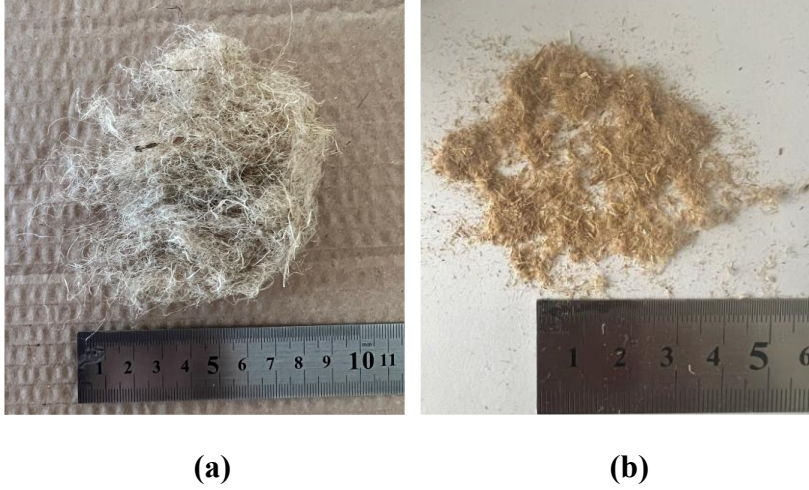
Şekil 3.2. Keçi kılına ait SEM görüntüsü ve histogramı

Keçi kılının SEM görüntüsü incelendiğinde; ölçek çubuğu 300 µm olup, liflerin silindirik nispeten pürüzsüz ve düzgün yapıda olduğu gözlenmiştir. Histogramda da görülebileceği gibi lif çapı dağılımı 60 ila 80 µm arasında değişmektedir. Liflerin yaklaşık %14’ünün lif çapı 70 µm civarındadır. Histogram tek bir tepe noktasına sahiptir. Buradan hareketle liflerin üniform olduğu, lif çapı dağılımının homojen olduğu söylenebilmektedir. Liflerin yüzeyi pürüzsüzdür, ancak yüzeyinde küçük partiküller görülmüştür. Bu da liflerin hazırlık sürecinden kaynaklanmaktadır.

3.1.4. Kenevir

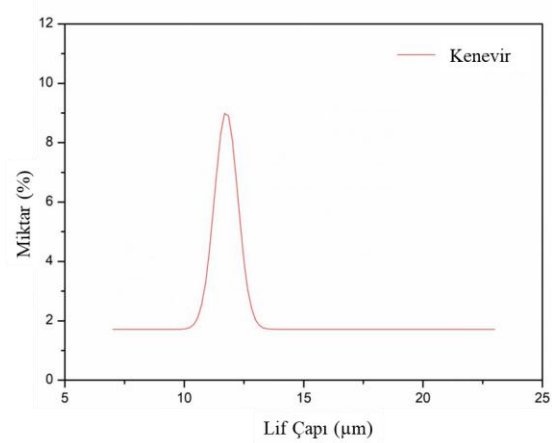
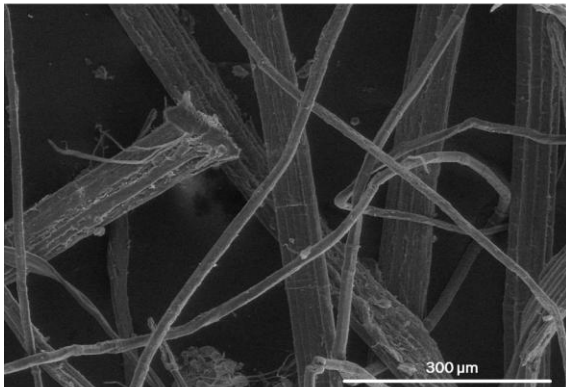
Çalışmada kullanılan kenevir lifleri, Sinop Ayancık’taki üretim firmasından temin edilmiştir. Tesisten alınan kenevir lifleri çimento karışımlarında daha homojen dağılım sağlamak için Şekil 3.3’te görüldüğü üzere kesilerek küçük parçacıklara ayrılmıştır.

Şekil 3.4’ te çalışma kapsamında kullanılan kenevir liflerinin SEM görüntüsü ve lif çapı dağılımını gösteren grafik bulunmaktadır. SEM görüntüsünde 300 µm ölçeğinde büyütme kullanılmıştır.



Şekil 3.3. a) Kenevir tesisten alınmış hali; b) Kenevir kesilmiş hali.

Kenevir liflerine ait SEM görüntüsü incelendiğinde; doğal selülozik liflerin karakteristik özelliğinden kaynaklanan çizgili bir yapı gösterdiği, kenevir liflerinin düzensiz bir yapıda olduğu söylenebilmektedir. Görüntüdeki bazı liflerin yüzeylerinin yıpranmış olması mekanik olarak bir işlem görmüş olabileceğini düşündürmektedir. Ayrıca liflerin bükülmüş ve kıvrımlı yapıda olması esnek olduğunu göstermektedir.

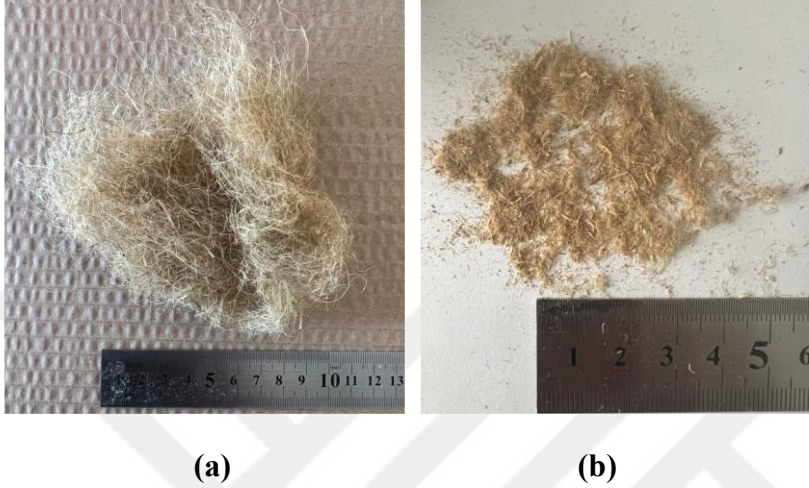


Şekil 3.4. Kenevir lifine ait SEM görüntüsü ve histogramı

Kenevir lifinin histogramına bakıldığında; tek tepeli ve üniform olduğu, lif çaplarının belirli bir aralıkta yoğunlaştığı görülmektedir. Bir başka deyişle kenevir liflerinin en ince lif çapı 11 µm iken en kalın lif çapı 14 µm civarındadır. Buradan hareketle kenevirin bütün liflerinin çapı birbirine oldukça yakın olup neredeyse aynı az çapa sahip olduğu ve keçi kılına göre çok daha ince yapıda olduğu sonucu çıkarılmıştır.

3.1.5. Keten

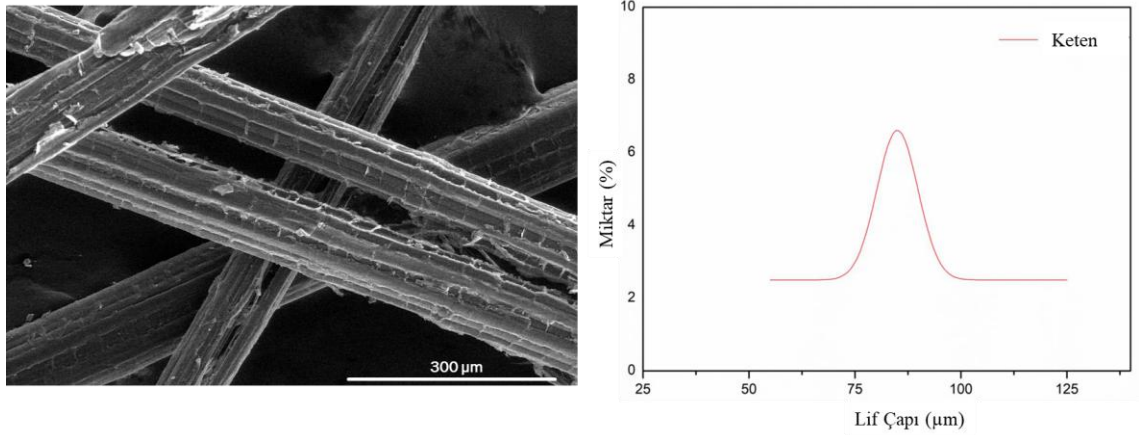
Çalışmada kullanılan keten lifleri, Sinop Ayancık'taki üretim firmasından temin edilmiştir. Tesisten alınan kenevir lifleri çimento karışımlarında daha homojen dağılım sağlamak için Şekil 3.5'te görüldüğü üzere kesilerek küçük parçacıklara ayrılmıştır.



Şekil 3.5. a) Keten tesisten alınmış hali; **b)** Keten kesilmiş hali.

Tez kapsamında elde edilen keten liflerine ait SEM görüntüsü ve histogramı Şekil 3.6' da verilmiştir. Keten liflerine ait SEM görüntüsü 300 μm ölçeğinde olup, kenevir lifinde olduğu gibi karakteristik özelliğinden kaynaklanan çizgili ve pürüzlü bir yapı göstermektedir. Keten liflerinin çap dağılımı tek bir tepe noktasına sahiptir, yani liflerin çoğu belirli bir çap aralığında yoğunlaşmıştır. Keten liflerinin çapı 75 ila 100 μm arasındadır. Liflerinin yaklaşık %7'si 87,5 μm lif çapına sahiptir.

Keten ve kenevirin histogramı karşılaştırıldığında kenevirin lif çaplarının daha homojen olduğu görülmektedir. Ayrıca keten liflerinin kenevir lifinden daha kalın olduğu, lifler arası bağlantının daha düzenli olduğu tespit edilmiştir. Keçi kılına göre ise keten lifleri daha ince ancak yüzey yapısı olarak tabakalıdır.



Şekil 3.6. Keten lifine ait SEM görüntüsü ve histogramı

3.1.6. Aerojel

Çalışmada İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Malzeme Bölüm Laboratuvarı'nda üretilmiş olan aerojel kullanılmıştır.

3.1.7. Karışım suyu

Çimentolu karışımlarda laboratuvardaki şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.8. Kimyasal katkı

Çalışmada kenevir ve keten lifi içeren karışımların işlenebilirliğinin artırılması için kimyasal katkı maddesi kullanılmıştır. Fosroc Yapı Kimyasalları firması tarafından üretilen polikarboksilat polimer bazlı Auracast 535 kodlu yeni nesil süper akışkanlaştırıcı katkı ile işlenebilirlik sağlanmıştır. Kimyasal katkının yoğunluğu 1,05-1,09kg/l olmakla beraber betondan beklenen performansa bağlı olarak bağlayıcı malzeme miktarının %0,5 ile %2,0'ı oranında kullanılabilir. Çalışmada ise bağlayıcı ağırlığının %1,5'i oranında ilave edilmiştir.

3.2. Kullanılan Karışım Oranları ve Karışımların Hazırlanması

Bu çalışma kapsamında; kum hariç tutularak üretilen çimento pastaları ayrı ayrı lif katkıları ve bu katkılı karışımlara aerojel ilavesi yapılmış şekilde karışımlar hazırlanmıştır. Aynı şekilde karışımlara kum eklenerek deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Toplamda 16 farklı birleşime sahip karışım hazırlanarak numuneler üretilmiştir.

3.2.1. Kullanılan karışım oranları

Çalışmada karışım oranları belirlenirken TS EN 196-1 standardından yola çıkılmıştır. Agregalı örnekler için, TS EN 196-1 standardında belirtildiği şekilde; 225 g su, 450 g çimento ve 1350 g CEN standart kum kullanılmıştır. Karışımlar agregalı ve agregasız olarak gruplandırılmıştır. Agregasız örnek için su ve çimento kütle oranı aynı

tutulmuştur.

Literatür taraması sonuçlarına bakıldığında, kenevir ile yapılan çalışmalarda erişilen termal iletkenlik değerleri lif oranı arttıkça düşmektedir. Ancak çalışma kapsamında yapılan denemeler sonucunda lif oranı arttırıldığında işlenebilirliğin azaldığı görülmüştür. Bu bağlamda karışımlardaki lif oranı çimento hacminin %30'u olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Liflerin su emme oranlarına bakıldığında keten ve kenevirin su emme oranlarının fazla olduğu, keçi kılının ise düşük olduğu belirlenmiştir. Buradan hareketle kenevir ve keten katkılı karışımlarda su oranını sabit tutmak için su emme oranlarına göre ekleme yapılmıştır.

Agregalı karışımlarda agrega hacminin %2'si oranında aerojel ikamesi yapılmıştır. Aerojel oranı belirlenirken uygulanabilirlik bağlamında erişimi zor ve pahalı olduğundan ikame oranı düşük tutulmuştur. Agregalı karışımlarda belirlenen hacimce aerojel oranı, agregasız karışımlarda da aynı tutulmuş ve bu oran çimento hacminin %7'si olarak kullanılmıştır. Hazırlanan çimentolu numunelere ait karışım oranları hacimce Çizelge 3.2'de ve gram cinsinden Çizelge 3.3'te gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Çimentolu numunelere ait hacimce karışım miktarları

	Num. kodu	Bağ/lif o.(%)	Keçi k. (cm ³)	Kenevir (cm ³)	Keten (cm ³)	Çimento (cm ³)	Su (ml)	Kum (cm ³)	Aerojel (cm ³)
Agregasız	Ç	0	0,0	0,0	0,0	145,5	225,0	0,00	0,0
	K	30	43,6	0,0	0,0	145,5	225,0	0,00	0,0
	KEN	30	0,0	43,6	0,0	145,5	225,0	0,00	0,0
	KET	30	0,0	0,0	43,6	145,5	225,0	0,00	0,0
	ÇA	30	0,0	0,0	0,0	145,5	225,0	0,00	10,0
	ÇAK	30	43,6	0,0	0,0	145,5	225,0	0,00	10,0
	ÇAKEN	30	0,0	43,6	0,0	145,5	225,0	0,00	10,0
	ÇAKET	30	0,0	0,0	43,6	145,5	225,0	0,00	10,0
Agregalı	KÇ	0	0,0	0,0	0,0	145,5	225,0	504,2	0,0
	KK	30	43,6	0,0	0,0	145,5	225,0	504,2	0,0
	KKEN	30	0,0	43,6	0,0	145,5	225,0	504,2	0,0
	KKET	30	0,0	0,0	43,6	145,5	225,0	504,2	0,0
	KAC	0	0,0	0,0	0,0	145,5	225,0	494,1	10,0
	KAK	30	43,6	0,0	0,0	145,5	225,0	494,1	10,0
	KAKEN	30	0,0	43,6	0,0	145,5	225,0	494,1	10,0
	KAKET	30	0,0	0,0	43,6	145,5	225,0	494,1	10,0

Çizelge 3.3. Çimentolu numunelere ait karışım miktarları (g)

	Num. kodu	Bağ/lif o. (%)	Keçi k. (g)	Kenevir (g)	Keten (g)	Çimento (g)	Su (ml)	Kum (g)	Aero-jel (g)
Agregasız	Ç	0,0	0,0	0,0	0,0	450,0	225,0	0,0	0,0
	K	11,9	53,6	0,0	0,0	450,0	225,0	0,0	0,0
	KEN	14,8	0,0	66,7	0,0	450,0	225,0	0,0	0,0
	KET	14,0	0,0	0,0	63,0	450,0	225,0	0,0	0,0
	ÇA	0,0	0,0	0,0	0,0	450,0	225,0	0,0	1,5
	ÇAK	11,9	53,6	0,0	0,0	450,0	225,0	0,0	1,5
	ÇAKEN	14,8	0,0	66,7	0,0	450,0	225,0	0,0	1,5
	ÇAKET	14,0	0,0	0,0	63,0	450,0	225,0	0,0	1,5
Agregalı	KÇ	0,0	0,0	0,0	0,0	450,0	225,0	1350,0	0,0
	KK	11,9	53,6	0,0	0,0	450,0	225,0	1350,0	0,0
	KKEN	14,8	0,0	66,7	0,0	450,0	225,0	1350,0	0,0
	KKET	14,0	0,0	0,0	63,0	450,0	225,0	1350,0	0,0
	KAÇ	0,0	0,0	0,0	0,0	450,0	225,0	1323,0	1,5
	KAK	11,9	53,6	0,0	0,0	450,0	225,0	1323,0	1,5
	KAKEN	14,8	0,0	66,7	0,0	450,0	225,0	1323,0	1,5
	KAKET	14,0	0,0	0,0	63,0	450,0	225,0	1323,0	1,5

Numune kodları içerikleri şu şekildedir: Ç; çimento ve su içeren kontrol numunesini, K; çimento, su ve keçi kılı numunesini, KEN; çimento, su ve kenevir numunesini, KET; çimento, su ve keten numunesini ifade ederken bunlara aerjel ilavesiyle oluşturulan numunelere ÇA başlangıç harfleri kullanılmıştır. Agregalı karışımlarda KÇ; kum, çimento ve su içeren kontrol numunesini, KK; kum, çimento, su ve keçi kılı numunesini, KKEN; kum, çimento, su ve kenevir numunesini, KKET; kum, çimento, su ve keten numunesini ifade etmektedir. Agregalı karışımlarda liflere ek olarak aerjel katkılı numuneler ise KA harfleriyle belirtilmiştir.

3.2.2. Karışımların hazırlanması

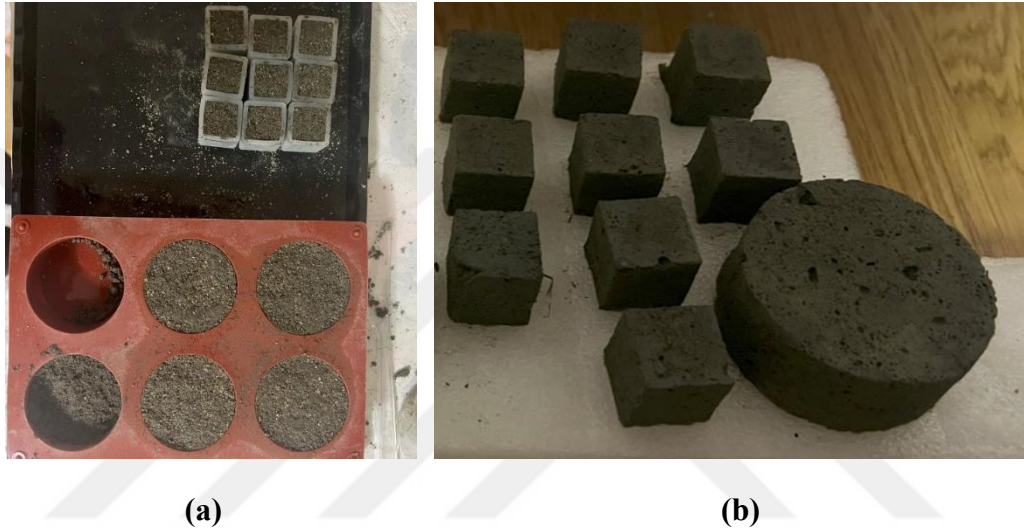
Bu çalışmada TS EN 196-1 standardında belirtilen aşamalardan yola çıkarak, her bir harç numunesi karıştırıcı mikser ile karıştırılmıştır. Karıştırma kabına önce su koyup üzerine çimento eklenip 30s düşük hızda, sonra kum eklenip 30s yüksek hızda karıştırma, kabın kenarlarına yapışan harcın temizlenmesi ile 60 s yüksek hızda karıştırma yöntemi kullanılmıştır.

Agregalı ve aerjelsiz karışımlarda, su ve çimento karıştırıldıktan sonra lif eklemesi yapılmış daha sonra kum ilave edilerek karıştırma işlemi tamamlanmıştır. Agregasız ve aerjelsiz karışımlarda, su ve çimento karıştırıldıktan sonra lif eklenerek karıştırma işlemi yapılmıştır.

Aerjel içeren tüm karışımlarda ise, aerjelin karışım içeriğinde ayrışmaması için

aerogelin küttelece %5'i oranında sodyum laurik eter sülfat (SLES) kullanılmıştır. Karışım suyunun 2/3'ü kaba konularak SLES ile çözündürülmüş üzerine çimento eklenip karıştırıldıktan sonra aerogel ilave edilerek homojen hale getirilmiştir. Daha sonra sırasıyla lif, geri kalan karışım suyu ile karıştırma işlemi tamamlanmıştır.

Hazırlanan karışımlar önceden yağlanmış 20x20x20 mm boyutundaki küplere ve çapı 57 mm yüksekliği 25 mm olan silikon kalıplara dökülmüştür. Priz alması için 24 saat bekletilerek sonrasında kalıplarından çıkarılmıştır (Şekil 3.7). Numuneler kür havuzuna koyularak 28 gün süreyle $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 'de standart kür uygulamasına tabi tutulmuştur.



Şekil 3.7. a) Kalıba dökülen harç; b) Kalıptan çıkarılan numuneler.

3.3. Deneysel çalışmalar

3.3.1. Fiziksel deneyler

Çalışma kapsamında kullanılan liflerin gerçek yoğunluklarının tespit edilebilmesi için sıvı piknometresi kullanılmıştır. Şekil 3.8'te görülen 50ml'lik balon joje şeklindeki piknometre ile ölçümler yapılarak Formül 3.3 ile hesaplanmıştır.



Şekil 3.8. Sıvı piknometresi.

$$Yoğunluk = \frac{(B - A)}{(D - A) - (C - B)} \times \rho \quad (3.3)$$

A: şişe+kapak ağırlık (g),

B: şişe+kapak+lif ağırlığı (g),

C: şişe+kapak+lif+sıvı ağırlık (g),

D: şişe+kapak+sıvı ağırlığı (g),

ρ : kullanılan sıvının özgül ağırlığı (g).

Hazırlanan numunelerin fiziksel özelliklerinden birim hacim ağırlık, su emme oranı ve görünür boşluk oranı tayini yapılmıştır. Bu özellikler tespit edilirken Şekil 3.9’da görülen laboratuvarında bulunan alttan tartım özellikli elektronik terazi ve özel düzeneği kullanılmıştır. Numunelerin deney için özel hazırlanmış düzenekte su içerisinde asılı ağırlıkları (SDKY suda) tartılmıştır. Daha sonra numune sudan çıkarılarak yüzeyi kurulandıktan sonra terazide (SDKY havada) ölçümü yapılmıştır. Numuneler ağırlığı sabit kalıncaya kadar etüvde kurutulmuş, tartımları yapılmış ve etüv kurusu ağırlıkları bulunmuştur. Tüm gruplarda 3’er adet numuneye fiziksel deneyler uygulanmıştır.



Şekil 3.9. Tartım düzeneği.

Kuru birim ağırlık numunenin toz hacmi, partiküller arası boşluk hacmi ve hem açık hem de kapalı gözenek hacmini kapsamaktadır. Görünür birim ağırlık ise numune ağırlığının görünür katı hacime oranı olarak hesaplanmakta, toz hacmi ve kapalı gözeneklerin hacmini içermektedir (Avcıoğlu 2017). Kuru birim ağırlık, görünür birim ağırlık ve görünür boşluk oranı aşağıdaki formüllere göre hesaplanmıştır.

$$\rho_k = \frac{m_e}{m_{sh} - m_{ss}} \times \rho_{su} \quad (3.4)$$

$$\rho_g = \frac{m_e}{m_e - m_{ss}} \times \rho_{su} \quad (3.5)$$

$$GBO = \frac{m_{sh} - m_e}{m_{sh} - m_{ss}} \quad (3.6)$$

ρ_k : kuru birim ağırlık (g/cm³),

ρ_g : görünür birim ağırlık (g/cm³),

m_e : numunenin etüv kurusu haldeki ağırlığı (g).

m_{sh} : numunenin SDKY havadaki ağırlık (g),

m_{ss} : numunenin suya doymun halde su içindeki ağırlığı (g),

ρ_{su} : suyun özkütlesi (g/cm³),

GBO : görünür boşluk oranı (%).

Su emme kapasitesi malzemeye giren su miktarının, malzemenin kuru ağırlığına bölünerek bulunmakta ve % olarak belirlenmektedir (TS EN 13755, 2009). Ağırlıkça su emme yüzdesi Formül 3.7 ile hesaplanmıştır.

$$Su\ emme\ oramı\ (\%) = \frac{m_{sh} - m_e}{m_e} \times 100 \quad (3.7)$$

m_{sh} : numunenin SDKY havadaki ağırlık (g),

m_e : numunenin etüv kurusu haldeki ağırlığı (g).

Numunelerin gerçek yoğunluğunun tespiti için helyum piknometre kullanılmıştır. Numuneler toz haline getirilmiş Micromeritics otomatik gaz piknometresi ile tespit edilmiştir (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Toz haline getirilmiş numune.

Piknometrenin 1- 3,5 veya 10 cm³ kapasiteli hücrelerinden biri hassas terazide tartılarak ağırlığı piknometre cihazı içerisindeki programa girdi olarak kaydedilmek üzere bir kenara yazılmış ve hücre ağırlığının darası alınmıştır. Piknometre hücresinin darası alındıktan sonra numune ile doldurulup, içerisinde numune bulunacak olan piknometre hücresi, bir de bu şekilde tartılarak ağırlığı yine cihaz içerisindeki programa girdi olarak kaydedilmek üzere bir kenara yazılmıştır. İçinde numune bulunacak olan piknometre hücresi cihaz içerisine yerleştirilmiş ve cihazda kullanılmak üzere olan tüp içerisindeki helyum gazı açılmıştır (Şekil 3.11). Cihaz içerisindeki program kılavuzluğunda analiz başlatılmış ve değerler alınmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.11. a) Piknometre hücresinin darası; b) Numune ile doldurulmuş hücre ; c) Cihaz içine yerleştirilmiş hücre.

Çalışma kapsamında numunelerin gerçek yoğunluğu bulunduğundan sonra aşağıdaki formül kullanılarak toplam porozite hesaplanmıştır.

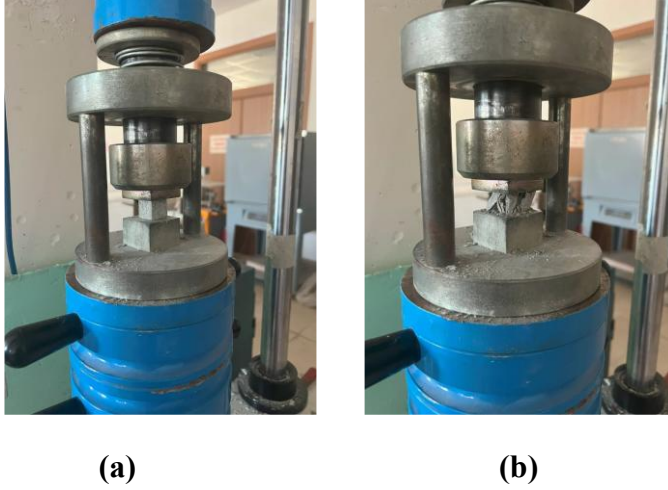
$$\text{Toplam porozite (\%)} = \frac{1 - \rho_{bulk}}{\rho_{gerçek}} \times 100 \quad (3.8)$$

ρ_{bulk} : numunenin yığın yoğunluğu (g/cm³),

$\rho_{gerçek}$: numunenin gerçek yoğunluğu (g/cm³).

3.3.2. Basınç dayanımı deneyi

Numunelerin mekanik özelliklerinden basınç dayanımı tespitinde 20x20x20 mm boyutundaki küp numunelere Şekil 3.12'deki gibi deplasman kontrollü pres kullanılmıştır. Basınç dayanımı deneyinde kullanılmak üzere her numune grubundan 6'şar adet üretim yapılmıştır. Metal kırma başlıkları arasına yerleştirilen numunelere kırılıncaya kadar basınç yükleme yapılmıştır.



Şekil 3.12. a) Cihaza yerleştirilmiş numune; **b)** Cihazda kırılmış numune.

3.3.3. Termal iletkenlik analizi

Çalışmada termal iletkenlik analizinde numunelerin termal iletkenlik katsayısının λ (W/mK) ölçümü yapılmıştır. Tüm termal iletkenlik analizleri İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Malzeme Araştırma Merkezi'nde bulunan FOX 50 termal iletkenlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Cihaz 50mm ila 62mm arasında çapa sahip, en fazla 25mm kalınlığındaki silindirik numunelerde ölçüm gerçekleştirmektedir.

Çalışma kapsamında çapı 57 mm yüksekliği 25 mm olacak şekilde üretilen numunelere termal iletkenlik testi uygulanmıştır.

3.3.4. Dijital mikroskop ile görüntüleme analizi

Çalışma kapsamında üretilen numunelerin yüzey morfolojilerinin incelenmesi amacıyla Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi bünyesinde yer alan dijital mikroskop kullanılmıştır. Kullanılan yüksek çözünürlüklü dijital ekranlı mikroskop 1 ila 1200 kat büyütme yapabilme özelliğine sahiptir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Dijital mikroskopta numunelerin incelenmesi.

Numuneler mikroskopun platformuna yerleştirilmiş yan aydınlatmalar sayesinde homojen olarak aydınlatılmıştır. İnceleme esnasında oda sıcaklığı ve ortam koşulları sabit bırakılmış ve 10 kat büyütme oranında, cihazın otomatik odaklama sistemi ile gözlem yapılmıştır. Alınan görüntüler cihazın hafıza kartına kaydedilerek aktarım sağlanmıştır.



4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu bölümde çalışma kapsamında yapılan analizlerden elde edilen verilen paylaşılarak değerlendirmelerde bulunmaktadır.

4.1. Fiziksel Deney Sonuçları

Çalışmada hazırlanan lif katkılı, aerjel içeren ve içermeyen, agregalı ve agregasız çimento harçlarına ve kontrol numunelerine ait deney sonuçları Çizelge 4.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Numunelere ait fiziksel deney sonuçları.

	Numune kodu	Hacimce bağ./lif oranı (%)	Kuru birim hacim ağırlık (g/cm^3)	Görünür birim ağırlık (g/cm^3)	Görünür boşluk oranı (%)	Kütlece su emme (%)
Agregasız	Ç	0	1,56	2,31	32,46	20,82
	K	30	1,34	2,22	39,69	29,74
	KEN	30	1,17	2,24	47,92	41,11
	KET	30	1,31	2,33	43,55	33,16
	ÇA	0	1,16	1,84	36,74	31,69
	ÇAK	30	1,33	2,18	39,12	29,47
	ÇAKEN	30	1,26	2,19	42,56	33,87
	ÇAKET	30	1,22	2,11	42,04	34,50
Agregalı	KÇ	0	2,00	2,36	15,00	7,50
	KK	30	1,73	2,32	25,36	14,66
	KKEN	30	1,61	2,36	31,92	19,83
	KKET	30	1,70	2,36	27,88	16,88
	KAC	0	1,65	2,03	18,25	10,99
	KAK	30	1,71	2,32	26,24	15,32
	KAKEN	30	1,62	2,24	27,44	16,92
	KAKET	30	1,59	2,19	27,56	17,42

Çimento pastasına hacimce bağlayıcının %30’u oranında ayrı ayrı keçi kılı, kenevir ve keten lifi ilave edildiğinde kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla 1,34; 1,17 ve 1,31 g/cm^3 bulunmuştur. Çimento pastasına ait kontrol numunesinde (Ç) ise bu değer 1,56 g/cm^3 ’tür. Bu grubun aerjel ilave edilen numunelerinde ise kuru birim hacim ağırlık keçi kılı, kenevir ve keten lifi içeriğine göre sırasıyla 1,33; 1,26 ve 1,22 g/cm^3 iken kontrol numunesinde (ÇA) 1,16 g/cm^3 olarak ölçülmüştür.

Agregalı karışımların kuru birim hacim ağırlık değerlerine bakıldığında kontrol numunesi (KÇ) 2,00 g/cm^3 iken aerjel içeren kontrol numunesinde (KAC) 1,65 g/cm^3 ’dur. Aerjel içermeyen agregalı numunelerde keçi kılı, kenevir ve keten lifi ilavesine göre sırasıyla 1,73; 1,61 ve 1,70 g/cm^3 ’tür. Agregalı ve aerjel içerikli numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla 1,71; 1,62 ve 1,59 g/cm^3 olarak

bulunmuştur.

Görünür birim ağırlık ya da görünür katı yoğunluğu numune ağırlığının görünür katı hacme oranı olarak hesaplanmakta ve görünür hacim toz ve kapalı gözeneklerin hacmini de kapsamaktadır. Arşimed prensibi ile yapılan ölçümlerde, agregasız grupta kontrol numunelerinde görünür birim ağırlık $\bar{C}$: 2,31 g/cm³ ve $\bar{C}_A$: 1,84 g/cm³ olarak bulunmuştur. Bu grupta aerjel ilave edilmeyen ayrı ayrı keçi kılı, kenevir ve keten lifi katkısı olan numunelerin sırasıyla görünür birim ağırlık değerleri 2,22; 2,24 ve 2,33 g/cm³'tür. Aynı sıralamayla aerjel ilaveli numunelerde ise 2,18; 2,19 ve 2,11 g/cm³ değerleri elde edilmiştir.

Agregalı karışımların görünür birim ağırlık değerleri kontrol numunelerinde $\bar{K}\bar{C}$: 2,36 g/cm³ ve $\bar{K}\bar{A}\bar{C}$: 2,03 g/cm³'tür. Aerjel içermeyen agregalı numunelerde keçi kılı, kenevir ve keten lifi ilavesine göre sırasıyla 2,32; 2,36 ve 2,36 g/cm³ ölçülmüş yine aynı sıralamayla aerjel içeren numunelerin görünür birim ağırlık değerleri 2,32; 2,24 ve 2,19 g/cm³ olarak bulunmuştur.

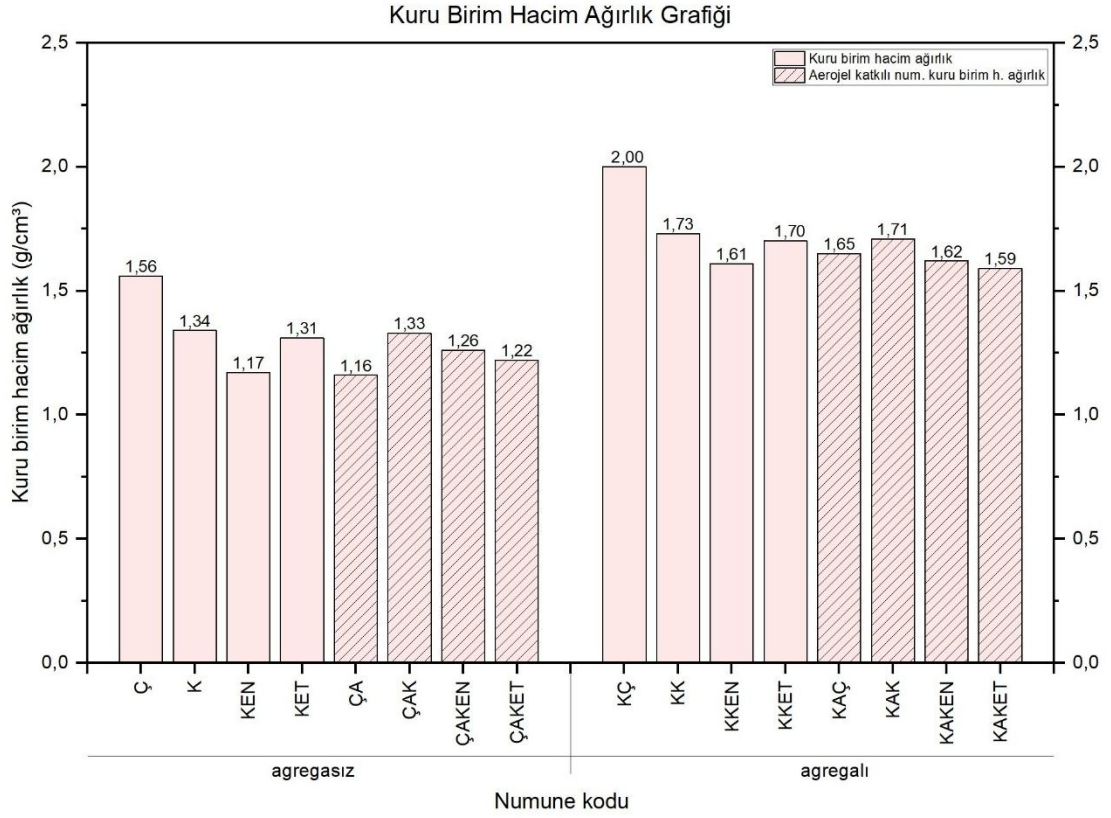
Hazırlanan çimento pastalarının aerjel içermeyen kontrol numunesinde görünür boşluk oranı %32,46 iken sırasıyla keçi kılı, kenevir ve keten lifi ilave edildiğinde bu değer %39,69; 47,92 ve 43,55 ölçülmüştür. Aynı grupta aerjel ilaveli kontrol numunesinde görünür boşluk oranı %36,74 iken sırasıyla keçi kılı, kenevir ve keten lifi katkısıyla %39,12; 42,56 ve 42,04'tür.

Görünür boşluk oranı agregalı numunelerde aerjel içermeyen kontrol numunesinde %15 ve sırasıyla keçi kılı, kenevir ve keten lifi ilavesinde %25,36; 31,92 ve 27,88 olarak ölçülmüştür. Agregalı ve aerjel içeren kontrol numunesinde bu değer %18,25 iken lif ilavesinde sırasıyla %26,24; 27,44 ve 27,56 bulunmuştur.

Kütlece su emme yüzdeleri incelendiğinde: keçi kılı, kenevir ve keten lifi katkılı agregasız ve aerjel içermeyen numunelerde sırasıyla %29,74; 41,11 ve 33,16 değerleri bulunurken kontrol numunesinde bu değer %20,82'dir. Agregasız ve aerjel içeren kontrol numunesinde su emme oranı %31,69 olup keçi kılı ilaveli numunede %29,47; kenevir lifi ilaveli numunede %33,87 ve keten lifi ilaveli numunede %34,50'dir.

Agregalı ve aerjel içermeyen numunelerde keçi kılı, kenevir ve keten lifi ilavesinde su emme oranı sırasıyla %14,66; 19,83 ve 16,88 iken kontrol numunesinde bu değer %7,50 olarak belirlenmiştir. Agregalı ve aerjel içeren kontrol numunesinde su emme oranı %10,99 olup keçi kılı ilaveli numunede %15,32 kenevir lifi ilaveli numunede %16,92 ve keten lifi ilaveli numunede %17,42 olarak bulunmuştur.

Kuru birim hacim ağırlık değerlerinde aerjel eklenmesi hem agregalı hem agregasız numunelerde düşüş sağlarken, agrega eklenmesi ile artış meydana gelmektedir. Keçi kılı, keten ve kenevir liflerinin karışımlara ilave edilmesinin genel olarak düşüşe neden olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 4.1. Numunelere ait kuru birim hacim ağırlık değerleri.

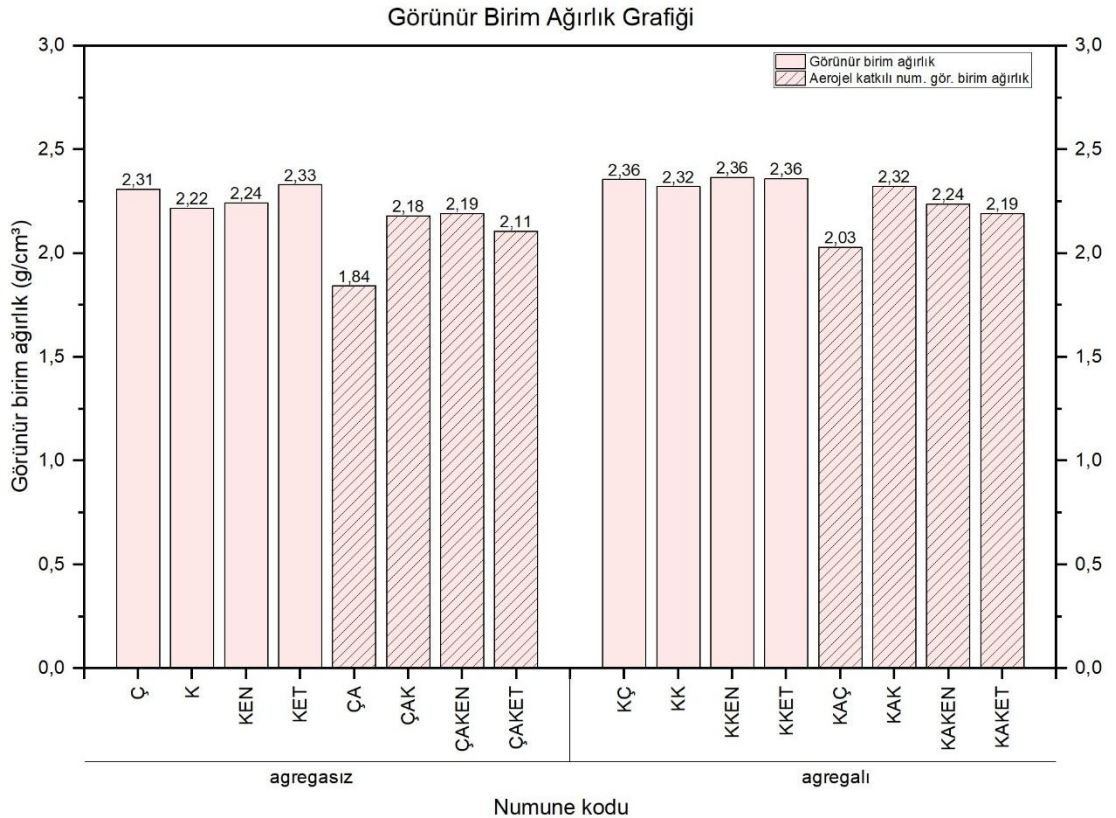
Şekil 4.1 numunelere ait kuru birim hacim ağırlık değerlerini göstermektedir. Agregasız numunelerde sadece çimento içeren kontrol numunesi en yüksek yoğunluğa ($1,56 \text{ g/cm}^3$) sahiptir. Bu karışımlara lif eklenmesiyle kuru birim ağırlık değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Kontrol numunesi baz alındığında eklenen life göre sırasıyla kenevir (%25), keten (%16) ve keçi kılında (%14) düşüş vardır. Özellikle kenevir katkılı çimento ($1,17 \text{ g/cm}^3$) en düşük yoğunluğa sahiptir. Çimentolu karışımlara aerjel eklenmesiyle genel olarak kuru birim hacim ağırlık düşmektedir. İki şahit numune incelendiğinde Ç'ye göre ÇA' nın kuru birim hacim ağırlığında %25 oranında azalma vardır. Agregasız aerjel içeren kontrol numunesine göre lif katkısı ile kuru birim hacim ağırlık değerlerinde yükselme vardır. Bu grupta ÇA' ya göre en fazla artış keçi kılında (%14) olurken en az artış keten lifi (%5) eklenmesiyle olmuştur.

Agrega eklenmesi, karışımların kuru birim hacim ağırlığını artırmaktadır. Örneğin, agrega içermeyen Ç'ye göre, kum çimento karışımı KÇ' de %28 oranında artış görülmektedir. Lif katkılı agregalı karışımlar, KÇ' ye göre daha düşük yoğunluk göstermektedir ve eklenen liflere göre sıralama ise keçi kılı (%14), keten (%15) ve kenevir (%20) şeklindedir. Agregalı karışımlara aerjel eklenmesi kuru birim hacim ağırlık üzerinde hafifletici etkiye sahiptir. Kontrol numunelerinde KÇ' ye göre KAÇ' de %18'lik düşüş vardır. Agregalı ve aerjel katkılı numunelerde KAÇ' ye göre lif eklenmesiyle keçi kılında (%3) artış görülmüş, kenevir (%2) ve keten (%4) de ise düşüş az miktarda olmuştur.

Görünür birim ağırlık değerlerinde agregasız ve aerojel içermeyen kontrol numunesi Ç'ye ($2,31 \text{ g/cm}^3$) göre keçi kılı ($2,22 \text{ g/cm}^3$) ve kenevir ($2,24 \text{ g/cm}^3$) katkıları biraz daha düşük, keten katkılı çimento ise hafif bir artmış görünür birim ağırlık göstermektedir. Genel olarak lif katkılarının bir etkisi olmamıştır. Çimento pastalarına aerojel eklenmesi ile görünür birim ağırlık belirgin bir şekilde azalmaktadır. Kontrol numunelerinde Ç'ye göre ÇA' da %20 oranında bir düşüş olmuştur. Aerojel içermeyen agregasız lif katkılı çimento pastalarına göre aerojel eklenmesi ile azalma görülmüştür. Ancak ÇA' ya göre keçi kılı (%18), kenevir (%18) ve keten (%14) lifi ilavesiyle artma meydana gelmiştir (Şekil 4.2).

Şekil 4.2'de görülebileceği gibi agrega eklenmesi görünür birim ağırlık değerlerini arttırmıştır. agregalı aerojel içermeyen kontrol numunesi KÇ' ye göre lif katkıları önemli bir değişikliğe sebep olmamıştır. Agregalı numunelere aerojel eklenmesi ile azalma olmuş, KÇ' ye göre KAÇ %13 azalırken, lif katkılarında önemli bir değişiklik saptanmamıştır.

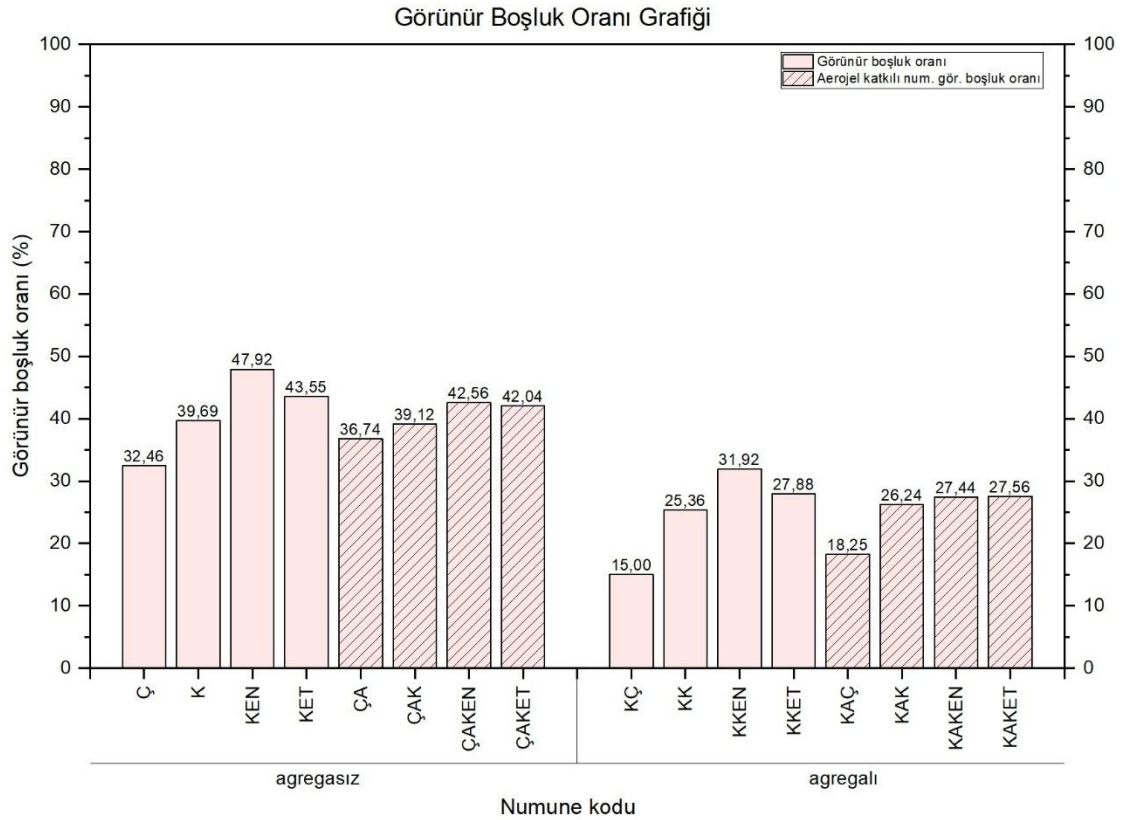
Sonuç olarak tüm numune gruplarında görünür birim ağırlık değerlerine bakıldığında aerojel eklenmesi ile bir düşüş gözlemlenirken lif katkılarının etkisi sınırlı kalmıştır. Hafif yapı malzemesi tasarımı ve ısı yalıtımı için aerojelin etkisi olumlu olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4.2. Numunelere ait görünür birim ağırlık değerleri.

Görünür boşluk oranı değerleri Şekil 4.3’ te gösterilmektedir. Bu değer agregasız ve aerojel içermeyen Ç kontrol numunesinde %32,46 iken lif katkıları ile boşluk oranı artmıştır. Kenevir katkılı çimento karışımı en yüksek görünür boşluk oranına sahiptir ve Ç’ye göre; %15 artmıştır. Bunu %11 artışla keten katkılı KET ve %7 artış ile keçi kılı katkılı K takip etmektedir. Agregasız grupta aerojel eklenmesi ile görünür boşluk oranının artmış olduğu görülmektedir. Ç’ye göre ÇA’ nın görünür boşluk oranı %4 kadar yükselirken, kenevir ve keten katkılı aerojel karışımlarında ÇA’ ya göre artış vardır.

Agregalı grupta kontrol numunesi KÇ %15 görünür boşluk oranına sahiptir ve lif katkıları ile bu oran yükselmiştir. Numuneler arasında KÇ’ ye göre KK %10, KKET %12 ve KKEN %16 daha fazla görünür boşluk oranına sahiptir. Kenevir katkısı ile en yüksek görünür boşluk oranı elde edilmiştir. Agregalı numunelerde aerojel katkısı ile KÇ ve KAÇ arasında %3’lük bir artış görülmüştür. Aerojel eklenmesi, agregalı numunelerde görünür boşluk oranını arttırmış ancak agregasız numune grubuna kıyasla daha az etkili olmuştur.

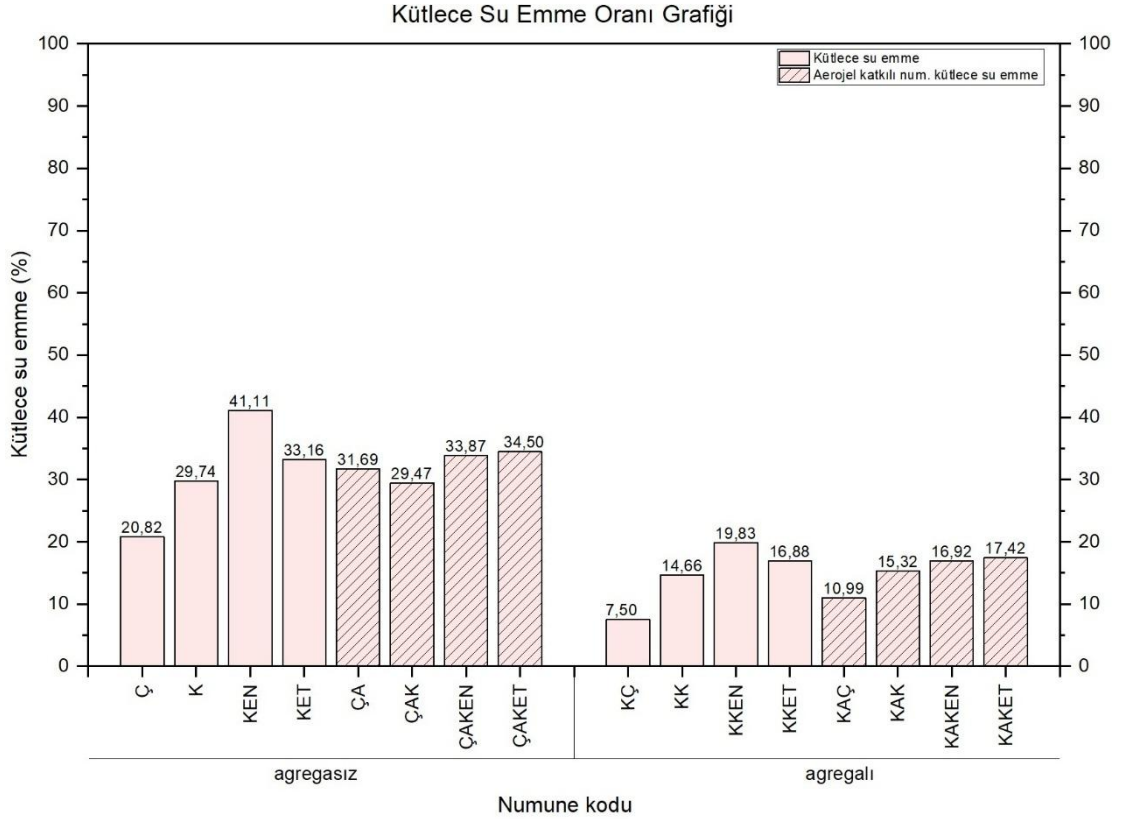


Şekil 4.3. Numunelere ait görünür boşluk oranı.

Görünür boşluk oranını lif katkıları da aerojel de arttırmaktadır. Ancak aerojel eklenmesi lif katkılarının gösterdiği etki kadar büyük değildir. Karışımlarda agrega kullanılması daha düşük gözeneklilik sağlamaktadır. Bu mekanik dayanım için olumlu bir özelliktir ve dayanım gerekli yapı elemanlarında daha çok tercih edilebilir.

bulunmaktadır. Ancak tüm bu değerlendirmelerde görünür boşluk oranının yanında toplam poroziteyle birlikte değerlendirme yapmak gereklidir.

Şekil 4.4’ te numunelere ait kütlece su emme yüzdesi gösterilmektedir. Yüksek su emme oranı, malzemenin daha fazla gözenek içerdiğini ve suya karşı daha duyarlı olduğunu göstermekteyken, düşük su emme oranı, malzemenin daha az gözenekli olduğunu ve suya karşı daha dayanıklı olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 4.4. Numunelere ait kütlece su emme oranı.

Agregasız grupta lif katkıları ile su emme oranı artmıştır. Ç’ ye göre en fazla %20 artış ile kenevir katkı KEN numunesinde izlenirken bunu %12 ile KET ve %9 ile K numunesi izlemektedir. Aerojel eklenmesi ile su emme oranı yükselmiştir. Ç ve ÇA arasında yaklaşık %11’lik bir fark görülmektedir. Agregasız ve aerojel katkı numunelerde kontrol numunesi ÇA’ya göre keten ve kenevirde yükselme, keçi kılı katkı numunede ise düşme görülmüştür. Liflerdeki sıralama ÇAKET (%34,51), ÇAKEN (%33,87) ve ÇAK (%29,47) şeklindedir. Burada keçi kılı katkı numunede toplam porozite düştüğü için su emme de düşmüştür. Buradan hareketle su emme oranlarının toplam poroziteyle birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Lif katkıları agregalı numunelerde de su emme oranını arttırmaktadır. Agregasız ve aerojel katkısız grupta en fazla su emme oranı kenevir ile elde edilmiş ve KÇ’ ye göre

%12'lik bir yükselme görülmüştür. Lif katkılarında bunu %9 artış ile KKET ve %7 ile KK takip etmektedir. Bu grupta aerjel eklenmesi ile su emme oranı artmaktadır. Agregasız, aerjel ve lif katkıları kombinasyonunda KAÇ' ye göre kenevir ve keten liflerinin artışları %7 ile aynı olurken keçi kılı lifleriyle bu artış %5 olarak gözlemlenmiştir.

Özetle lif katkıları su emme oranlarını arttırmaktadır ve en yüksek su emme oranı KEN numunesinde görülmüştür. Bu noktada mekanik dayanım açısından değerlendirilmesi gerekmektedir. Karışımlara aerjel eklenmesi ile de su emme oranları artmaktadır. Agregasız kullanılması ile su emme oranı azalmıştır ve en düşük oran KÇ numunesindedir. Buradan hareketle hafif yapı malzemeleri ve iyi yalıtım için kenevir ve aerjel katkıları önerilebilmekte ancak suya dayanım konusunda ek önlemler alınması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Suya maruziyetin olmadığı ortamlarda kullanımın avantajlı olduğu sonucuna varılmaktadır.

4.2. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Deneyisel çalışmalar kapsamında basınç dayanımı tespiti için üretilen, her karışımdan 6'şar tane olacak şekilde 20x20x20 mm'lik küp numuneler, Akdeniz Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda bulunan cihaz ile test edilmiştir. 28 günlük suda kürlenmiş numunelerden elde edilen deney sonuçları MPa cinsinden Çizelge 4.2' de verilmiştir. Numunelere ait 28 günlük basınç dayanım değerleri, tüm numune gruplarına bakıldığında 39,33 MPa ile 2,81 MPa arasında değişkenlik göstermektedir. En yüksek basınç dayanımı değeri Ç numunesinde ve en düşük basınç dayanımı değeri agregasız ve aerjel içeren keten lifi ilaveli numune olan KAKET numunesinde görülmüştür.

Çizelge 4.2. Numunelere ait basınç dayanımı deney sonuçları.

Numune Kodu		Basınç Dayanımı (MPa)	Numune Kodu		Basınç Dayanımı (MPa)
Agregasız	Ç	39,33 ±2,25	Agregalı	KÇ	35,83 ±2,21
	K	20,11 ±1,62		KK	8,49 ±2,89
	KEN	16,45 ±2,80		KKEN	5,25 ±0,77
	KET	12,70 ±2,65		KKET	3,45 ±0,82
	ÇA	14,77 ±1,18		KAÇ	22,30 ±1,67
	ÇAK	15,62 ±1,36		KAK	5,66 ±0,96
	ÇAKEN	12,96 ±1,44		KAKEN	3,96 ±0,69
	ÇAKET	11,88 ±2,18		KAKET	2,82 ±0,48

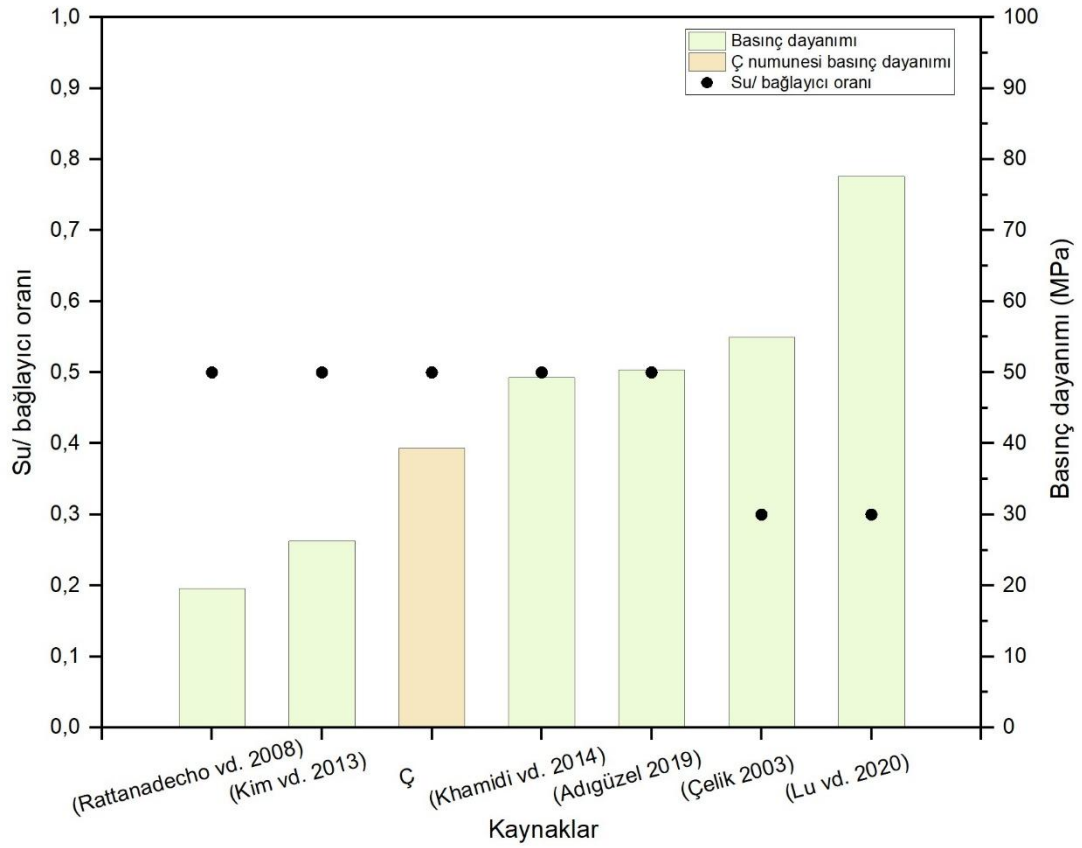
Agregasız ve aerjel içermeyen Ç kontrol numunesinde basınç dayanımı 39,33 MPa iken lif eklenmesiyle birlikte basınç dayanımında düşüş meydana gelmiş; K' da 20,11 MPa, KEN' de 16,45 MPa ve KET' de 12,70 MPa değerleri bulunmuştur. Agregasız ve aerjel içeren ÇA kontrol numunesinde basınç dayanımı 14,77 MPa iken keçi kılı eklenen ÇAK numunesinde 15,62 MPa, ÇAKEN' de 12,96 MPa ve ÇAKET' de

11,88 MPa değerleri ölçülmüştür.

Agregalı ve aerjel içermeyen kontrol numunesi KÇ numunesinde basınç dayanımı 35,83 MPa olup lif eklemesiyle KK' da 8,49 MPa, KKEN' de 5,25 MPa ve KKET' de 3,45 MPa değerleri tespit edilmiştir.

Agregalı ve aerjel içeren kontrol numunesi KAÇ' de basınç dayanımı 22,30 MPa iken lif eklenmesiyle KAK' da 5,66 MPa, KAKEN' de 3,96 MPa ve KAKET' de 2,82 MPa değerlerine ulaşılmıştır.

Çalışmada Ç kontrol numunesinin kıyaslanabileceği, çimento ve sudan oluşan çimento pastalarının sertleşmiş haldeki deneylere tabi tutulduğu ve basınç dayanımlarının verildiği literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Çalışmalarda su bağlayıcı oranına göre elde edilen basınç dayanım değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.5). Rattanadecho vd. (2008) çimento pastasının hızlandırılmış kürlleme yöntemiyle basınç dayanımını inceledikleri çalışmalarında hazırladıkları su/bağlayıcı oranı 0,5 olan numunelerinde 28 günlük basınç dayanımını 19,10 MPa olarak tespit etmişlerdir (Rattanadecho vd. 2008). Bir başka çalışmada 40x40x160 mm kalıplara dökülmüş, su/bağlayıcı oranı 0,5 olan karışımların 28 günlük basınç dayanım değeri 26,30 MPa ölçülmüştür (Kim vd. 2013). Aynı oranlarda ve kalıp boyutunda yapılmış bir başka numunede 50,40 MPa değeri bulunmuştur (Adıgüzel 2019). Çelik (2003) tarafından yer fıstığı kabuğunun hafif agrega olarak yapı ürünlerinde kullanılmasının araştırıldığı çalışmasında CEM 52,5 türü çimento kullanarak, su/bağlayıcı oranı 0,3 ve kalıp olarak 40x40x160 mm olarak hazırladığı kontrol numunesinde kuru birim hacim ağırlık 1900 kg/m³ ve basınç dayanımı 55,00 MPa' dır (Çelik 2003). Bu bağlamda bu çalışmada elde edilen Ç numunesine ait 39,33 MPa basınç dayanım değeri uyumludur. Mevcut çalışmalarda çıkan farklı sonuçların, kullanılan çimento türü, farklı su/bağlayıcı oranları, farklı kürlleme koşulları ve kalıp boyutlarıyla ilişkilendirilmektedir.

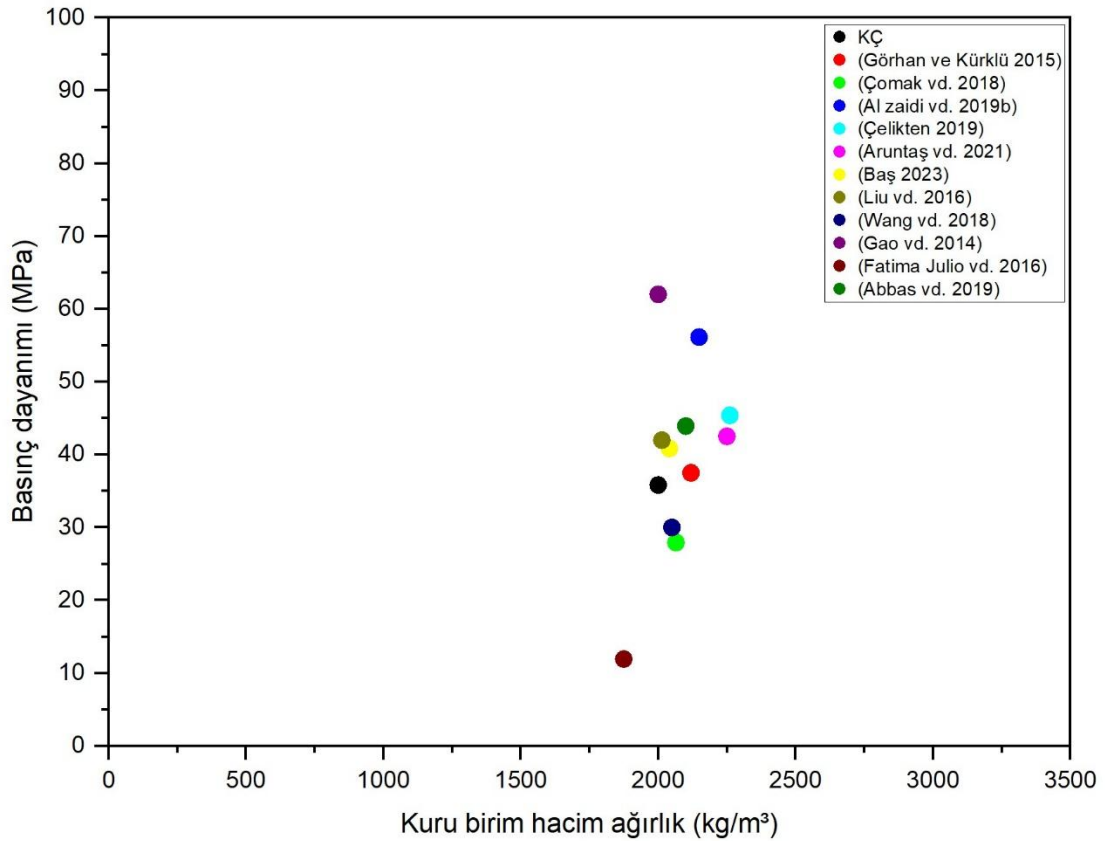


Şekil 4.5. Ç numunesine ait literatürdeki su/bağlayıcı oranı ve basınç dayanımı ilişkisi.

TS EN 196 standardındaki karışım miktarlarına göre üretilmiş KÇ numunesi ve literatürde yer alan çalışmalar incelenmiştir. Şekil 4.6' da mevcut çalışmalarda elde edilen kuru birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı değerinin ilişkisi gösterilmiştir.

Farklı dayanım sınıfına sahip çimento harçlarında metakaolin katkısının fiziksel ve mekanik özellikler üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmada CEM1 42,5 sınıfı çimento ile üretilmiş referans numunesi değerlerine bakıldığında, kuru birim hacim ağırlık 2119 kg/m³, 28 günlük basınç dayanım değeri 37,50 MPa ve kütlece su emme oranı %9 olarak tespit edilmiştir (Görhan ve Kürklü 2015). Çimento esaslı harçlarda kenevir lifi kullanımının etkilerini inceleyen çalışmada üretilen, KÇ numunesi ile aynı karışım oranlarına ve malzemelere sahip referans numunesinde 2065 kg/m³ kuru birim hacim ağırlık ve 28 günlük 27,94 MPa basınç dayanımı ve %5,8 kütlece su emme oranı elde edilmiştir (Çomak vd. 2018). Çelikten (2019) alkali ile aktive edilmiş harç karışımlarında yüksek fırın cürufu ve uçucu külü CEM 1 42,5R tipi çimentoyla birlikte bağlayıcı olarak kullandığı araştırmasında; TS EN 196' ya göre ürettiği, KÇ numunesi ile aynı malzeme ve oranlara sahip, kontrol numunesinde 2261 kg/m³ kuru birim hacim ağırlık ve 45,40 MPa basınç dayanımı elde etmiştir (Çelikten 2019). Benzer şekilde üretilmiş kontrol numunesine sahip, çimento hamur ve harçlarında sönmüş kirecin etkisinin araştırıldığı bir çalışmada kuru birim hacim ağırlık 2250 kg/m³ iken basınç dayanımı 42,50 MPa' dır (Aruntaş vd. 2021). Yapılan başka bir çalışmada kuru birim hacim ağırlık 2041 kg/m³ ve basınç dayanımı 40,83 MPa olarak tespit edilmiştir (Baş

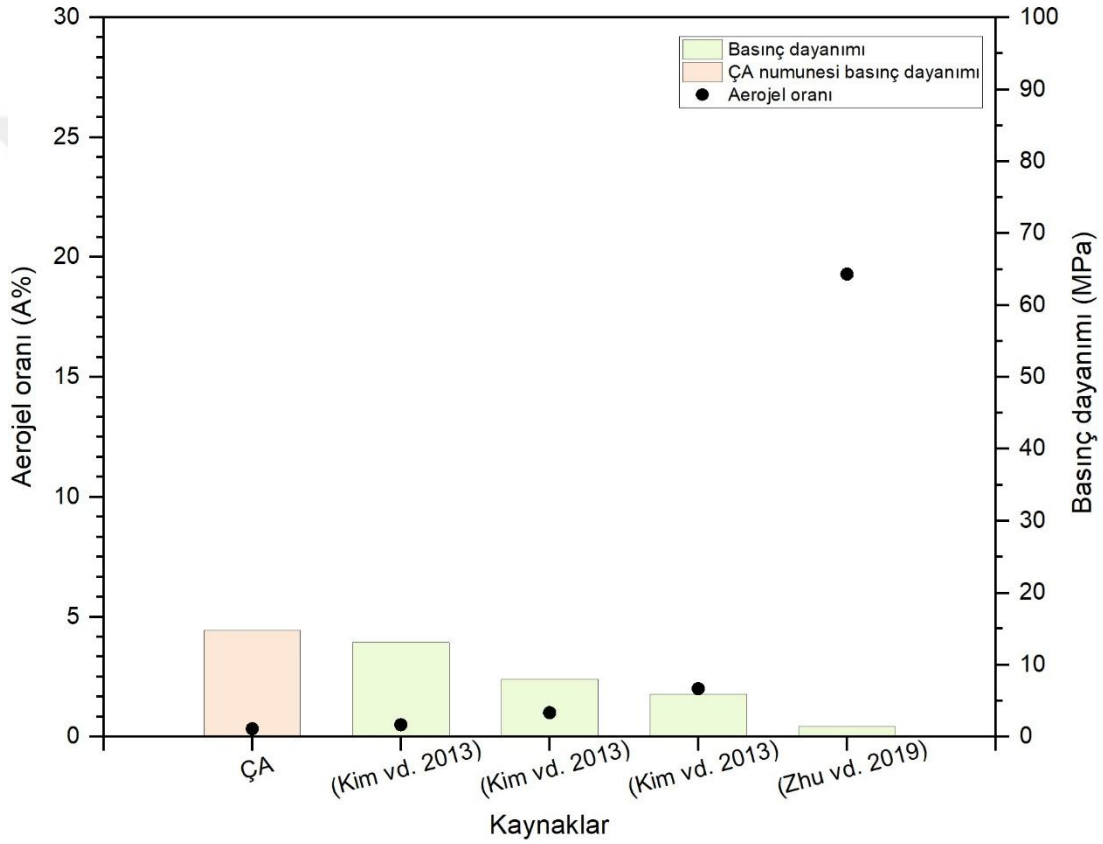
2023). Aghabaglou ve İlhan (2017) tarafından hazırlanan çalışmada, CEMI 42.5 R tipi çimento ve CEN standard kumunu agrega olarak kullandıkları karışımlarında kuruma büzülme engelleyici katkının etkilerini incelemişlerdir. Katkı içermeyen referans numunesinde basınç dayanımı 45,00 MPa olarak bulunmuştur Aghabaglou ve İlhan (2017). Kara (2020) nano SiO₂'in çimento harçlarına olan mekanik etkisini incelediği çalışmada bahsedilen tüm çalışmalarda olduğu gibi üretilmiş numune tipinde 38,19 MPa basınç dayanımı değeri elde etmiştir (Kara 2020). Al Zaidi vd (2019b) hafif ve ısı yalıtımlı beton üretmek amacıyla SiO₂ ve silika aerogel katkıları kullandıkları çalışmalarında çimento harç referans numunesinde CEMI 42.5 R tipi çimento, CEN standart kumu kullanmış ancak diğer çalışmalardan farklı olarak su/çimento oranını 0,4 olarak kullanmıştır. Çalışmanın sonucunda ise kuru birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı değerleri sırasıyla; 2149 kg/m³ ve 56,14 MPa olarak belirtilmiştir (Al Zaidi vd. 2019b). Bu bağlamda KÇ numunesinde elde edilen değerler literatür verileriyle örtüşmektedir. Aynı malzemeler ve aynı karışım oranları kullanımında elde edilen farklılarda kalıp boyutları, kürleme koşulları ve kullanılan cihazların ölçüm parametreleri ile yorumlanabilmektedir.



Şekil 4.6. KÇ numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisi.

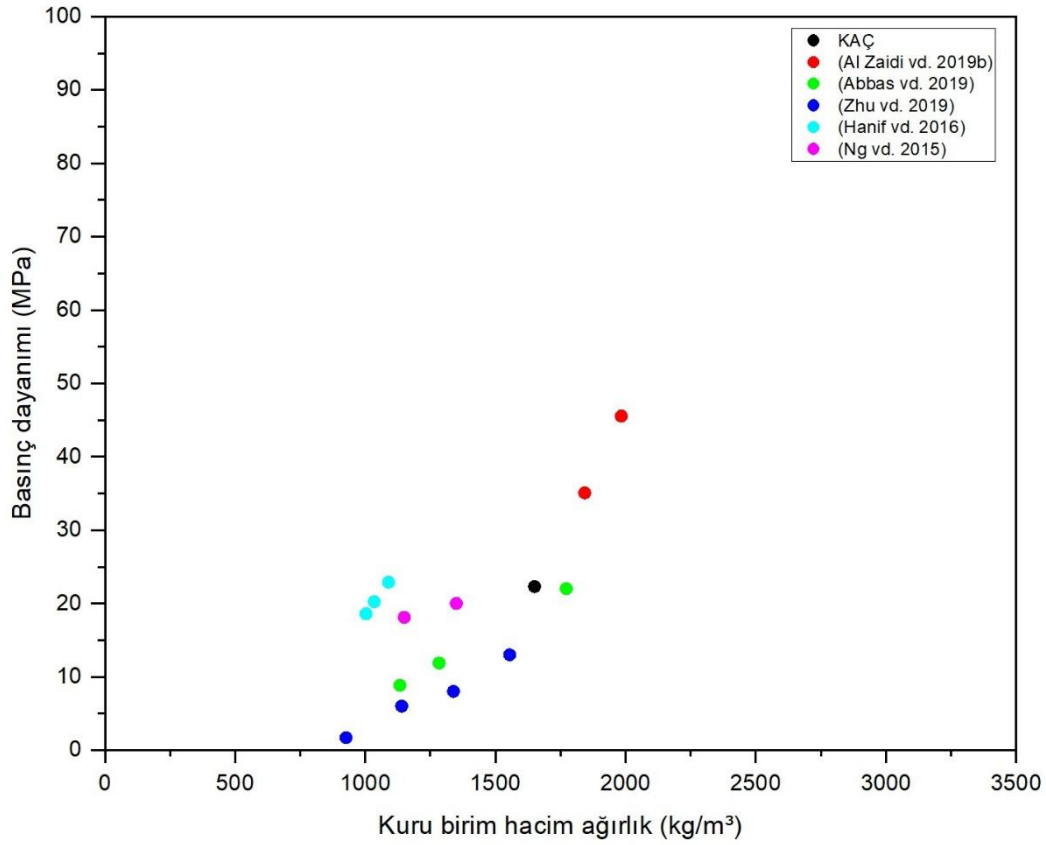
Çimento pastasına aerogel eklenmesiyle yapılmış çalışmalara bakıldığında, ÇA kontrol numunesi ile benzerlik gösteren en yakın çalışma Kim vd. (2013) tarafından hazırlanan su/çimento oranının 0,5 olarak kullanıldığı ve aerogel/ bağlayıcı oranının %0,5-1 ve 2 olduğu araştırmadır. Bu çalışmada aerogel oranı arttıkça basınç dayanımı

beklenildiği şekilde düşmektedir. ÇA numunesindeki ağırlıkça aerogel oranı en yakın olan 0,5 içerik oranı ile üretilmiş numunede basınç dayanımı 13,10 MPa olarak bulunmuştur (Kim vd. 2013). Bir başka çalışmada çimento ve silis dumanı içeren bağlayıcıya toplam hacmin %67'si olacak şekilde aerogel eklendiğinde kuru birim hacim ağırlık 737 kg/m³ ve basınç dayanımı 1,40 MPa tespit edilmiştir (Zhu vd. 2019). Agrega içermeyen çimento esaslı aerogel katkılı harç karışımında toplam hacmin %60'ının aerogel olduğu numunede kuru birim hacim ağırlık 1659 kg/m³ ve basınç dayanımı 27,11 MPa olarak ölçülmüştür (Al Zaidi vd. 2019b). Buradan hareketle karışımlardaki, aerogelin çok hafif ve gözenekli yapısından kaynaklı olarak, numunelerde poroziteyi arttırdığı dolayısıyla karışımlardaki aerogel oranının basınç dayanımı üzerinde önemli ölçüde etkisi olduğu söylenebilmektedir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. ÇA numunesine ait literatürdeki aerogel oranı ve basınç dayanımı ilişkisi.

KAÇ numunesinden elde edilen verilerin literatürdeki veriler ile karşılaştırmasında, Abbas vd. (2019) tarafından yapılan çalışma incelenmiştir. Bu çalışmada kuru birim ağırlık 1772 kg/m³ ve basınç dayanımı 22,00 MPa olup KAÇ numunesi ile benzerlik göstermektedir. Zhu vd. (2019) ve Al Zaidi vd. (2019b) tarafından yapılan çalışmalarda kullanılan aerogel oranı ile bağlantılı olarak kuru birim hacim ağırlık değerleri düşmekte ve bu bağlamda basınç dayanım değerleri de azalmaktadır (Şekil 4.8).



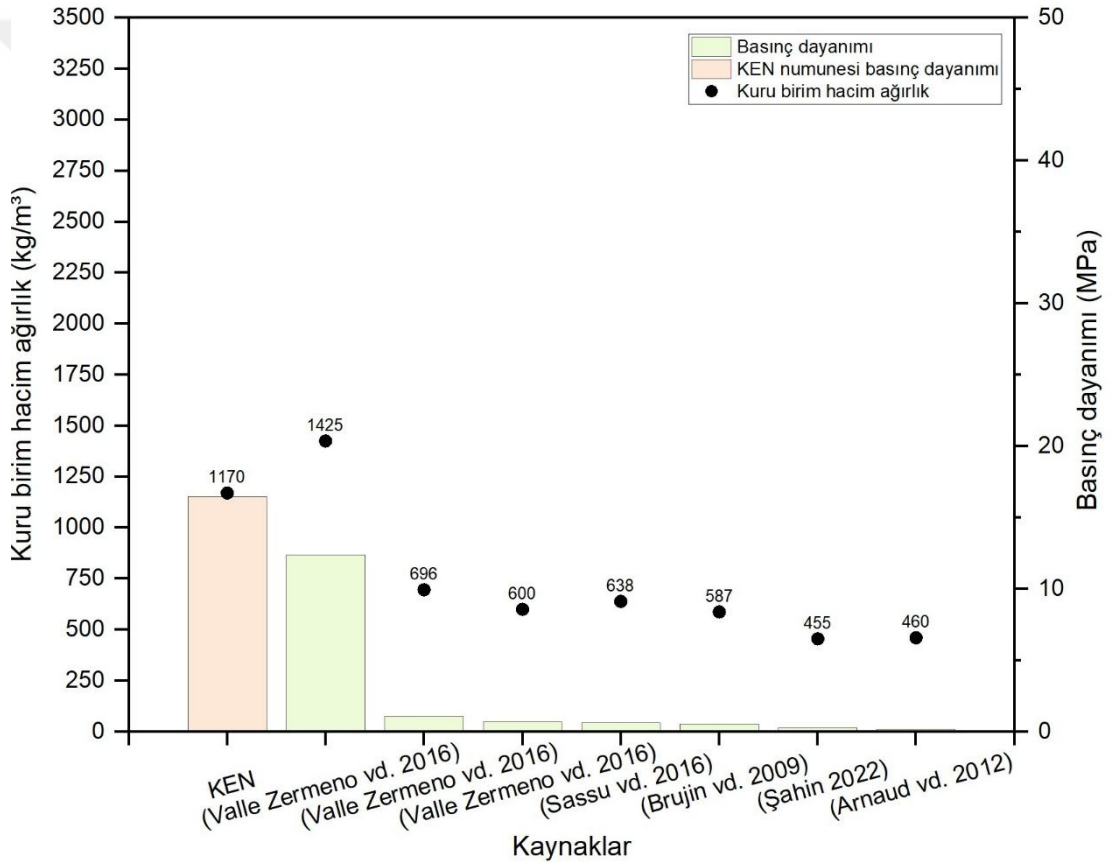
Şekil 4.8. KAÇ numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisi.

Çalışma kapsamında çimento matrislerine eklenen liflerden keçi kılı ile ilgili literatürde yapılmış deneysel çalışmalar bulunamadığından basınç dayanımı ilişkisini inceleyen bir kıyaslama yapılamamıştır.

Çimento esaslı harçlara kenevir ilavesi ile oluşturulmuş literatür çalışmalarına bakıldığında, bağlayıcı olarak sadece çimentonun kullanıldığı az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Genel olarak kenevirle birlikte kullanılan bağlayıcılarda kireç kullanımı söz konusudur. Agregasız çalışmalarda gözlemlenen kuru birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı verileri Şekil 4.9’da gösterilmektedir. Çimento dışında farklı farklı bağlayıcıların karışımlara katılmasıyla birlikte kuru birim hacim ağırlıkta ve basınç dayanımında önemli ölçüde düşüşler olmaktadır.

Valle Zermano vd. (2016) magnezyum fosfat çimentosunu bağlayıcı olarak kullandıkları ve toplam katı ağırlığının %8-12-16 ve 20’si kenevir olan deneysel bir araştırma yapmışlardır (Valle Zermano vd. 2016). Numunelerdeki kenevir oranı arttıkça basınç dayanımı düşmektedir. Kenevir içeriği %8 olan karışımlarda 12,40MPa basınç dayanımı ve 1425 kg/m³ kuru birim hacim ağırlık tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen KEN numunesinde 16,45 MPa basınç dayanımı ve 1170 kg/m³ kuru birim hacim ağırlık ölçülmüştür. Bu bağlamda iki çalışma arasında gözlenen fark bağlayıcı tipi ve kenevirin morfolojik yapısı ile ilişkilendirilmektedir. Bağlayıcı olarak magnezyum fosfat

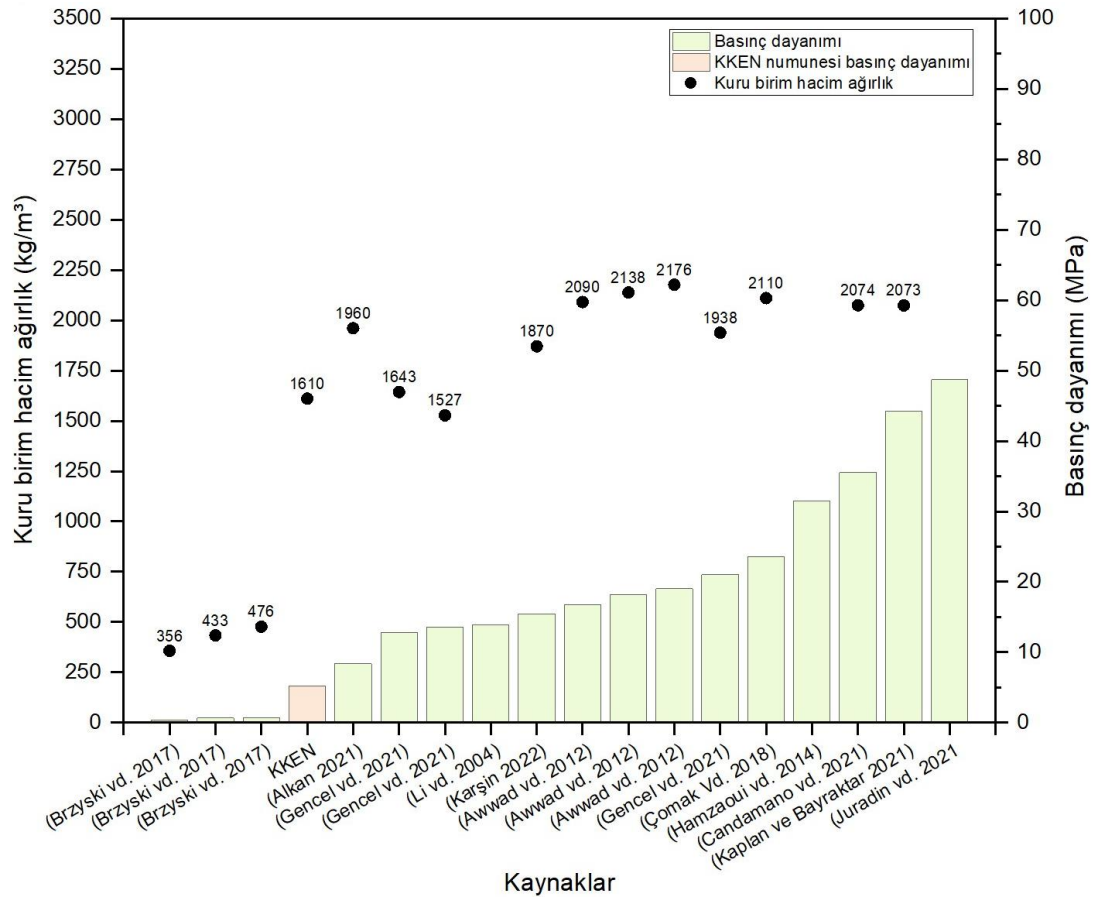
içeren çimento yüksek erken dayanım gösteren bir bağlayıcı iken CEMI 42,5 türü çimento uzun vadede daha yüksek dayanım sağlamaktadır. KEN numunesinde kenevir lif olarak kullanılırken diğer çalışmada parçacık formu kullanılmış bu da kenevir lifinin çatlak kontrolü sağlayarak dayanımı arttırdığı bu bağlamda da lif şeklinin yoğunluk düşük olsa da yapısal katkı sağlaması ile açıklanmaktadır. Şahin (2022) tarafından yapılan çalışmada bağlayıcı türü aynı olmasına rağmen KEN numunesine göre yüksek oranda (kenevir/bağlayıcı 0,5) kenevir ve su kullanıldığı bu bağlamda da 455 kg/m^3 kuru birim hacim ağırlık ve $0,28 \text{ MPa}$ gibi oldukça düşük dayanım değeri elde edildiği görülmüştür. Benzer şekilde ağırlıkça çimentonun yaklaşık %52'si oranında kenevir eklendiği çalışmada 638 kg/m^3 ve $0,62 \text{ MPa}$ gibi düşük basınç dayanımı verilerine ulaşılmıştır (Sassu vd. 2016). Brujin vd. (2009) yaptıkları hacimce kenevir/çimento oranı 3 olan yüksek kenevir içerikli numune karışımında $0,55 \text{ MPa}$ basınç dayanımı elde etmişlerdir (Brujin vd. 2009). Arnaud ve Gourlay (2012) hidrolik kireç kullandıkları çalışmalarında 460 kg/m^3 kuru birim hacim ağırlık ve $0,18 \text{ MPa}$ basınç dayanımı değerine ulaşılmıştır (Arnaud ve Gourlay. 2012).



Şekil 4.9. KEN numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisi.

KKEN numunesinin literatür verileri ile karşılaştırılması Şekil 4.10' da verilmiştir. Çimento esaslı agregalı ve kenevir lifi içeren karışımların incelendiği araştırmalar değerlendirildiğinde karışım içeriği olarak en benzer özelliği Alkan (2021) tarafından yapılmış çalışmada rastlanmıştır. Çimento, kum ve kenevir tozundan oluşan karışımında çimento ağırlığının %5'i kadar kenevir tozu kullanılan karışımında kuru birim

ağırlık 1960 kg/m^3 ve basınç dayanımı $8,4 \text{ MPa}$ 'dır (Alkan 2021). KKEN numunesinde ise kenendir lifi içeriğı ağırlıkça çimentonun %15'i ilave olduğundan kuru birim hacim ağırlık düşmüş ve beraberinde beklenildiğı gibi basınç dayanımı da düşmüştür. Juradin vd. (2021) yaptıkları çalışmasında en yüksek basınç dayanımı tespit edilmiş ancak çalışmada kuru birim hacim ağırlık değeri verilmemiştir. TS EN 196 standardındaki karışım miktarına toplam hacmin %1'i kadar düşük oranda kenendir lifi eklendiğinden basınç dayanım değerin KKEN numunesine göre yüksek olduğu düşünülmektedir. Literatürdeki veriler arasında kuru birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı arasında doğrusal bir oran görülememesi ise; kullanılan bağlayıcı türü, kullanılan agregaların farklı olması, kenendir liflerindeki boyutsal farklılıklar ve oranlar, kullanılan materyal ve farklı karışım oranları gibi sebeplerden kaynaklanmaktadır.

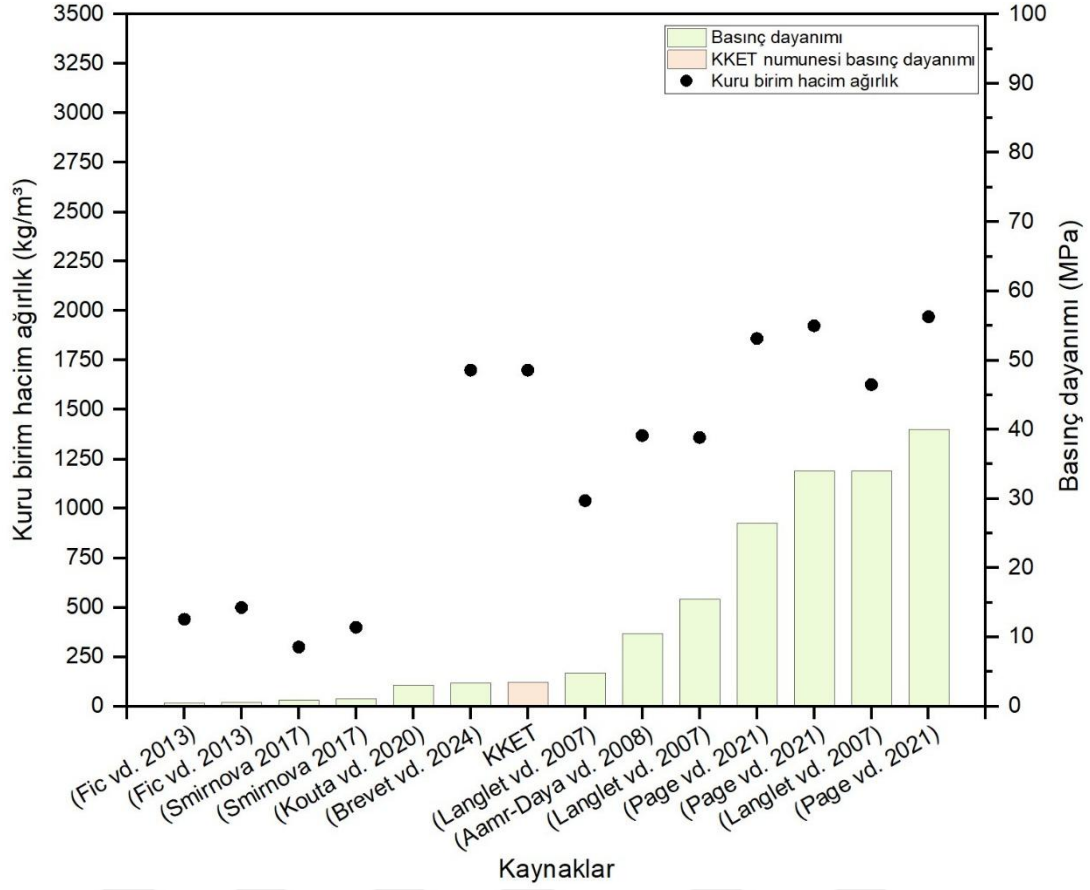


Şekil 4.10. KKEN numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisi.

Çalışma kapsamında bağlayıcı olarak çimento kullanılan ve keten takviyeli karışımlar tarandığında, keten oranının KET numunesine göre çok daha yüksek oranda kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Mohammadawi vd. (2016) CEMI 52,5 tipi çimentoyu bağlayıcı seçtikleri çalışmalarında su/çimento oranını 0,5 ve keten/çimento oranını 4 olarak belirlemişlerdir. Yüksek keten içeriğı ile kuru birim hacim ağırlık (520 kg/m^3) ve basınç dayanımı ($0,102 \text{ MPa}$) çok düşük değere sahiptir (Mohammadawi vd. 2016).

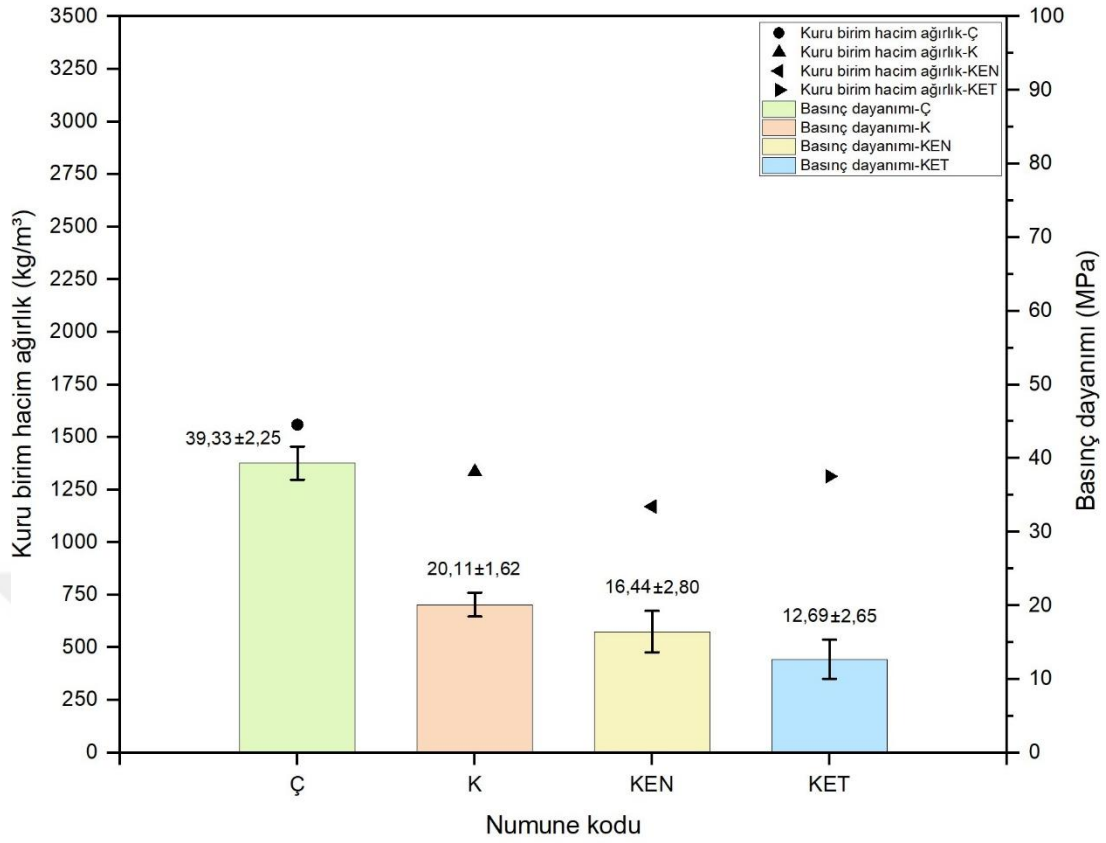
Benzer şekilde yapılmış bir diğer çalışmada su/çimento oranı 0,75 ve keten/çimento oranı 4'tür (Khazma vd. 2012). Bu bağlamda KET numunesinde çimento hacminin %30'u oranında keten lifi ilavesi yapılmış olması kaynaklı hem kuru birim hacim ağırlık (1310 kg/m^3) hem de basınç dayanımının ($12,7 \text{ MPa}$) çok daha yüksek çıkması beklenen bir durumdur.

KKET numunesinin literatür verileriyle birlikte değerlendirilmesi aşamasında, agregalı keten takviyeli çimento bazlı hazırlanan karışımlar incelenmiştir (Şekil 4.11). Çalışmalardaki veriler ışığında kuru birim hacim ağırlık ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri karşılaştırıldığında KKET numunesi ile benzer verilerin alındığı çalışmalar mevcuttur. Brevet vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada bağlayıcı olarak çimento, agrega olarak kum ve keten tohumu atığı (çimento ağırlığının %0,75'i) kullanılmış, 1700 kg/m^3 kuru birim hacim ağırlık ve $3,33 \text{ MPa}$ basınç dayanımı ölçülmüştür (Brevet vd. 2024). Kouta vd. (2020) kil, çimento, kireç, kum ve keten lifi kullandıkları karışımlarında toplam kütlenin %0,6' sını keten lifi olacak şekilde hazırladıkları karışımlarında $3,1 \text{ MPa}$ basınç dayanımı ölçmüşlerdir (Kouta vd. 2020). Langlet vd. (2007) yaptıkları deneysel çalışmada çimento, kum ve su (1:3:0,5) ile hazırladıkları karışımlarında çimentodan %5-10-20 oranlarında keten ikame etmişlerdir. Kullanılan keten lifi oranı arttıkça beklenildiği şekilde basınç dayanımı düşmüştür (Langlet vd. 2007). Çimento, kum ve su (1:3:0,5) kullanılarak hazırlanan bir başka çalışmada bağlayıcı ağırlığının %10'u kadar keten atıkları ilave edilen karışımlarda kuru birim hacim ağırlık 985 kg/m^3 iken basınç dayanımı $10,5 \text{ MPa}$ ' dır (Aamr-Daya vd. 2008). Page vd. (2021a) yaptıkları çalışmalarında su ile çimento oranı 0,5 ve bağlayıcı kum oranı ise 1 olacak şekilde hazırladıkları karışıma karışım hacminin %3 keten lifi takviye etmişler, sonucunda ise 1860 kg/m^3 kuru birim hacim ağırlık ve $26,5 \text{ MPa}$ basınç dayanımı verisine ulaşmışlardır.



Şekil 4.11. KKET numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisi.

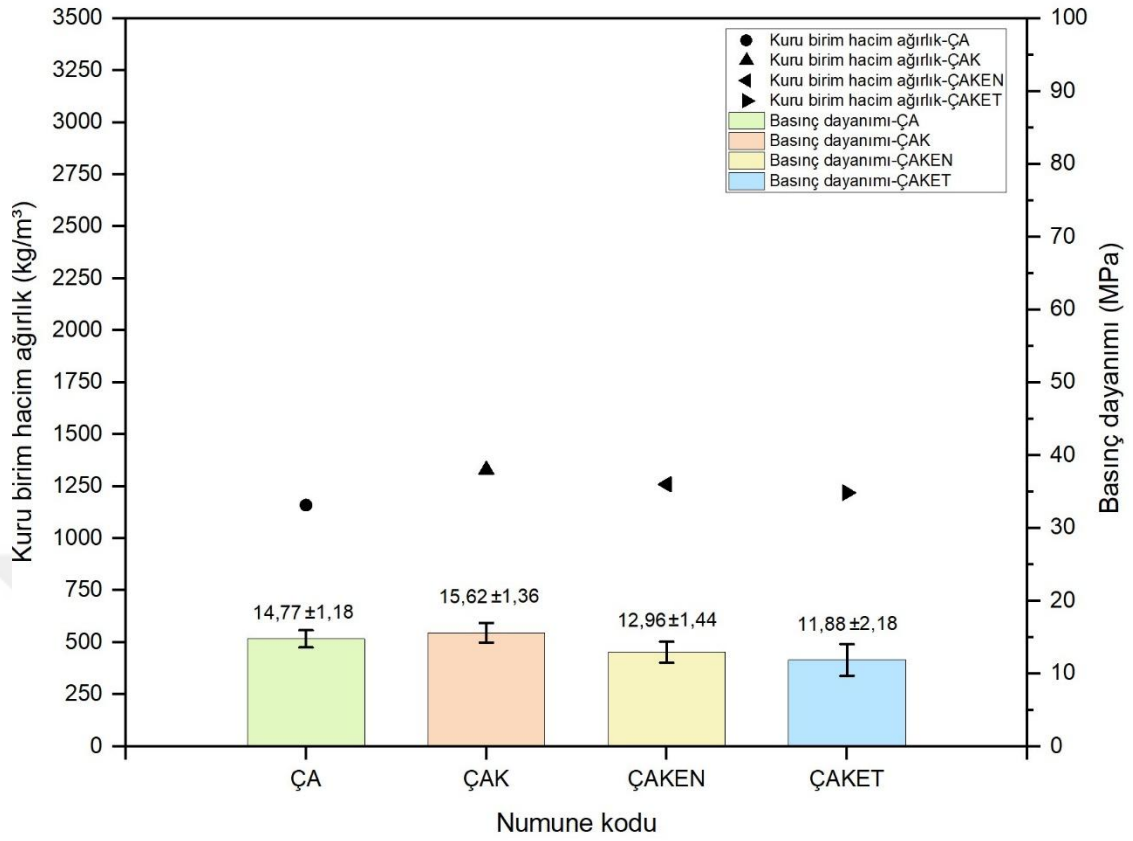
Çalışma kapsamında agregasız ve aerjel ilavesiz grupta elde edilen kuru birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisini gösteren grafik Şekil 4.12’ de gösterilmektedir.



Şekil 4.12. Agregasız ve aerojel ilavesiz grup numunelerine ait kuru birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisi.

Ç kontrol numunesine göre liflerin eklenmesiyle hem kuru birim hacim ağırlık hem de basınç dayanımı düşmüştür. Kontrol numunesine göre basınç dayanımında %48’lik oran ile en az düşüş K numunesinde gözlenmiş bunu %58 ile KEN, %67 ile KET numunesi takip etmiştir. Keçi kılına göre kullanılan bitkisel lifler daha yüksek su emme kapasitesine sahiptir, daha boşluklu ve daha hafif ürünler ortaya çıkmıştır. Bu grupta kenevir lifi ve keten lifi takviyeli karışımlarda kuru birim hacim ağırlık (%9) ve basınç dayanımı (%9) arasında çok belirgin bir fark gözlenmemiştir. KEN numunesi daha hafif ve gözenekli, KET ise biraz daha yoğun olmasına rağmen az daha düşük basınç dayanımına sahiptir. Burada keten lifi katkısının çimento matrisinde daha zayıf etkileşimde olduğu ve tam olarak homojen lif dağılımı yapılamaması sonucunda oluşabileceği düşünülmektedir.

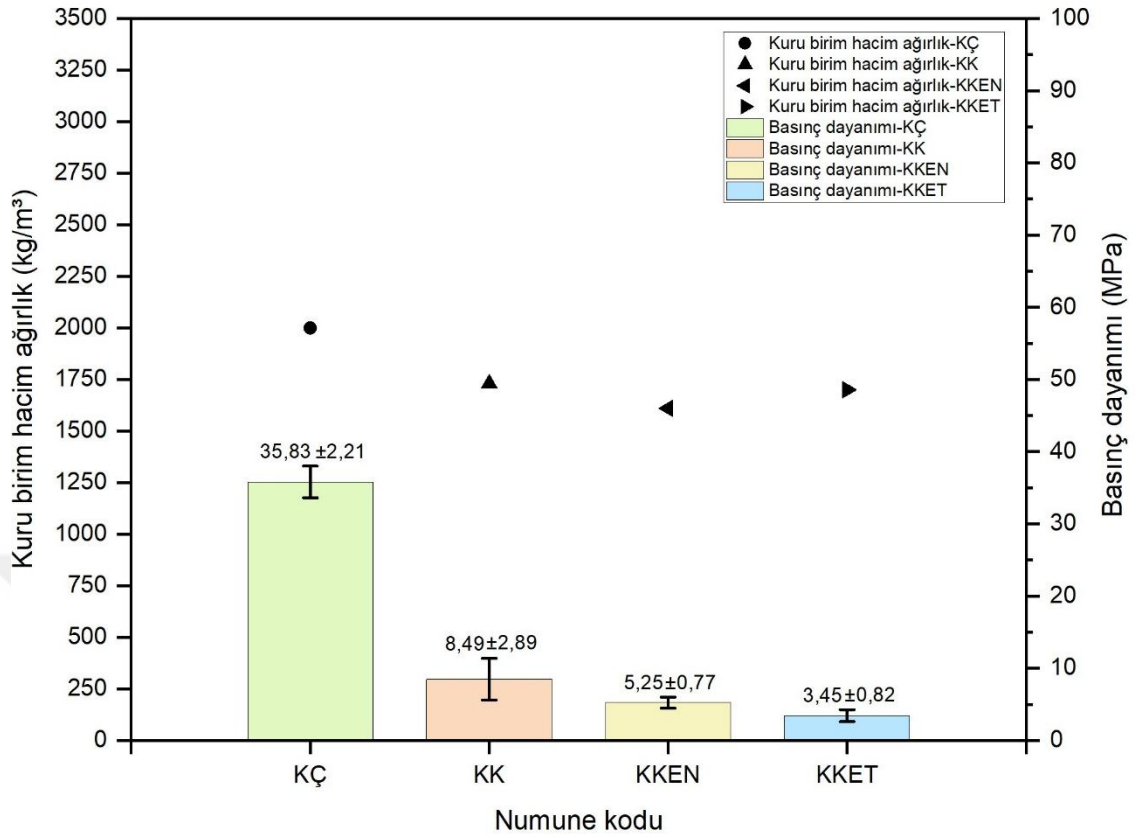
Agregasız ve aerojel ilaveli grupta elde edilen kuru birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisini gösteren grafik Şekil 4.13’ de gösterilmektedir.



Şekil 4.13. Agregasız ve aerjel ilaveli grup numunelerine ait birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisi.

ÇA kontrol numunesine göre liflerin eklenmesiyle kuru birim ağırlık ve basınç dayanımı arasında önemli ölçüde değişiklik olmamış yakın değerler tespit edilmiştir. Kontrol numunesine göre ÇAK' de dayanımda %5'lik bir artış görülmüştür. Keçi kılının aerjelin oluşturduğu boşluklu yapıyı kısmen telafi ettiği sonucuna varılmıştır. Kenevir ve keten liflerinin ise kontrol numunesine göre boşluk oranını arttırdığı için basınç dayanımında az miktarda düşüşe sebep olmuş ancak önemli bir etki yaratmamıştır.

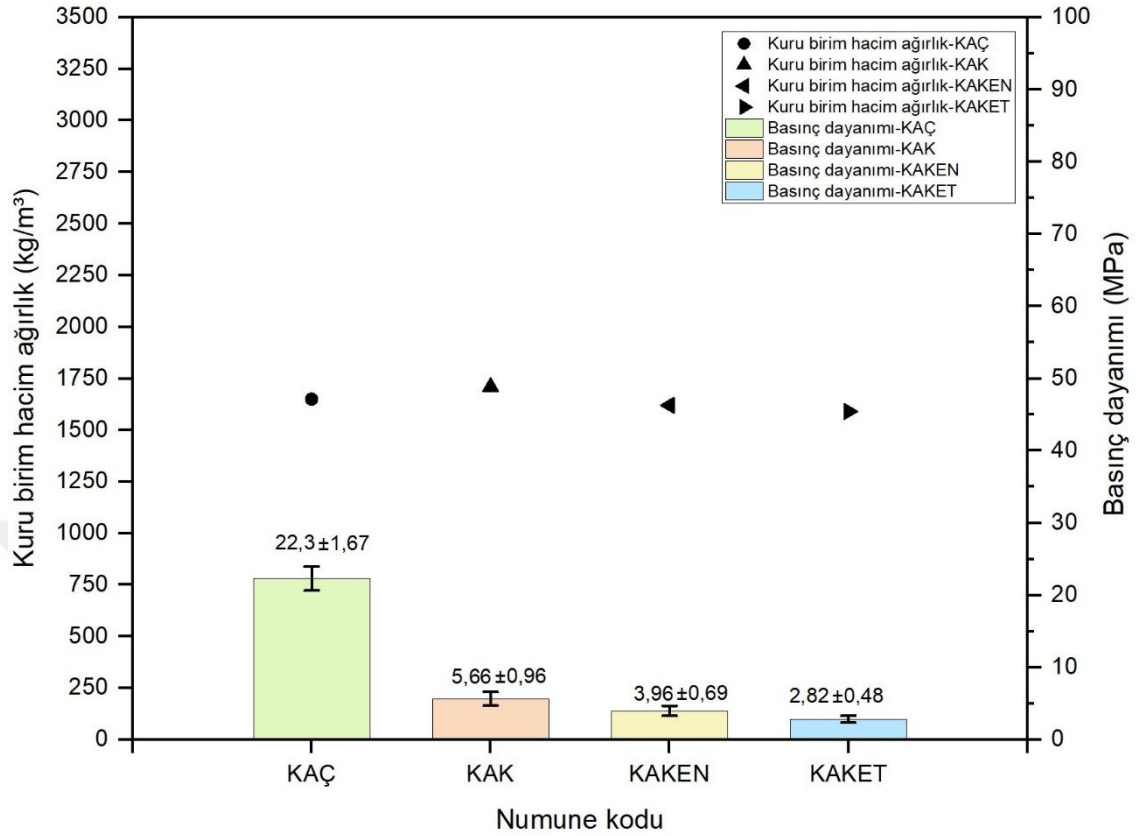
Agregalı ve aerjel ilavesiz grupta elde edilen kuru birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisini gösteren grafik Şekil 4.14' te gösterilmektedir.



Şekil 4.14. Agregalı ve aerojel ilavesiz grup numunelerine ait birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisi.

Bu grupta beklenildiği şekilde kontrol numunesi KÇ' de en yüksek kuru birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı değerleri görülmüştür. Kuru birim hacim ağırlık tıpkı agregasız ve aerojelsiz grupta olduğu gibi en az (%13) keçi kılı ilaveli numunede sonra (%15) keten lifi ilaveli numunede ve (%19) kenevir lifi ilaveli numunede ölçülmüştür. Basınç dayanımında KÇ' ye göre çok yüksek oranda düşüş meydana gelmiştir. KK numunesinde %76'lık düşüşle 8,49 MPa, KKEN' de %85' lik düşüşle 5,25 MPa ve KKET' de %90' lık düşüşle 3,45 MPa basınç dayanımı tespit edilmiştir. Burada liflerin gözenekliliği arttırdığı ve su emme oranını arttırdığı için basınç dayanımında önemli düşüşlere sebep olduğu söylenebilmektedir. Bu grupta KEN ve KET' de olduğu gibi KKEN daha hafif ve gözenekli, KKET ise biraz daha yoğun olmasına rağmen daha düşük basınç dayanımına sahiptir. Burada keten lifi katkısının çimento matrisinde daha zayıf etkileşimde olduğu ve tam olarak homojen lif dağılımı yapılamaması sonucunda oluşabileceği varsayılmaktadır.

Agregalı ve aerojel ilaveli grupta elde edilen kuru birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisini gösteren grafik Şekil 4.15' te gösterilmektedir.



Şekil 4.15. Agregalı ve aerjel ilaveli grup numunelerine ait birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı ilişkisi.

Kontrol numunesi olan KAÇ, 1650 kg/m³ kuru birim ağırlığa, %35,78 toplam poroziteye ve 22,30 MPa'lık basınç dayanımına sahiptir. Lif katkısı ile birlikte dayanımda önemli düşüşler olmuştur. Keçi kılı katkısı, kuru birim ağırlığı artırarak (1710 kg/m³) ve poroziteyi azaltarak (%32,27), teorik olarak daha sıkı bir yapı oluşturmuş olsa da basınç dayanımı 5,66 MPa'ya kadar düşmüştür. Bu durum, keçi kılının lifsel yapısı nedeniyle çatlak kontrolüne katkı sağlasa da aerjelin gözenekli yapısı içinde etkili bir bağ kuramadığını ve matris bütünlüğünü olumsuz etkilediğini göstermektedir. Kenevir katkısı, 1620 kg/m³ kuru birim ağırlık ile keçi kılına kıyasla az daha düşük yoğunlukta ve daha gözenekli bir yapı oluşturmuştur. Ancak basınç dayanımı daha da düşerek 3,96 MPa seviyesini göstermektedir. Kenevir liflerinin yapısal olarak çok su emmesi aerjel katkısıyla birlikte basınç dayanımını azaltmıştır. Keten lifi katkılı numune ise 1590 kg/m³ ile en düşük kuru birim ağırlık değerini vermiştir. Bu bağlamda da grubunda en düşük basınç dayanımı olan 2,82 MPa değerini vermiştir. Keten liflerinin çimento matrisiyle olan bağ kurma yeteneğinin zayıf olması, gözenekliliği artırarak mekanik dayanımı olumsuz etkilemiştir.

Elde edilen deneysel veriler ışığında; keçi kılı, kenevir ve keten lifi gibi doğal katkıların gözenekli çimentolu kompozitlerde dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini

göstermektedir. Bunun yanında, aerjel katkısıyla yüksek gözenekliliğe sahip karışımlarda liflerin bağlanma yeteneği, lif tipi ve miktarı mekanik dayanım üzerinde doğrudan etki etmektedir. Keçi kılı katkısının dayanım üzerindeki olumsuz etkileri, kılların matrisle bütünleşme ve homojen dağılım sorunlarından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Keten ve kenevir liflerinin gözenekliliği artırması basınç dayanımını üzerinde olumsuz karşılanmaktadır. Doğal liflerin çimentolu karışımlarda kullanılması konusunda daha iyi bağlanma ve dayanım artırılması için liflerin işlemden geçirilmesi bir seçenek olabilmektedir.

4.3. Termal İletkenlik Analiz Sonuçları

Çalışma kapsamında hazırlanan agregalı ve agregasız, aerjel katkılı ve katkısız numunelerin termal iletkenlik katsayılarına ait ölçülen değerler Çizelge 4.3’ te gösterilmektedir.

Çizelge 4.3. Numunelere ait termal iletkenlik katsayısı deney sonuçları.

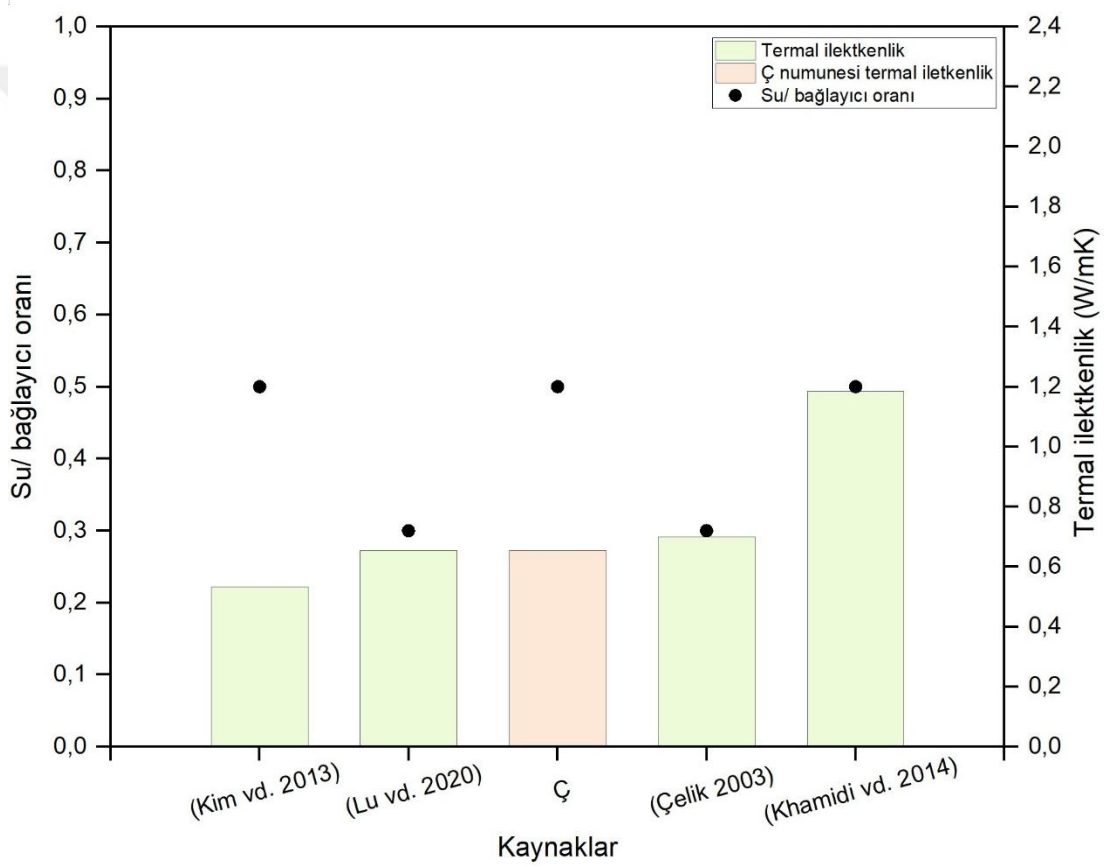
Numune Kodu		Termal İletkenlik (W/mK)	Numune Kodu		Termal İletkenlik (W/mK)
Agregasız	Ç	0,655	Agregalı	KÇ	0,607
	K	0,444		KK	0,515
	KEN	0,194		KKEN	0,355
	KET	0,255		KKET	0,451
	ÇA	0,326		KAC	0,461
	ÇAK	0,404		KAK	0,585
	ÇAKEN	0,233		KAKEN	0,491
	ÇAKET	0,126		KAKET	0,396

Agregasız numunelerde en yüksek termal iletkenlik katsayısı değeri kontrol numunesi olan Ç (0,655 W/mK)’ dendir. Agregasız ve aerjel ilavesiz numunelerde lif ilavesiyle birlikte termal iletkenlik değerleri düşmüştür. Sırasıyla en düşük termal iletkenlik değeri KEN (0,194 W/mK), KET (0,255 W/mK) ve K (0,444 W/mK) numunelerinde ölçülmüştür. Bir başka deyişle bu grupta kenevir lifleri en fazla düşüşü sağlarken bunu keten lifleri ve keçi kılı takip etmektedir. Genel olarak agregasız numunelere aerjel ilavesiyle termal iletkenlik katsayısında düşüş meydana gelmiştir. Ç numunesine aerjel ilave edildiğinde %50’lik bir düşüşle ÇA numunesinde 0,326 W/mK değeri bulunmuştur. ÇA’ ya göre keten lifleri ilaveli ÇAKET 0,126 W/mK değeri ile en yüksek düşüşü gösterirken bunu 0,233 W/mK değeri ile ÇAKEN izlemekte olup keçi kılı katkılı ÇAK (0,404 W/mK) numunesinde ise bir miktar yükselme olmuştur. Bu durum numunelerin sahip olduğu toplam porozite değeri ile ilişkili olup birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Agregalı numunelerde de benzer şekilde lif katkısıyla birlikte termal iletkenlik değerlerinde düşme meydana gelmiştir. Ancak kum içeren numunelerin termal iletkenlik

değerleri daha yüksektir. KÇ numunesinde tüm gruplarda en yüksek termal iletkenlik değeri ölçülmüş olup bu değer 0,607 W/mK' dir. Lif ilavesiyle birlikte en düşükten yükseğe sıralama KKEN (0,355 W/mK), KKET (0,451 W/mK) ve KK (0,515 W/mK)' dir. Agregalı numunelerde lif katkısıyla birlikte aerjel kullanımında en düşük termal iletkenliği KAKET (0,396 W/mK) vermektedir. KAÇ kontrol numunesinde termal iletkenlik değeri 0,461 W/mK iken kenevir ilavesi ile bu değer 0,491 W/mK, keçi kılı ilavesi ile 0,585 W/mK değerini göstermiştir. Buradaki az miktardaki yükselme porozite değeri ile birlikte değerlendirilmelidir.

Çalışmada Ç kontrol numunesinin kıyaslanabileceği, çimento ve sudan oluşan çimento pastalarının sertleşmiş haldeki deneylere tabi tutulduğu ve termal iletkenlik katsayılarının verildiği literatürdeki çalışmalar incelenmiştir. Çalışmalardaki su bağlayıcı oranına göre elde edilen termal iletkenlik değerleri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.16).

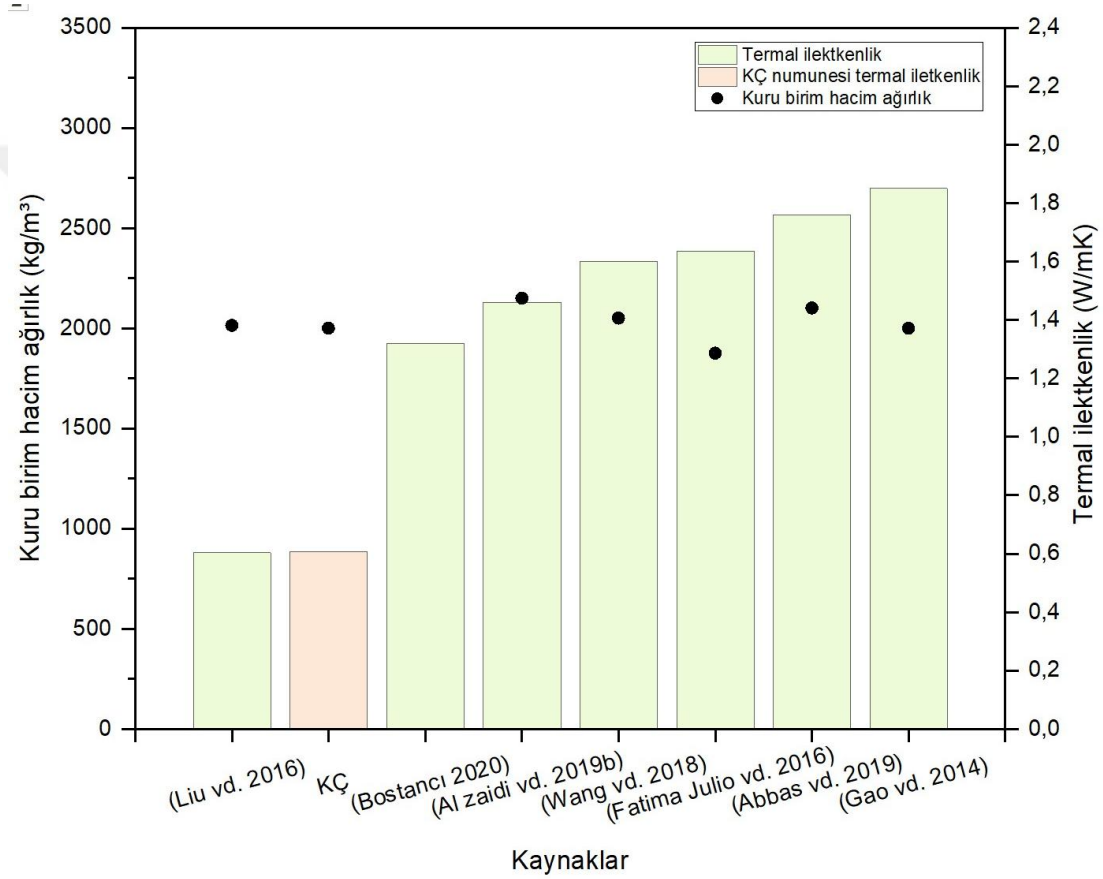


Şekil 4.16. Ç numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.

Çimento esaslı karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0,5 ve 0,3 olan çalışmalarda farklı termal iletkenlik değerleri tespit edilmiştir. Lu vd. (2020) Portland 42,5 çimento türü kullandıkları numunede 0,3 su/bağlayıcı oranında 0,654 W/mK termal iletkenlik değeri yakalarken, Çelik (2003) aynı su oranında Portland 52,5 çimento kullanarak 0,700 W/mK termal iletkenlik değerini yakalamıştır (Lu vd. 2020; Çelik 2003). Çalışma kapsamında incelenen 0,5 su/ bağlayıcı oranına sahip numunelerde Portland çimento kullanılmış

olmasına rağmen termal iletkenlik değerlerinde oldukça farklı sonuçlar elde edilmiştir. Kim vd. (2013) tarafından üretilen numunede 0,533 W/mK, Ç numunesinde ise buna göre yaklaşık %23 artışla 0,655 W/mK termal iletkenlik değeri ölçülmüştür (Kim vd. 2013). Khamidi vd. (2014) ise 1,185W/mK ile görece oldukça yüksek termal iletkenliğe ulaşmıştır. Aynı su/bağlayıcı oranında çimento esaslı malzemelerdeki görülen bu farklılıklar çimento türü, farklı kütleme koşulları ve farklı kalıp boyutlarıyla ilişkilendirilmektedir.

KÇ numunesi ve literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde Şekil 4.17’ de mevcut çalışmalarda elde edilen kuru birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik değerlerinin ilişkisi gösterilmektedir.

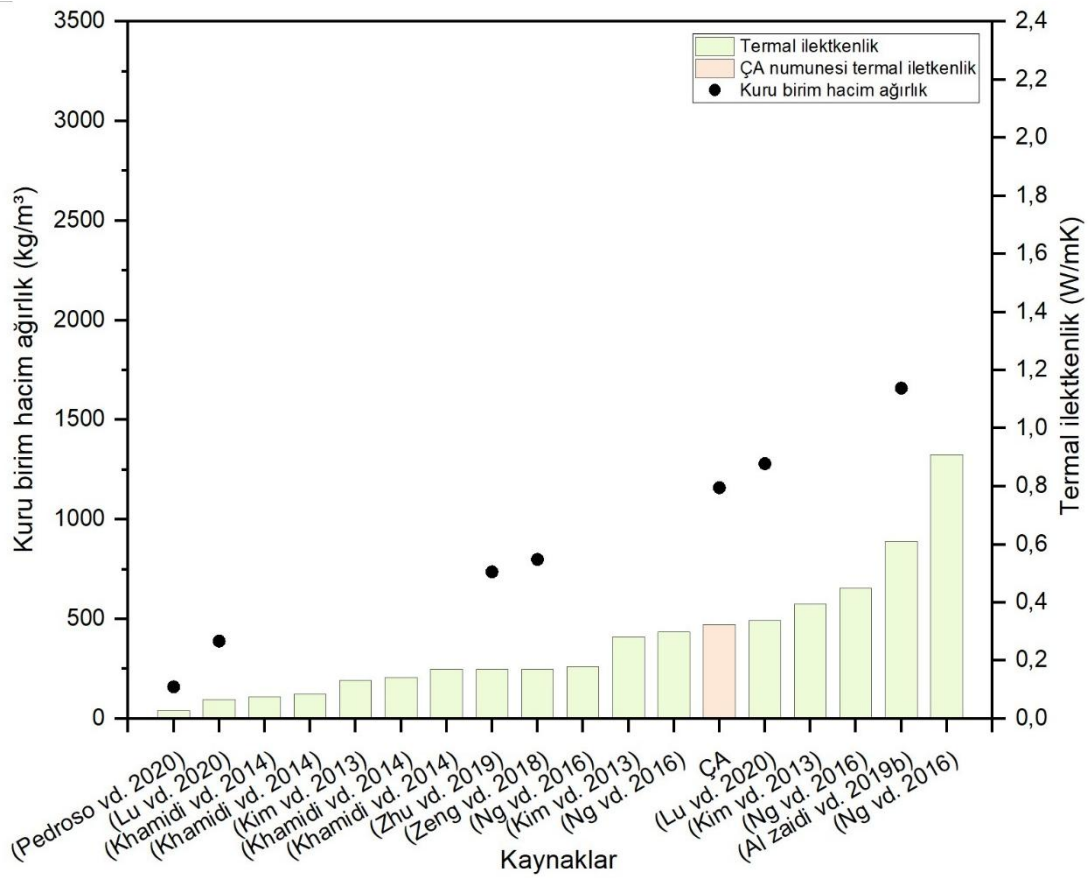


Şekil 4.17. KÇ numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.

KÇ numunesinde birim hacim ağırlık 2000 kg/m³ ve termal iletkenlik ise 0,607 W/mK olarak ölçülmüştür. Liu vd. (2016) tarafından yapılmış 2014 kg/m³ birim hacim ağırlığa sahip numunede ise termal iletkenlik 0,603 W/mK’dir (Liu vd. 2016). Şekil 4.17’ deki diğer çalışmalar da ise farklı sonuçlar elde edilmiştir. Bu farklılıklar karışımda kullanılan malzemelerin özelliklerine, bağlayıcı türüne, agrega boyutları ve miktarlarına, su oranına, kütleme koşullarına göre değişiklik göstermektedir. Örneğin Wang vd. (2018) numunesinde 2050 kg/m³ kuru birim hacim ağırlık değeri ile KÇ’de elde edilen kuru

birim hacim ağırlık değeri çok yakındır. Fakat bağlayıcı türü olarak çimentonun yanında silis dumanı kullanımının yanında agrega oranı da KÇ'den farklıdır. Benzer şekilde Fatima Julio vd. (2016) tarafından yapılmış çalışmada KÇ'ye göre farklı olarak CEN standart kum yerine silis kumu tercih edilmiş, su/bağlayıcı oranı 1 olarak ve agrega/çimento oranı ise 4 alınmıştır. Üretilen numunede 1875 kg/m^3 kuru birim hacim ağırlık değeri ile $1,636 \text{ W/mK}$ termal iletkenlik değerine ulaşılmıştır (Fatima Julio vd. 2016).

ÇA kontrol numunesi çimento pastasına aerojel eklenmesiyle yapılmış olup bu bağlamda literatürdeki çalışmalarda elde edilebilen kuru birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik değerlerini gösteren grafik aşağıdadır (Şekil 4.18).

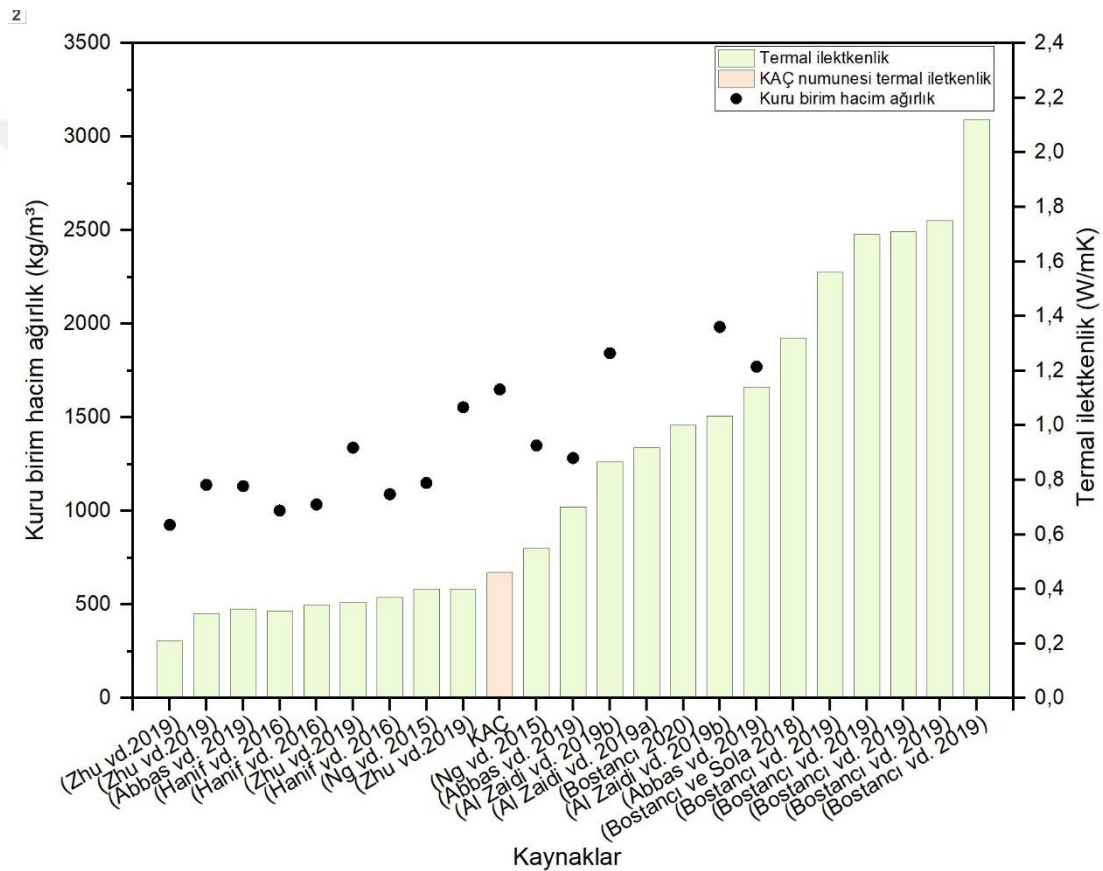


Şekil 4.18. ÇA numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.

ÇA kontrol numunesi ile benzer kuru birim hacim ağırlıkta ve termal iletkenlik değerine sahip en yakın çalışma sonucu Lu vd. (2020) tarafından yapılmış 1280 kg/m^3 kuru birim ağırlık ve $0,337 \text{ W/mK}$ termal iletkenliğe sahip olan araştırmadır (Lu vd. 2020). Kim vd. (2013) tarafından hazırlanan su/çimento oranının 0,5 olarak kullanıldığı ve aerojel/ bağlayıcı oranının ağırlıkça %0,5 olduğu çalışmada kuru birim hacim ağırlık

değeri verilmemiş olup termal iletkenlik değeri ise ÇA numunesi ile oldukça benzer olarak 0,395 W/mK' dir (Kim vd. 2013). Bu bağlamda farklı çalışmalarda benzer sonuçlara ulaşılan değerler ile ÇA numunesinde uyumluluk söz konusudur. Genel olarak erişilebilen kuru birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik değerleri arasında doğru orantılı bir ilişki mevcuttur. Kuru birim hacim ağırlık artışıyla literatürdeki çalışmalarda elde edilen termal iletkenlik değerleri artmaktadır.

KAÇ numunesinden elde edilen verilerin literatürdeki veriler ile birlikte incelenmesi Şekil 4.19’ da verilmektedir. Literatürde farklı birim hacim ağırlık değerlerinde farklı termal iletkenlik değerleri tespit edilmiş çalışmalar mevcuttur.



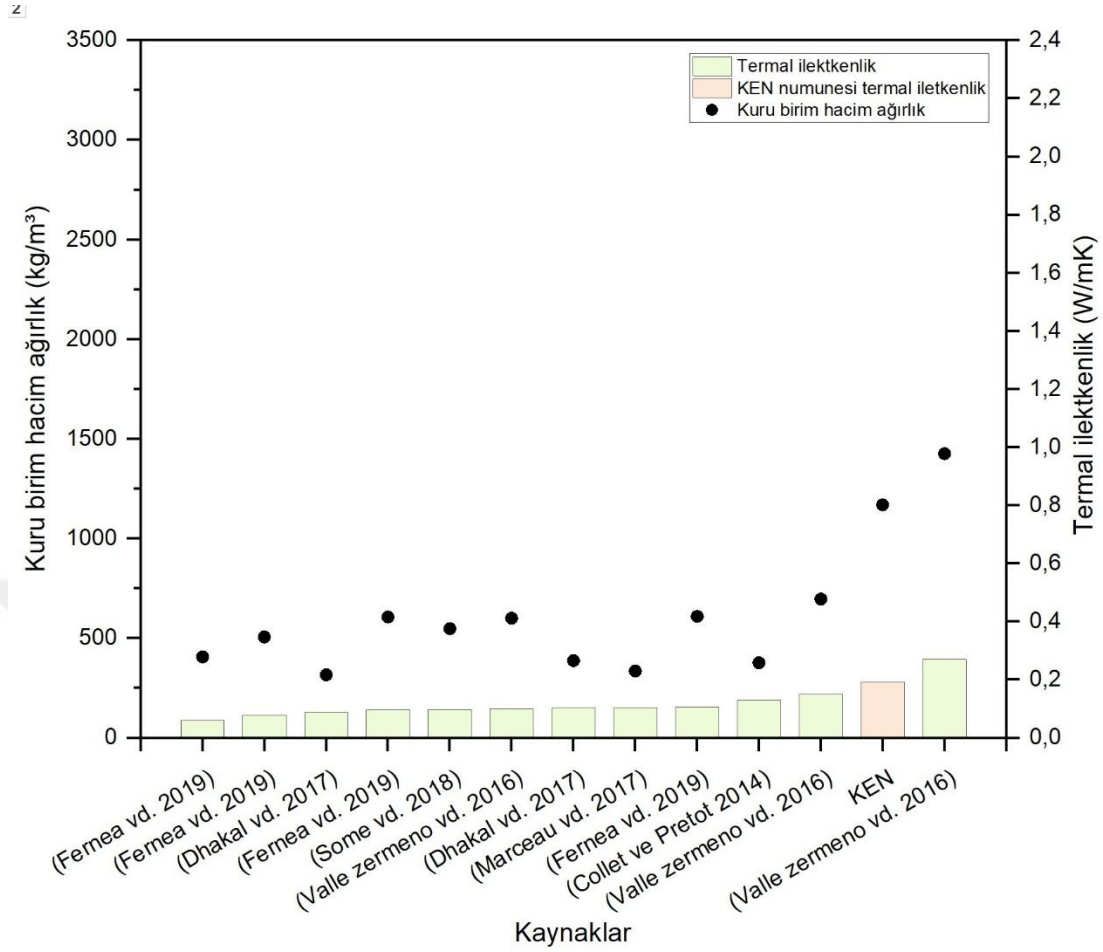
Şekil 4.19. KAÇ numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.

KAÇ kontrol numunesinde kuru birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik değerleri sırasıyla 1650 kg/m³ ve 0,461 W/mK' dir. Zhu vd. (2019) çimento ve silis dumanını bağlayıcı olarak, su/ bağlayıcı oranını ise 0,4 olarak belirledikleri, kum ve aerjeli agrega olarak kullandıkları çalışmalarında toplam karışım hacminin %33'ü aerjelden oluşan numune üretmişlerdir (Zhu vd. 2019). Üretilen bu numunede 1555 kg/m³ birim hacim ağırlık ve 0,400 W/mK termal iletkenlik katsayısı ölçümü yapılmıştır. Aynı çalışmada

aerojel oranının artırılması ile oluşturulan diğer numunelerde kuru birim hacim azalmış ve beklenildiği şekilde termal iletkenlik de düşmüştür (Zhu vd. 2019). Hacimce %50 aerojel içeren karışımlarında birim hacim ağırlık 1350 kg/m³ ve termal iletkenliği 0,550 W/mK ölçülen çalışmada aerojel oranı artmasıyla bu değerlerde düşüş meydana gelmiş hacimce %60 aerojel içeriğinde sırasıyla 1150 kg/m³ ve 0,400 W/mK değerleri elde edilmiştir (Ng vd. 2015). Hanif vd. (2016) çimento, silis dumanı, uçucu kül, PVA lifi ve aerojel kullandıkları karışımlarda aerojel oranını ağırlıkça %0 ile %5 arasında değiştirmiştir (Hanif vd. 2016). Elde edilen verilerde aerojel oranı arttıkça birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik düşmüştür. %1 aerojel içeriğinde bu değerler sırasıyla 1090 kg/m³ ve 0,370 W/mK'dir (Hanif vd. 2016). Bostancı vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada 450 g çimento, 225g su ve 1350 g kum yanında %0,1 ila 1 oranında aerojel kullanılmıştır (Bostancı vd. 2019). Çalışmada elde edilen kuru birim hacim ağırlık değerleri verilmemiş ancak termal iletkenlik değerleri aerojel oranı ile birlikte değişkenlik göstermiştir (Bostancı vd. 2019).

Çimento esaslı harçlara kenevir lifi takviyesi ile hazırlanan numunede literatür çalışmalarına bakıldığında, bağlayıcı olarak daha çok kireç kullanımı üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Mevcutta yer alan çalışmalar ve çalışma kapsamında hazırlanan KEN numunesinden elde edilen kuru birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik verileri Şekil 4.20' de gösterilmektedir. Farklı bağlayıcı tipleri ve oranlarının çimento esaslı kompozitlerde kullanılmasıyla kuru birim hacim ağırlıkta ve termal iletkenlik değerlerinde düşüşler olmaktadır.

Fernea vd. (2019) CEMI 52,5 tipi çimento ve kenevir lifi ile hazırladıkları karışımlarda dört farklı bileşim incelemiş, su/bağlayıcı oranı 1 ve bağlayıcı/lif oranını ise 2 olarak belirlemişlerdir. Bu bileşimlerden iki tanesi tek katmanlı, diğer iki tanesi ise çok katmanlı olarak tanımlanmıştır (Fernea vd. 2019). Çalışmada kuru birim hacim ağırlık 406 ila 610 kg/m³ arasında iken termal iletkenlik 0,061 ila 0,106 W/mK arasında tespit edilmiştir (Fernea vd. 2019). Dhakal vd. (2017) tarafından yapılmış çalışmada bağlayıcı olarak %70 hidrolik kireç, %20 çimento ve %10 puzolan kullandıkları karışımlarda sırasıyla 317 kg/m³ ve 388 kg/m³ kuru birim hacim ağırlık saptanan numunelerde 0,088 W/mK ve 0,103 W/mK gibi düşük değerler elde etmişlerdir (Dhakal vd. 2017). Magnezyum fosfat çimentosunu bağlayıcı olarak kullandıkları ve toplam katı ağırlığının %8-12-16 ve 20'si kenevir olan numunelerde kenevir oranı artışıyla kuru birim hacim ve termal iletkenlik değerleri düşmüştür (Valle Zermano vd. 2016). Bu çalışmadaki ağırlıkça %8 ve %16'lık kenevir oranı KEN numunesinde kullanılan kenevir oranı ile yakındır. %8 kenevir içerikli numunede birim hacim ağırlık 1425 kg/m³ ve termal iletkenlik 0,270 W/mK iken %16 kenevir içerikli numunede bu değerler sırasıyla 696,3 kg/m³ ve 0,150 W/mK'dir (Valle Zermano vd. 2016). KEN numunesi ise 1170 kg/m³ ve 0,193 W/mK değerleri ile bu aralıkta kalmaktadır. Literatürde farklı bağlayıcı tipleri, farklı oranlarda kullanılan malzemeler, liflere uygulanan farklı işleme koşulları ile birlikte birbirinden farklı sonuçlara ulaşılmış olması beklenen bir durumdur.

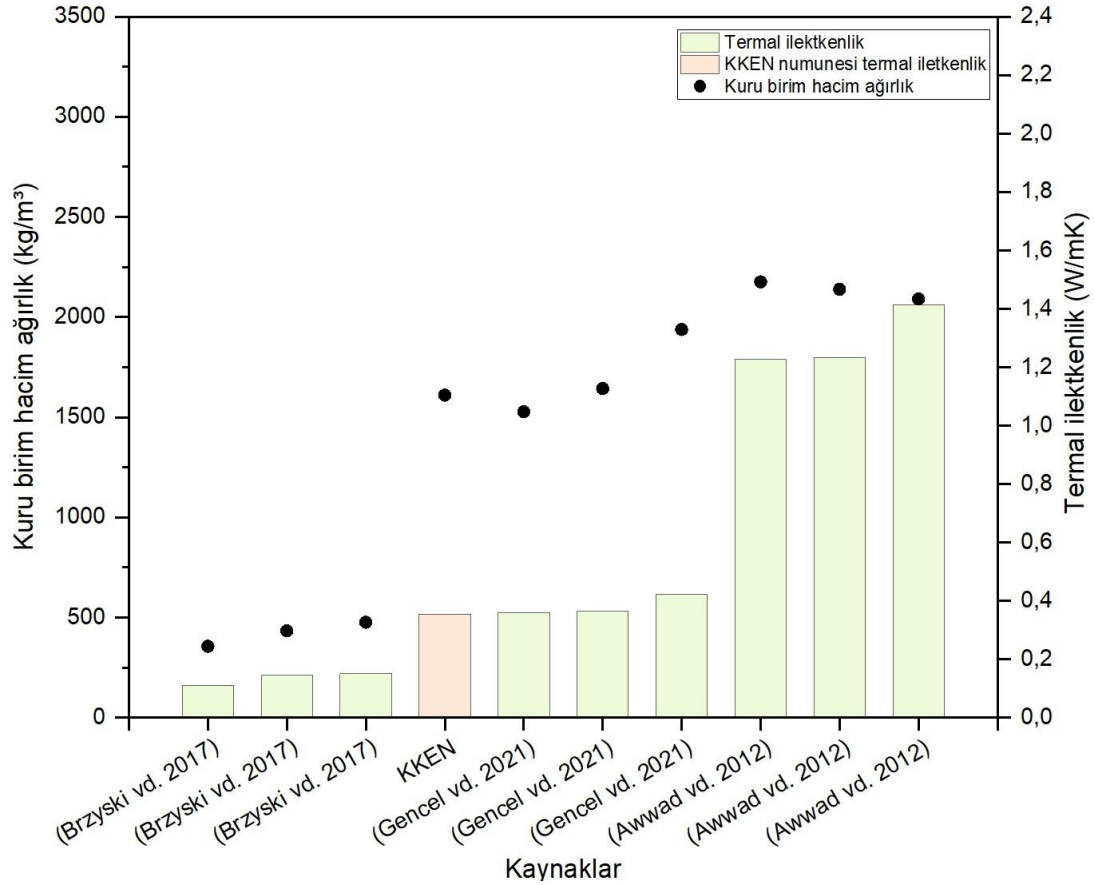


Şekil 4.20. KEN numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.

Agregalı ve kenevir lifi takviyeli KKEN numunesinde tespit edilen verilerin literatürdeki benzer çalışmalardaki verilerle birlikte değerlendirilmesi için Şekil 4.21’ de hazırlanmıştır. Literatürde farklı birim hacim ağırlık değerlerinde farklı termal iletkenlik değerleri tespit edilmiş çalışmalar mevcuttur. Genel olarak çalışmalarda kuru birim hacim ağırlık artışıyla birlikte termal iletkenliğin de arttığı görülmüştür.

Brzyski vd. (2017) bağlayıcı olarak kireç ve çimentoyu kullandıkları karışımlarında, çimentoyu toplam bağlayıcı oranının %9,5 ila 20,1’i olacak şekilde dizayn etmişlerdir (Brzyski vd. 2017). Düşük çimento oranı ile birlikte diğer çalışmalara kıyasla düşük birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik verileri ortaya çıkmıştır. Gencel vd. (2021) kenevir lifinin ağırlıkça %1,5 olduğu numunesinde 1643 kg/m³ birim hacim ağırlık ve 0,365 W/mK termal iletkenlik değerine ulaşmışlardır (Gencel vd. 2021). Bu verilere bakıldığında KKEN numunesinin kuru birim hacim ağırlık (1610 kg/m³) ve termal iletkenlik (0,355 W/mK) verileri ile yakın değerlere sahiptir. Aynı çalışmada kenevir oranının artması ile birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik azalmaktadır. Awwad vd. (2012) tarafından yapılan bir çalışmada; çimento, kum, iri agrega kullanılmış ve toplam hacmin %1’i kenevir lifi olacak şekilde karışımları tasarlamış, su/çimento oranını

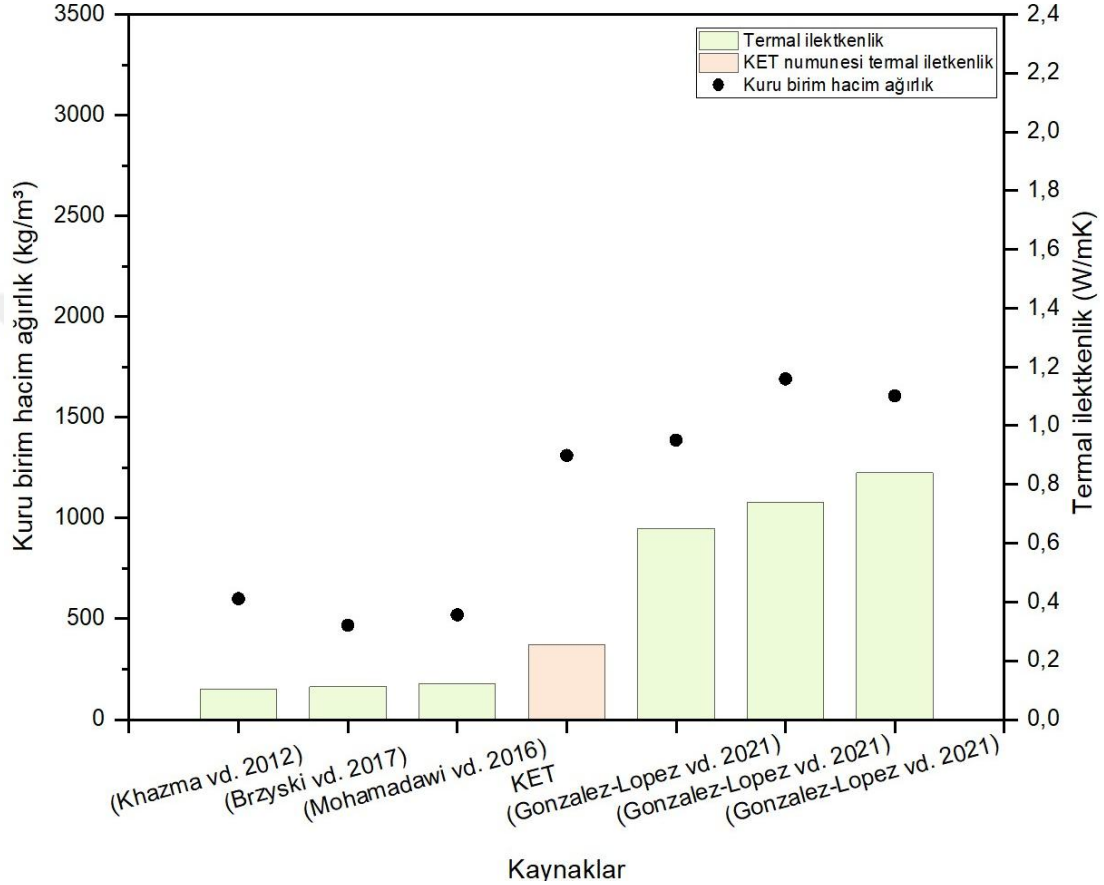
0,68 tutup, agrega oranını değiştirerek değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Kullanılan agrega türü ve kenevir içeriğiyle birlikte diğer çalışmalara göre daha yüksek birim hacim ağırlık ve ısı iletkenlik katsayısı elde edilmiş, agrega oranının azaltılmasıyla birlikte birim ağırlık düşerken termal iletkenliğin yükseldiği veriler ortaya çıkmıştır (Awwad vd. 2012).



Şekil 4.21. KKEN numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.

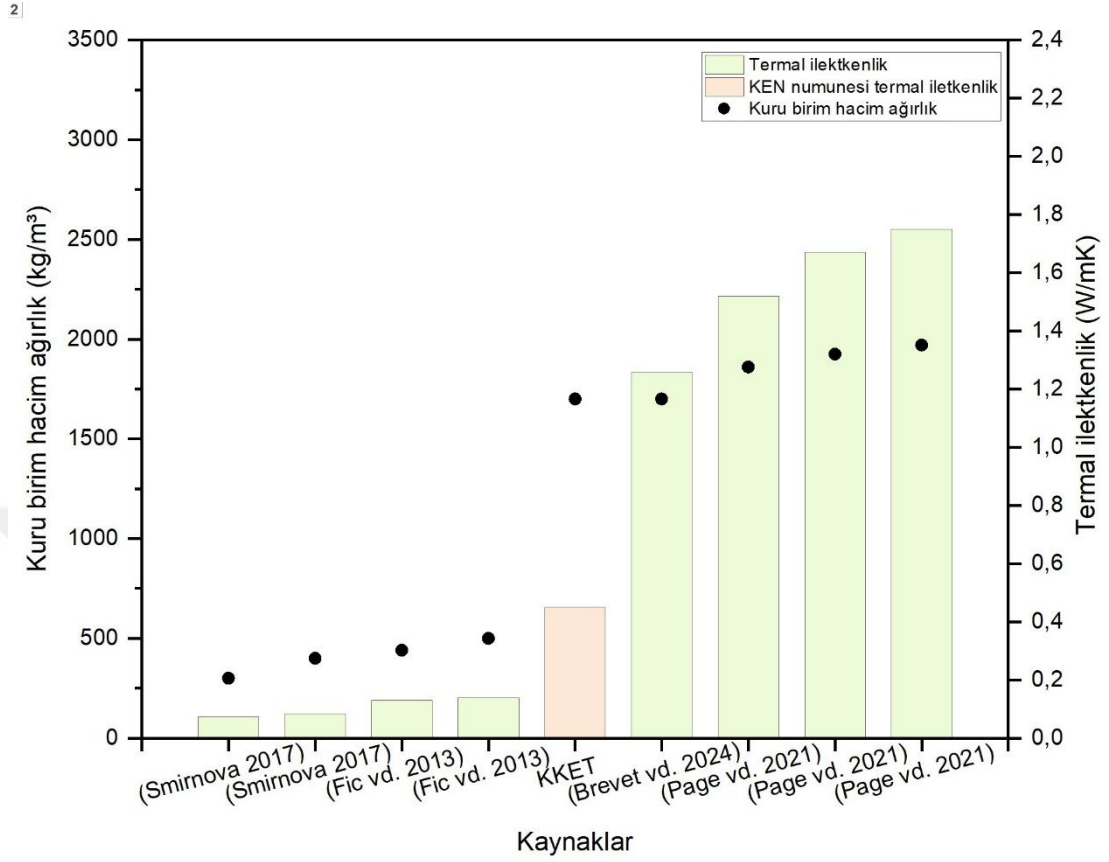
KET numunesinin literatür verileriyle birlikte değerlendirilmesi aşamasında, agregasız keten takviyeli çimento bazlı hazırlanan karışımlar incelenmiştir (Şekil 4.22). Khazma vd. (2012) ve Al-Mohamadawi vd. (2016) tarafından hazırlanan çalışmalarda keten/ çimento oranı 4 olarak alınmıştır (Khazma vd. 2012; Al-Mohamadawi vd. 2016). Bu oran çalışmada hazırlanan KET numunesinde kullanılan keten lifi miktarının çok üzerindedir. Bu bağlamda iki çalışmadaki birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik KET numunesine göre oldukça düşüktür. Brzyski vd. (2017) bağlayıcı olarak kireç, çimento ve kil kullanmıştır (Brzyski vd. 2017). Toplam bağlayıcı oranının sadece %23'ü çimento olan karışımda elde edilen veriler KET numunesine göre düşük olup, bağlayıcı türü ve kullanılan malzemelerin miktarı ile ilişkilidir. Gonzalez-Lopez vd. (2021) toplam ağırlığın %5'i keten lifi olarak hazırladıkları karışımlarda bağlayıcı olarak metakaolin oranını değiştirmişlerdir (Gonzalez-Lopez vd. 2021). KET numunesi ile benzer birim

hacim ağırlık değerleri olsa da KET numunesinde kullanılan keten lifi miktarı daha fazla olup, termal iletkenlik değeri ise daha düşüktür. Buradan hareketle incelenen iki fiziksel özellik için, kullanılan bağlayıcı türü, kullanılan malzeme ve oranları, keten lifi miktarı ve uzunluğu, liflerin ön işleminden geçip geçmediği, kütleme koşulları gibi etkenler farklı sonuçların elde edilmesinde olağandır.



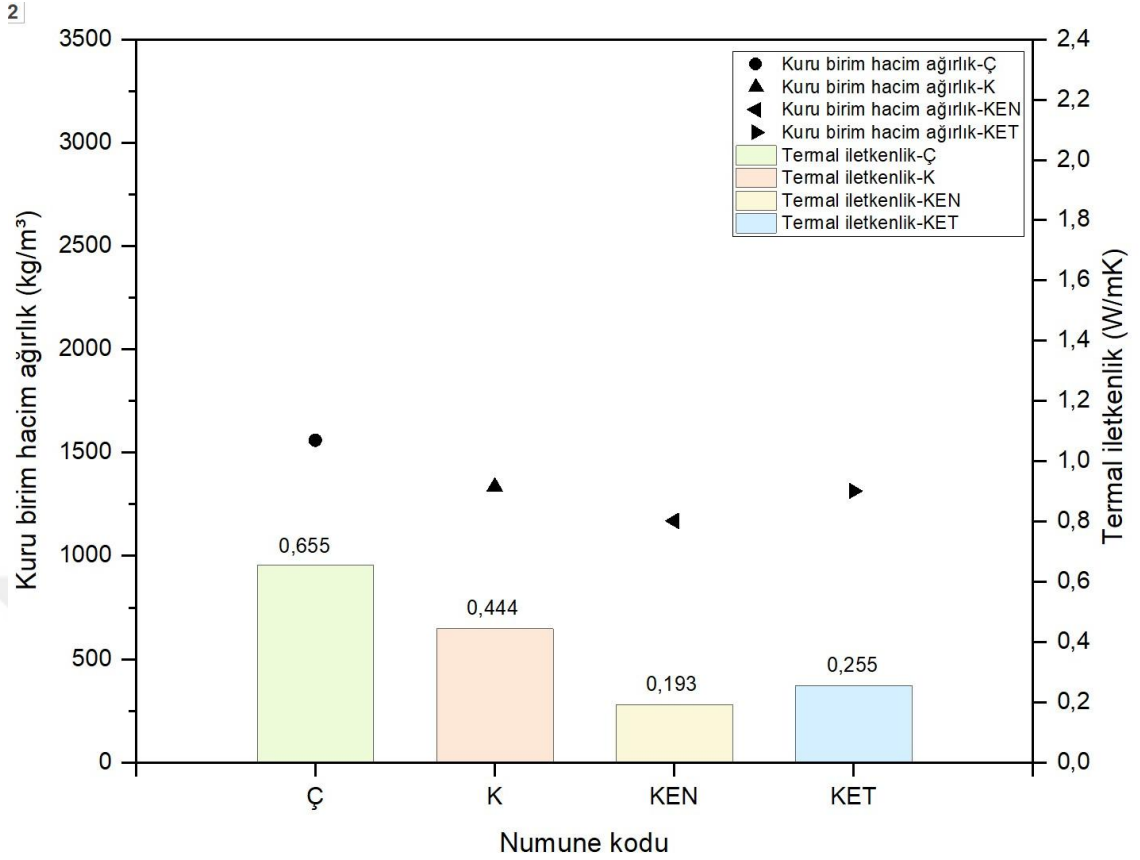
Şekil 4.22. KET numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.

Agregalı ve keten lifi takviyeli KKET numunesinden elde edilen birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik değerleri, literatürde yer alan benzer çalışmalara göre incelenmiştir (Şekil 4.23). KKET numunesinin 0,450 W/mK olan termal iletkenlik değeri, Smirnova (2017) ve Fic vd. (2013)'in yaptığı araştırmalardaki düşük yoğunluklu ve düşük iletkenlikli örneklerle kıyaslandığında daha yüksek veriler sunmaktadır. Bu iki çalışmada kuru birim hacim ağırlık 300- 500 kg/m³ arasında olup termal iletkenlik ise 0,074-0,140 W/mK aralığındadır (Smirnova 2017; Fic vd. 2013). Bununla birlikte KKET' in kuru birim hacim ağırlığı 1700 kg/m³ olup, bu değer Smirnova (2017) ve Fic vd. (2013) örneklerinden oldukça yüksek, ancak Page vd. (2021) ve Brevet vd. (2024) gibi yoğunluğu 1700–1910 kg/m³ arasında değişen malzemelere göre yakındır. Ancak termal iletkenlik bakımından KKET daha avantajlı görülmektedir.



Şekil 4.23. KKET numunesine ait literatürdeki birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.

Çalışma kapsamında agregasız ve aerojel ilavesiz grupta elde edilen kuru birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi Şekil 4.24’ te gösterilmektedir. Bu grup numunede çimento matrisine doğal liflerin etkileri gözlenmektedir. Ç kontrol numunesi en yüksek kuru birim hacim ağırlığına ve bağlantılı olarak da en yüksek termal iletkenlik değerine sahiptir. Yalıtım performansı en düşük olan numune Ç’ dir. Keçi kılı ilavesiyle birlikte Ç numunesine göre yoğunluk (%14) ve ısı iletkenlik (%32) düşmüştür. KK numunesinde lifler poroziteyi artırarak daha hafif hem de daha etkin ısı iletkenlik sağlamıştır. Ancak keçi kılı katkısı kenevir ve ketene göre daha sınırlı etki göstermiştir. Kenevir ve keten lifi içeren numunelerde birbirlerine yakın değerler ölçülmüştür. Bu grupta en düşük kuru birim hacim ve termal iletkenliğe sahip numune KEN’ dir. Ç numunesine göre kuru birim hacim ağırlık (%25) ve ısı iletkenlik (%70) azalmıştır. KET numunesine bakıldığında ısı iletkenlik değeri 0,255W/mK olarak ölçülmüş ve Ç numunesine kıyasla bu değer %61 oranında düşmüştür.

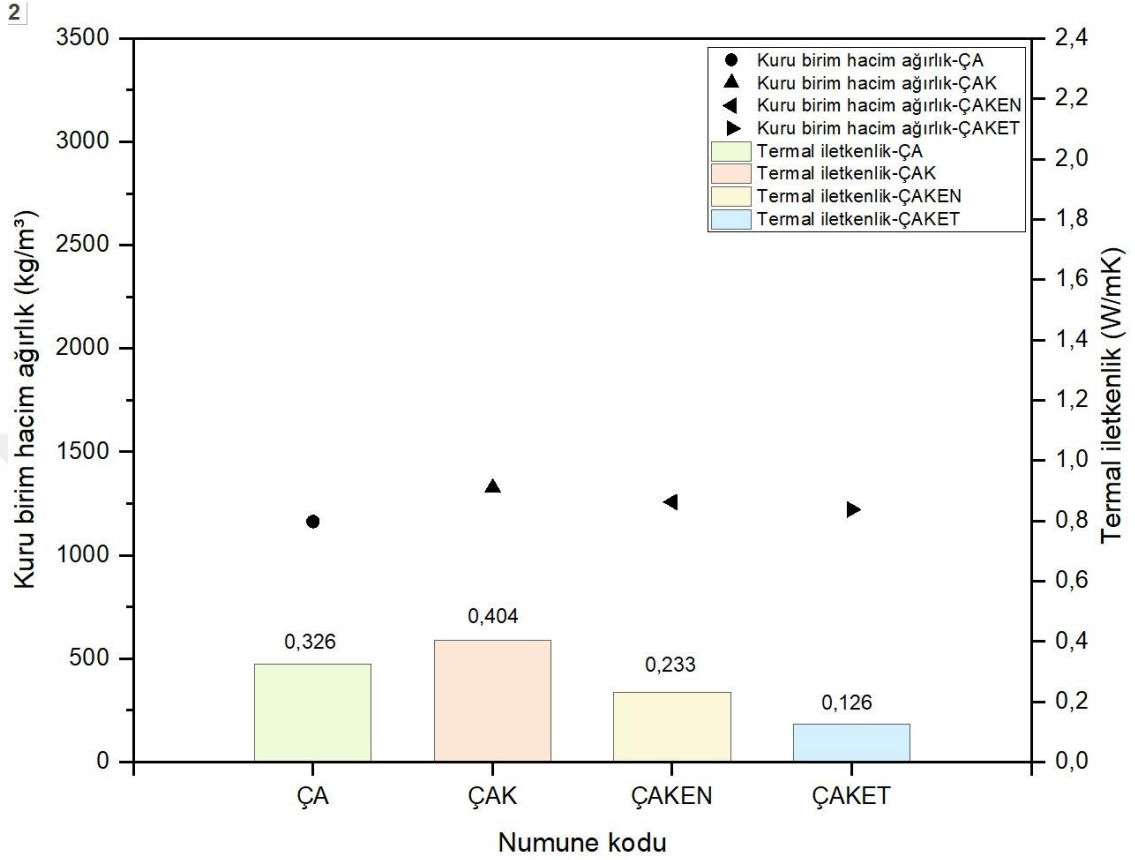


Şekil 4.24. Agregasız ve aerojel ilavesiz grup numunelerine ait birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.

Agregasız ve aerojelsiz çimento esaslı bu grupta, doğal lif katkılarının malzeme yoğunluğunu azaltarak daha hafif ve bununla bağlantılı olarak termal iletkenliği daha düşük karışımlar elde edildiği görülmektedir. Termal iletkenlik açısından en başarılı sonuç kenevir katkılı çimento numunesinden elde edilmiştir. Bu da yüksek gözeneklilik ve düşük yoğunlukla yapılandırılmış lif türlerinin, yalıtım malzemesi olarak çimento kompozitlerde kullanımının enerji etkin ve çevre dostu potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

Agregasız ve aerojel ilaveli grupta elde edilen kuru birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi aşağıdaki grafikte ifadelendirilmiştir (Şekil 4.25). Çimento matrisine aerojel ve doğal lifler eklenerek hazırlanmış bu kompozitlerin termal ve kuru birim ağırlık değerleri incelenmiştir. Lif içermeyen kontrol numunesi ÇA tek başına aerojel ilavesi ile Ç'ye göre termal iletkenlik değerini %50 oranında düşürmüştür. Aerojel çimento matrisinde gözenekli yapısı ile hem numuneyi hafifletmiş hem de ısı iletimini kısıtlamıştır. ÇA kontrol numunesine keçi kılı eklenmesiyle oluşturulan ÇAK' de kuru birim hacim (%14) ve termal iletkenlik (%24) değeri yükselmiştir. Keçi kılı, diğer liflere göre daha az gözenekli ve daha yoğun bir yapıya sahiptir bu sebeple de ısı iletkenlik performansı düşmüştür. Kenevir lifi katkısına bakıldığında ısı yalıtım performansı artarken kuru birim hacim ağırlıkta ÇA' ya göre %8'lik bir artış olmuştur. ÇAKET

numunesinde en düşük termal iletkenlik değeri (0,126 W/mK) tespit edilmiştir. ÇA' ya göre termal iletkenlik %62 oranında düşerken, kuru birim hacim ağırlık ise %5 gibi çok düşük bir oranda artmıştır.

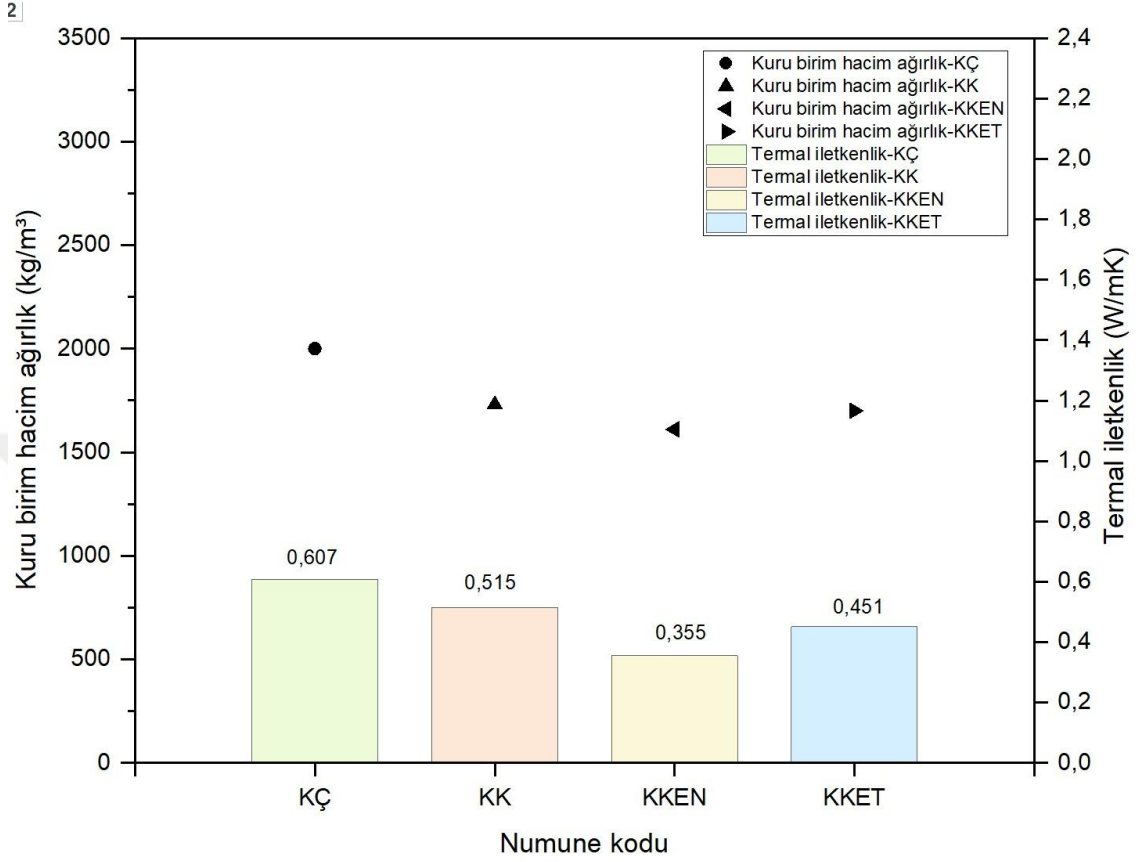


Şekil 4.25. Agregasız ve aerjel ilaveli grup numunelerine ait birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.

Çalışma kapsamında üretilmiş tüm numunelerde agregasız ve aerjel içeren grup ısı yalıtımı açısından en yüksek performansı göstermiştir. Bu grupta doğal lif türlerinin ısı yalıtım üzerindeki etkisinin eş değer olmadığı sonucu ortaya çıkmıştır. En dikkat çekici sonuç en düşük termal iletkenliğe sahip ÇAKET numunesindedir ve keten liflerinin aerjelle birlikte çimento matrislerine eklenmesi çevre etkin alternatif ürün arayışında olumlu karşılanmaktadır.

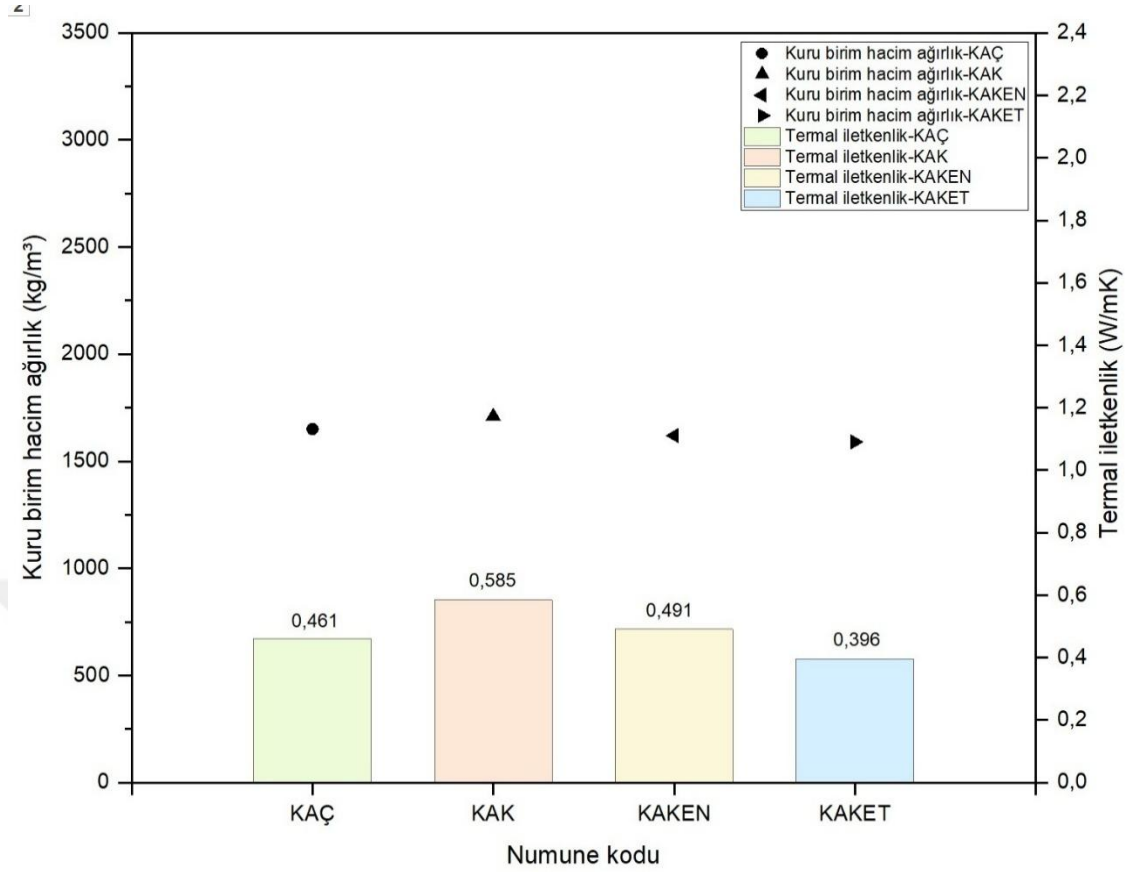
Agregalı ve aerjel ilavesiz grupta elde edilen kuru birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi Şekil 4.26' da gösterilmektedir. Agregasız ve aerjel katkısı içermeyen çimento esaslı numune grubuna bakıldığında en yüksek kuru birim hacim (2000 kg/m³) ve en yüksek termal iletkenlik (0,607 W/mK) kontrol numunesi KÇ' de ölçülmüştür. Keçi kılı katkısıyla birlikte yoğunluk (%14) ve ısı iletkenlik (%15) azalmıştır. Ancak keçi kılının ısı yalıtım performansına etkisi keten ve kenevir lifine göre daha sınırlıdır. Bu grupta en düşük kuru birim hacim ve en düşük termal iletkenlik KKEN numunesine aittir. KÇ numunesine göre sırasıyla bu değerlerde %20 ve %41 oranında

azalma mevcuttur. KKET numunesinde ise düşüş oranları sırasıyla %15 ve %26 olarak tespit edilmiştir. Keten katkısı da bu gruptaki çimento esaslı karışımlara kenevire göre biraz daha az etkili olsa da olumlu bir yalıtım performansı gösterebilmektedir.



Şekil 4.26. Agregalı ve aerojel ilavesiz grup numunelerine ait birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.

Çalışma kapsamında hazırlanan agregalı ve aerojel katkılı numunelere ait kuru birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi aşağıdaki grafikte verilmiştir (Şekil 4.27). Aerojel katkısı, agregalı sisteme dahil edildiğinde termal iletkenlik KÇ numunesine göre %25 oranında azalmıştır. Buradan lif katkısı olmadan sadece aerojelin KÇ üzerindeki etkisi görülebilmektedir. Keçi kılı ilavesiyle KAÇ' ye göre yoğunluk çok az miktarda (%4) artarken, ısı iletkenlik %27 oranında yükselmiştir. KAKEN ve KAKET numunesinde yoğunlukta KAÇ' ye göre önemli bir değişiklik olmamıştır. KAKEN de termal iletkenlik değeri de değişmemiştir. Bu grupta sadece KAKET numunesi termal iletkenlik %14 oranında düşmüştür. Aerojel katkısı, kumun yalıtımı zayıflatıcı etkisini bir miktar telafi edebilmektedir. Ancak doğal lif türü kritik bir rol oynamaktadır. Keten lifi bu grupta en etkili sonucu vermiş olsa da belirgin bir etki sağlayamamıştır. Keçi kılı ise hem yoğunluk artışına hem de ısı iletkenlikte yükselmeye sebep olmuştur.



Şekil 4.27. Agregalı ve aerjel ilaveli grup numunelerine ait birim hacim ağırlık ve termal iletkenlik ilişkisi.

Çalışma kapsamında hazırlanan tüm numune gruplarında elde edilen veriler ışığında, yapı malzemelerinde kullanılan içeriklerin hem yalıtım hem de yapısal özellikler üzerinde etkilere sahip olduğunu ortaya koymuştur. Termal iletkenlik açısından en düşük değer, agregasız ve aerjelli grupta keten lifi ile elde edilen karışımda görülmüştür (0,126 W/mK). Bu durum, keten lifinin yüksek yalıtım kapasitesine sahip aerjel ile dengeli olarak çalışabileceğini ve ısı yalıtımı etkin bir yapı malzemesi ortaya koyabileceğini göstermektedir. Bir başka açıdan, keçi kılı katkılı karışımlar tüm gruplarda daha yüksek termal iletkenlik değerlerini sunmakta bu bağlamda da keçi kılının yalıtım performansına katkısının sınırlı olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

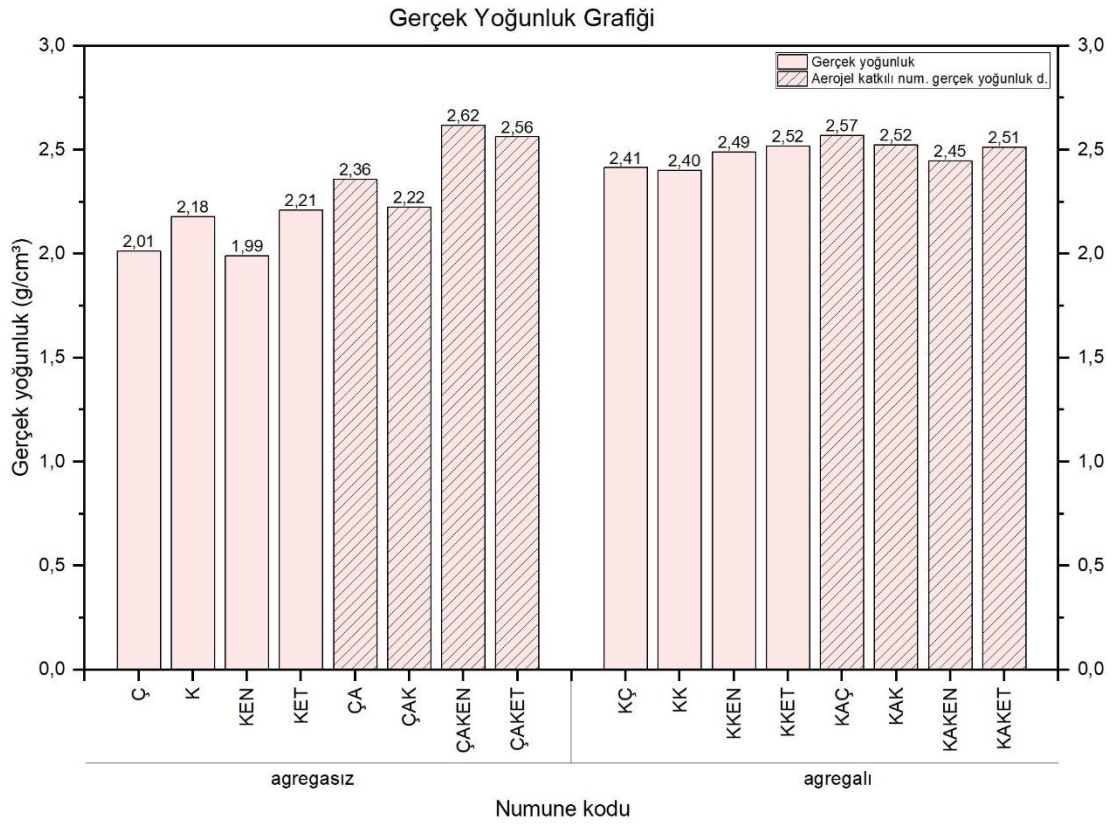
Kuru birim hacim ağırlığı bakımından en hafif malzeme, ÇA numunesi olarak tespit edilmiştir (1,16 g/cm³). Aerjelin düşük yoğunluklu yapısı, bu gruptaki tüm örneklerde ağırlığı azaltırken, doğal lif katkıları ise yoğunluğu sınırlı ölçüde değiştirmiştir. Kum katkısı ise yoğunluğu önemli ölçüde artırarak, malzemeyi ağırlaştırmıştır. Özellikle agregalı ve aerjel ilaveli gruptaki keten katkılı numune, düşük iletkenlik (0,396 W/mK) ve nispeten düşük yoğunluk (1590 kg/m³) ile yalıtım ve dayanım arasında bir denge sağlamıştır.

Sonuç olarak, lif türü, aerjel katkısı ve agrega miktarı gibi faktörler, yapı

malzemesinin performansında belirleyici olup; özellikle enerji verimli ve hafif yapı malzemesi çözümleri için doğal lif ve ileri katkı kombinasyonları dikkatle değerlendirilmeli ve optimize edilmelidir.

4.4. Porozite Analiz Sonuçları

Çalışma kapsamında üretilen 16 tane numunenin toplam porozite değerinin bulunabilmesi için öncelikle helyum piknometre kullanılarak numunelere ait gerçek yoğunluk verileri elde edilmiştir. Her numune üzerinde 10'ar kez ölçüm yapılarak ortalama değer işlenmiştir. Numunelere ait gerçek yoğunluk değerleri Şekil 4.28' de gösterilmektedir.



Şekil 4.28. Numunelere ait gerçek yoğunluk değerleri.

Agregasız ve aerojel içermeyen numune grubunda, en düşük yoğunluk değerine sahip malzemenin kenevir katkılı KEN (1,99 g/cm³) olduğu görülmektedir. Bu değer, grubun diğer numunelerinden düşük olup, en yüksek yoğunluklu malzeme olan keçi kılı katkılı K (2,18 g/cm³) ve keten katkılı KET (2,21 g/cm³) ile kıyaslandığında bir miktar farklılık göstermekle birlikte kontrol numunesi Ç ise 2,01 g/cm³ yoğunluğa sahiptir.

Agregasız ve aerojel katkılı numunelere bakıldığında, genel olarak aerojel içeriğinin yoğunluğu arttırdığı görülmektedir. Bu grupta aerojel içeren malzemeler

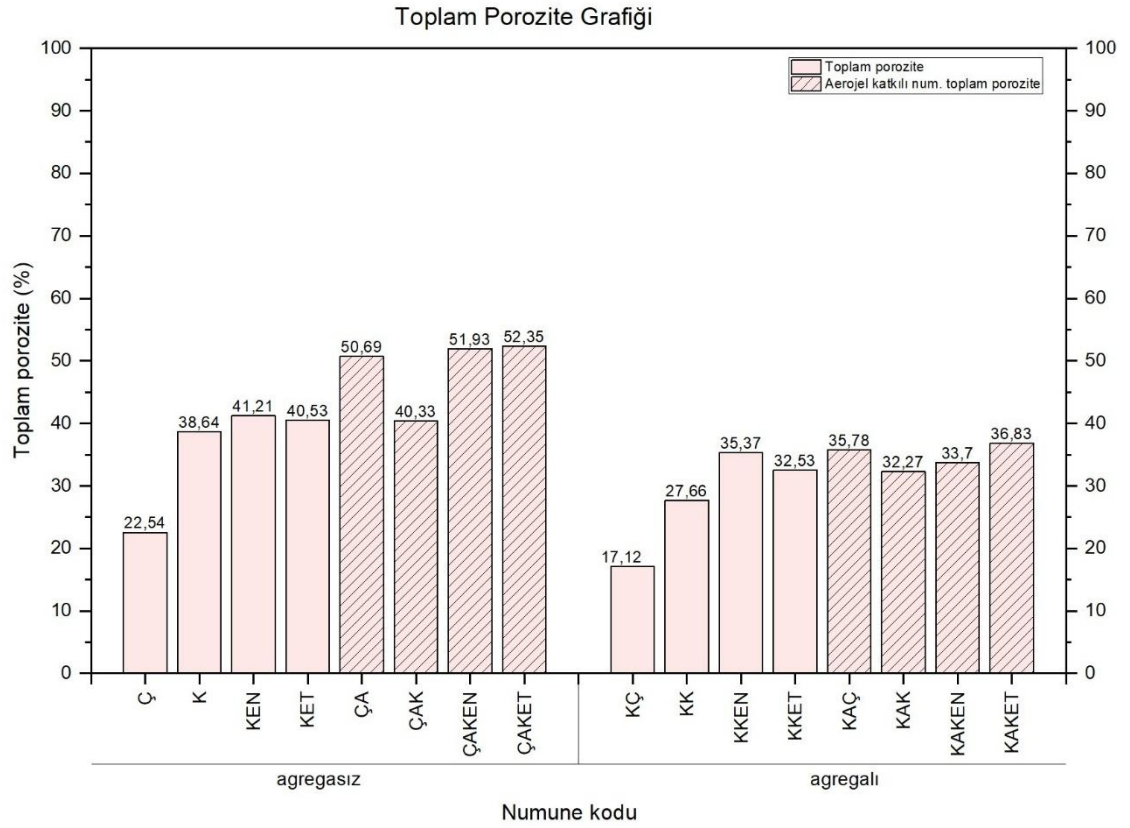
arasında en düşük yoğunluk keçi kılı içeren ÇAK ($2,22 \text{ g/cm}^3$)’ da gözlemlenirken, en yüksek yoğunluk kenevir lifi içeren ÇAKEN ($2,62 \text{ g/cm}^3$)’ de belirlenmiştir. Kontrol numunesi ÇA’ da $2,36 \text{ g/cm}^3$ ve keten lifi içeren ÇAKET’ de $2,56 \text{ g/cm}^3$ yoğunluk değeri ölçülmüştür.

Agregalı ve aerjel içermeyen numune grubuna bakıldığında, yoğunluk değerlerinin agregasız numunelere kıyasla genel olarak daha yüksek olduğu görülmektedir. En düşük yoğunluk keçi kılı içeren KK’ da ($2,40 \text{ g/cm}^3$) olurken, en yüksek yoğunluk keten lifi içeren KKET’ de ($2,52 \text{ g/cm}^3$) ölçülmüştür. Kontrol numunesi KÇ ($2,41 \text{ g/cm}^3$) ve kenevir lifi içeren KKEN ($2,49 \text{ g/cm}^3$)’ de birbirine yakın değerler görülmüştür.

Son olarak, agregalı ve aerjel içeren grupta, en yüksek yoğunluk KAÇ ($2,57 \text{ g/cm}^3$)’ da olup, en düşük yoğunluk kenevir lifi katkılı KAKEN ($2,45 \text{ g/cm}^3$) olarak kaydedilmiştir. Keçi kılı katkılı KAK ($2,52 \text{ g/cm}^3$) ve keten lifi katkılı KAKET ($2,51 \text{ g/cm}^3$) ise birbirine çok yakın yoğunluk değerleri sergilemektedir.

Tüm numune setlerinde gerçek yoğunluk değerleri çok yakın ölçülmüştür. Genel olarak değerlendirildiğinde, aerjel katkısının yoğunluğu artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, agrega içeren numuneler agregasız numunelere göre daha yoğun olup, keten katkılı malzemeler en dengeli yoğunluk değerlerini sunmaktadır.

Helyum piknometre analizinden sonra toplam porozite değerini hesaplamak için Formül 3.8 kullanılmıştır. Elde edilen veriler ışığında numunelere ait toplam porozite oranları Şekil 4.29’ da gösterilmektedir.



Şekil 4.29. Numunelere ait toplam porozite yüzdeleri.

Agregasız ve aerojel içermeyen numune grubunda toplam porozite %22,54 ve %41,21 aralığında değişmektedir. Kontrol numunesine göre en düşüğe en yükseğe sırasıyla keçi kılı katkılı K (%38), keten katkılı KET (%40,53) ve kenevir katkılı KEN (%41,21) numunesinde görülmüştür.

Agregasız ve aerojel içeren numunelerde ise toplam porozite %40,33 ile %52,35 aralığındadır. Bu grupta kontrol numunesi ÇA %50,69 değere sahipken, kenevir katkılı ÇAKEN %51,92 ve keten katkılı ÇAKET %52,34 toplam porozite ile yakın değerler göstermektedir. Ancak keçi kılı katkılı ÇAK numunesinde toplam porozitenin kontrol numunesine göre düşerek %40,32 oranı ölçülmüştür.

Agregasız numune grubunda aerojel katkısının toplam porozite değerini yükselttiği ortaya çıkmaktadır. Örneğin çimento su karışımından oluşan Ç' de %22,54 olan oranın aerojel ilavesiyle %50,69'a yükseldiği gözlemlenmiştir. Lif ilaveli numunelerde ise aralarındaki artış oranı kontrol numuneleri arasındaki gibi fazla olmasa da KET ve ÇAKET arasında %11,81'lik, KEN ve ÇAKEN arasında %10,71'lik, K ve ÇAK arasında ise (%1,68) önemli bir fark tespit edilememiştir. Bu bağlamda lif ilavesinin poroziteyi arttırdığı ancak aerojel kadar etkili olmadığı sonucuna ulaşılmaktadır.

Agregalı ve aerojel ilavesiz numune grubunda toplam porozite %17,12 ile %35,37

arasında değişmektedir. Bu grupta kontrol numunesi KÇ en düşük oran %17,12 iken lif ilavesiyle bu oranda artış meydana gelmiştir. Burada sıralama %27,66 ile KK, %,52 ile KKET ve %35,36 ile KKEN şeklinde olmuştur.

Agregalı ve aerojel ilaveli grupta toplam porozite %32,27 ile %36,83 arasında ölçülmüştür. Kontrol numunesindeki toplam porozite değeri %35,78 iken, kontrol numunesine göre keçi kılı (%3,51) ve kenevir lifi (%2,09) ilavesinde az miktarda düşüş gözlenirken, keten lifi (%1,05) ilavesinde ise az miktarda artış gözlenmiştir. Bu grupta en yüksek değer %36,83 ile KAKET numunesinde tespit edilmiştir.

Agregalı numune grubunda aerojel ilavesinin genel olarak toplam poroziteyi arttırdığı söylenebilir. Kontrol numunesi KÇ' ye göre KAÇ' de %18,66 oranında bir artış söz konusudur. Ancak lif ilaveli numunelerde aerojel katkısına göre belirgin bir artış gözlemlenmemiştir.

Tüm numune gruplarına bakıldığında agrega eklenmesiyle toplam porozite değerinin düştüğü sonucuna ulaşılmıştır. Örneğin ÇA numunesinde %50,69 toplam porozite değeri ölçülürken kum ilaveli KAÇ numunesinde %35,78 değeri ölçülmüştür. Benzer şekilde diğer lif ilaveli numunelerde ÇAKEN ve KAKEN arasında %18,23'lük bir fark belirlenmiştir. Buradan hareketle agrega kullanımının malzeme içi boşluklara yerleşerek porozite değerini azalttığı söylenebilir. Ancak burada göz ardı edilmemesi gereken nokta ısı yalıtımı gerektiren uygulamalar için agrega ilavesinin dezavantaj getireceğidir.

Aerojel ilavesi ile toplam porozite değeri yükseldiğinden ısı yalıtımı uygulamalarında avantaj sağlayacağı ortada olmakla birlikte basınç dayanımı açısından dezavantajı olabilmektedir. Lif katkılarının toplam porozite etkisi aerojel kadar etkili olmaması ve önemli farklar gözlenmemiştir.

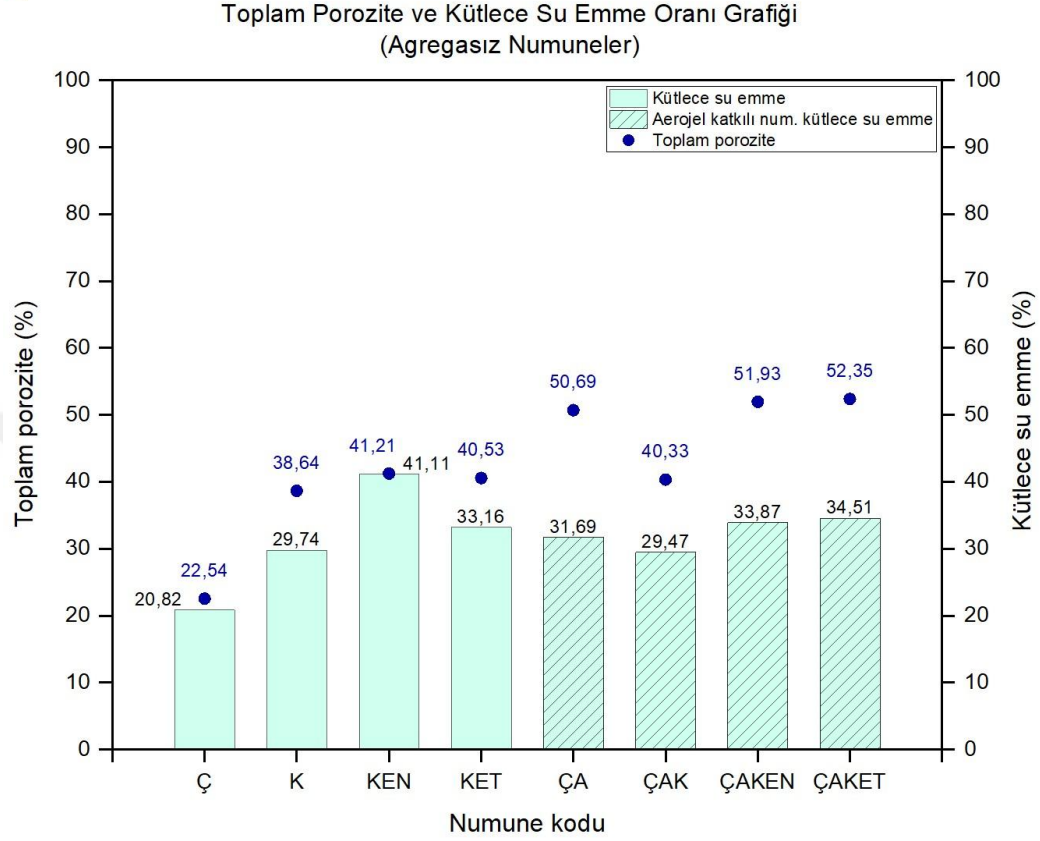
4.4.1. Porozite ve su emme ilişkisi

Toplam porozite, çimentolu kompozitlerinin içerdiği tüm gözeneklerin oranı iken bu gözeneklerin ne kadarının su ile dolabildiği kütlece su emme oranı ile ifadelendirilmektedir. Toplam porozite ve su emme oranı arasında, kompozitlerde kullanılan hammadde tipi, su ve çimento oranı, kütleme koşulları, malzemenin mikro yapısı gibi parametrelerle bağlantılı bir ilişki bulunmaktadır. Genel olarak gözeneklilik arttıkça, kompozitlerdeki su emme oranı da artmaktadır. Bu bağlamda da aralarında doğru orantılı bir bağlantı mevcuttur.

Çalışma kapsamında hazırlanan agregasız numune grubuna ait toplam porozite ve su emme oranı ilişkisi Şekil 4.30' da gösterilmektedir. Bu grupta en düşük toplam porozite ve su emme oranı Ç kontrol numunesindedir. Çimento matrisine keçi kılı eklenmesiyle birlikte porozite artmış ve bağlantılı olarak su emme yüzdesi de artmıştır. Benzer şekilde kenevir ve keten lifleri de hem poroziteyi hem de su emme oranını arttırmıştır. Ç numunesine göre tüm liflerde iki parametrede de %15 üzerinde artış meydana gelmiştir. Lifli numunelerde tüm liflerde toplam porozite yüzdesi çok yakındır. Ancak en yüksek su emme yüzdesi kenevir lifli numunede görülmüştür. Buradan hareketle kenevir liflerinin daha fazla su emdiği ve daha boşluklu bir yapıya sebep olduğu, keçi kılının ise kenevir ve ketene göre daha az su emici özellikte olduğu

söylenebilir.

2

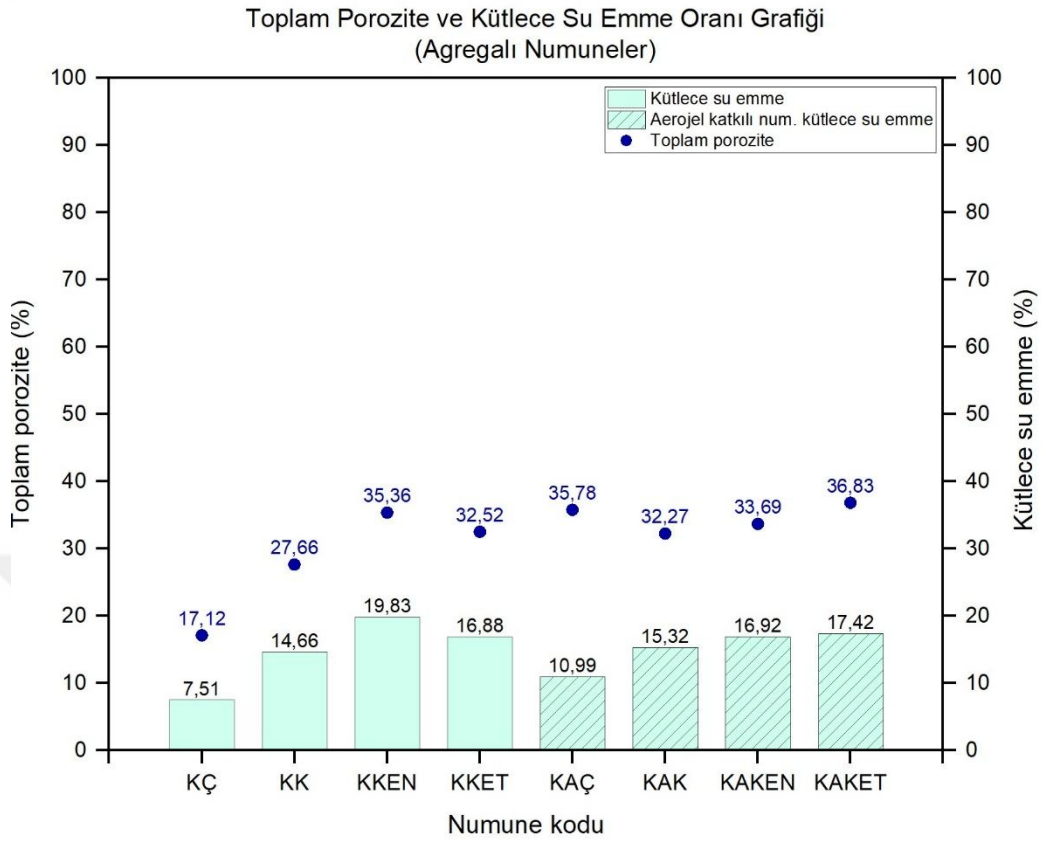


Şekil 4.30. Agregasız numunelere ait toplam porozite ve su emme oranı ilişkisi.

Agregasız ve aerojel içeren gruba bakıldığında aerojel katkısının toplam poroziteyi arttırdığı görülmektedir. Bununla birlikte ÇA kontrol numunesine göre keçi kılı katkısının karışımlar üzerindeki boşlukları azalttığı, keten ve kenevirin ise bir miktar arttırdığı görülmektedir. Ancak bu artış oranı yaklaşık %1 gibi düşük miktardadır. Aynı şekilde su emme yüzdeleri de yaklaşık olarak %2 düzeyindedir. Buradan hareketle esas belirleyicinin aerojel katkısı olduğu düşünülmektedir. Aerojel gözenekliliği artırırken hidrofobik yapısı nedeniyle su emme yüzdesini aynı oranda arttırmamıştır.

Sonuç olarak agregasız çimentolu kompozitlerde, toplam porozite ve su emme yüzdesi arasında doğrudan bir ilişki söz konusudur. Ancak aerojel ilavesi bu ilişki üzerinde önemli rol oynayarak yüksek poroziteye rağmen düşük su emme oranı sergilemekle kompozitlerin daha avantajlı hale gelmesini sağlamaktadır.

Agregalı numune grubuna ait toplam porozite ve su emme yüzdesi ilişkisini gösteren grafik Şekil 4.31’de görülebilmektedir.



Şekil 4.31. Agregalı numunelere ait toplam porozite ve su emme oranı ilişkisi.

Agregalı ve aerojel ilavesiz grupta, lif ilavesiyle birlikte hem kütlece su emme yüzdesi hem de toplam porozite artmıştır. Agregasız gruptaki ile benzer şekilde en yüksek su emme oranı ve porozite yüzdesi kenevir lifi ilavesi ile olmuştur. Yine benzer şekilde keçi kılı kontrol numunesine göre en az etkiyi göstermiştir. Hem toplam porozite hem de su emme oranı üzerinde keten ve kenevir lifi katkısı yüzdeleri arasında yaklaşık %3 gibi düşük düzeyde fark oluşmuştur. Bu grupta iki parametrede de doğrusal bir eğilim bulunmaktadır.

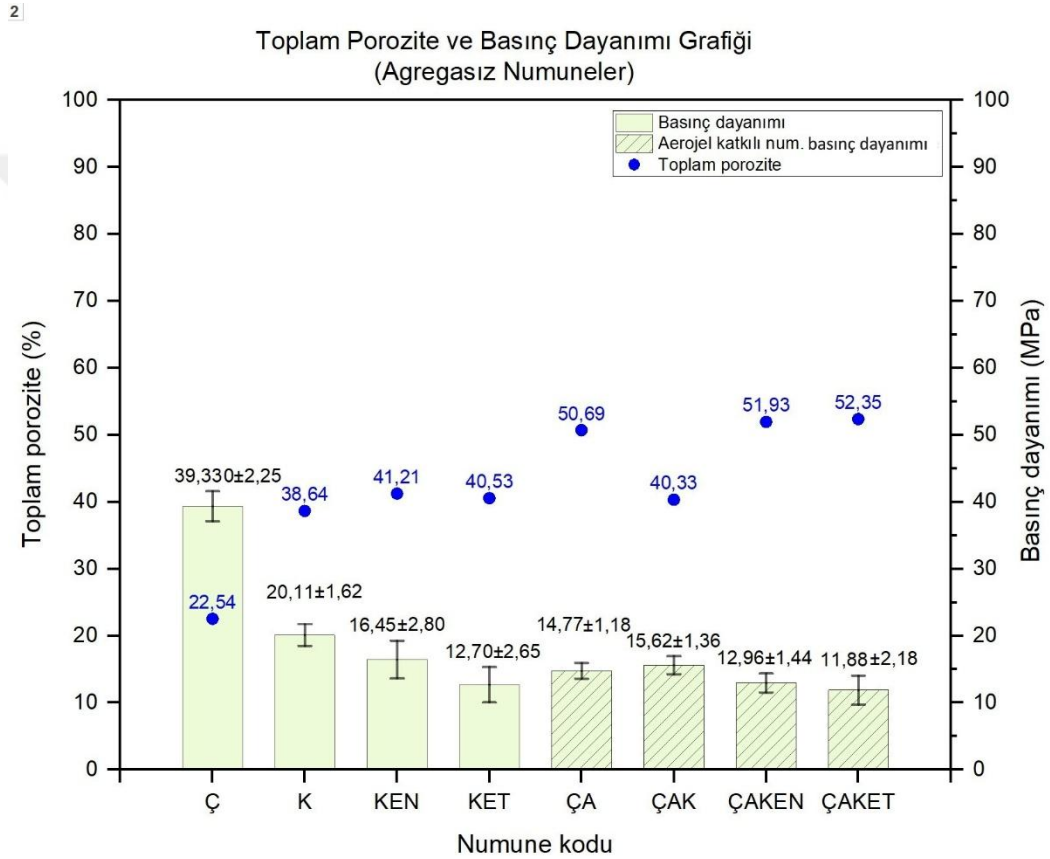
Agregalı ve aerojel ilaveli grupta, KAÇ numunesine göre lif ilavesi ile toplam porozite yüzdesinde önemli değişiklik olmamıştır. Su emme yüzdelерinde de en çok artış yaklaşık %7 ile keten katkısı ile elde edilmiştir. Lifler arasındaki fark ise yaklaşık %1 gibi düşük düzeydedir.

Agregalı numuneler, agregasız numunelere göre hem daha düşük porozite hem de düşük su emme yüzdesine sahiptir. Bu kullanılan kumun kapilariteyi sınırlayıcı etkisi ile açıklanabilmektedir. Lif katkıları poroziteyi artırarak su emme oranını yükseltmiştir. Aerojel katkısı ise poroziteyi arttırmış ancak su emme oranını azaltmıştır. Bu durum aerojelin hidrofobik yapısı ile bağlantılıdır. Dolayısıyla aerojel ilavesi iki parametre arasındaki doğrusal eğilimi kırmaktadır. Bu durum suya dayanıklı ama hafif malzemeler için olumlu karşılanmaktadır.

4.4.2. Porozite ve basınç dayanımı ilişkisi

Toplam porozite, çimento kompozitlerde basınç dayanımının belirleyici unsurlarındandır. Genel olarak porozite arttıkça basınç dayanımının azalması beklenmektedir. Ancak kompozitlerdeki katkı maddeleri, gözenek dağılımı gibi faktörler bu bağlantı arasında etkili olmaktadır.

Çalışma kapsamında hazırlanan agregasız numune grubuna ait toplam porozite ve 28 günlük basınç dayanımı ilişkisi Şekil 4.32’ de gösterilmektedir.



Şekil 4.32. Agregasız numunelere ait toplam porozite ve basınç dayanımı ilişkisi.

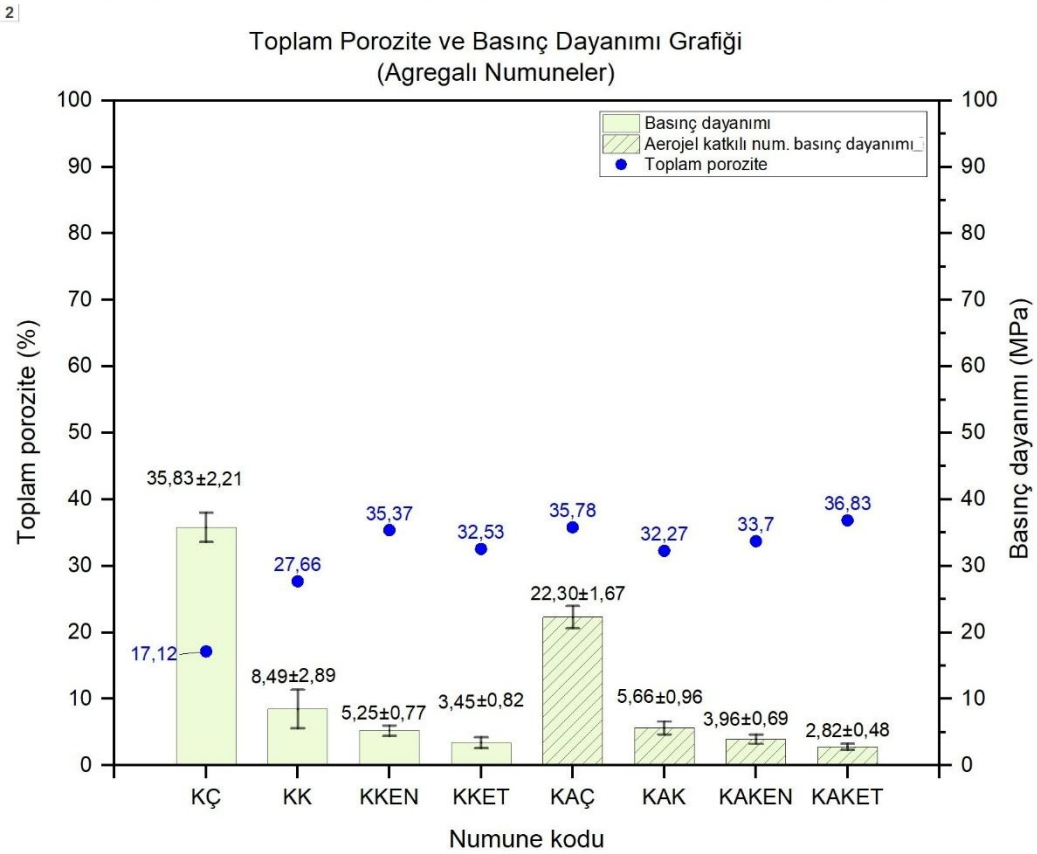
Agregasız ve arojel içermeyen grupta, Ç en düşük toplam porozite oranına ve en yüksek basınç dayanımına sahiptir. Lif katkısıyla birlikte toplam porozite değeri yükselmiş ve 28 günlük basınç dayanımı düşmüştür. Toplam porozite değeri Ç numunesine göre sırasıyla keçi kılı katkısında %16, keten lifinde %18 ve kenevir lifinde %19 artış görülmüştür. Keten ve kenevir lifinde porozite aynı değeri gösterirken basınç dayanımında kenevir ketene göre daha etkindir.

Kontrol numuneleri kıyaslandığında arojel katkısı poroziteyi ciddi anlamda

yükseltmiş ve basınç dayanımını düşürmüştür. Agregasız ve aerogel içeren grupta lif katkılı numunelerde dayanım değerleri arasında çok fark gözlenmemiştir. Burada keçi kılı içeren numunede porozite değeri düşerken basınç dayanımı değeri ise artmıştır. Keçi kılı aerogelin sağladığı gözenekli yapıyı belli oranda kapatmış ve bu da basınç dayanımında artışa sebep olmuştur.

Agregasız numunelerde beklendiği gibi toplam porozite ile basınç dayanımı arasında ters yönlü bir ilişki mevcuttur. Lif katkıları poroziteyi artırarak basınç dayanımında negatif yönde etki sağlamıştır. Aynı şekilde aerogel katkısı da poroziteyi arttırmış ve basınç dayanımını düşürmüştür.

Agregalı numune grubuna ait toplam porozite ve basınç dayanımı ilişkisinin görülebileceği grafik aşağıdadır (Şekil 4.33).



Şekil 4.33. Agregalı numunelere ait toplam porozite ve basınç dayanımı ilişkisi.

Agregalı ve aerogel ilavesiz grupta lif katkısıyla birlikte toplam porozite değeri artmıştır. KÇ numunesinde toplam porozite değeri %17,12 iken, en yüksek değer %35,37 ile kenevir katkılı numunededir. Grubun basınç dayanımı ise 35,83 MPa ve 3,45 MPa arasındadır. KÇ en düşük porozite değerinde (%17,12) 35,83 MPa basınç dayanımı

göstermiştir. Lif katkısı ile porozite artmış, bağlantılı olarak da 28 günlük basınç dayanımı düşmüştür. KK numunesinde %27,66 porozite değeri ile 8,49 MPa dayanım ölçülmüştür. Keten ve kenevir lifi katkılı numunelerde toplam porozite neredeyse aynı düzeyde olup aralarında %3 fark bulunmaktadır. Bağlantılı şekilde basınç dayanım değerleri de yakındır. Ancak basınç dayanımı lif ilavesiyle dramatik şekilde düşmüştür. Bu durum lif katkılarının matris içinde homojen dağılmadığını ve mikro çatlakların oluştuğunu dolayısıyla da yük taşıma kapasitesinin azaldığını düşündürmektedir. Özellikle keten ve kenevir lifi katkısında, liflerin çimento hamuru ile zayıf bağlantı kurması ya da liflerin homojen dağılımında sıkıntılar olduğu ve kümeleştiği ile açıklanabilir. Genel olarak bu grupta porozite artışıyla basınç dayanımı arasında beklenildiği şekilde ters orantı söz konusudur ancak lif katkılarının dayanım performansı için dikkatli kullanılması gerekliliği açıkça görülmektedir.

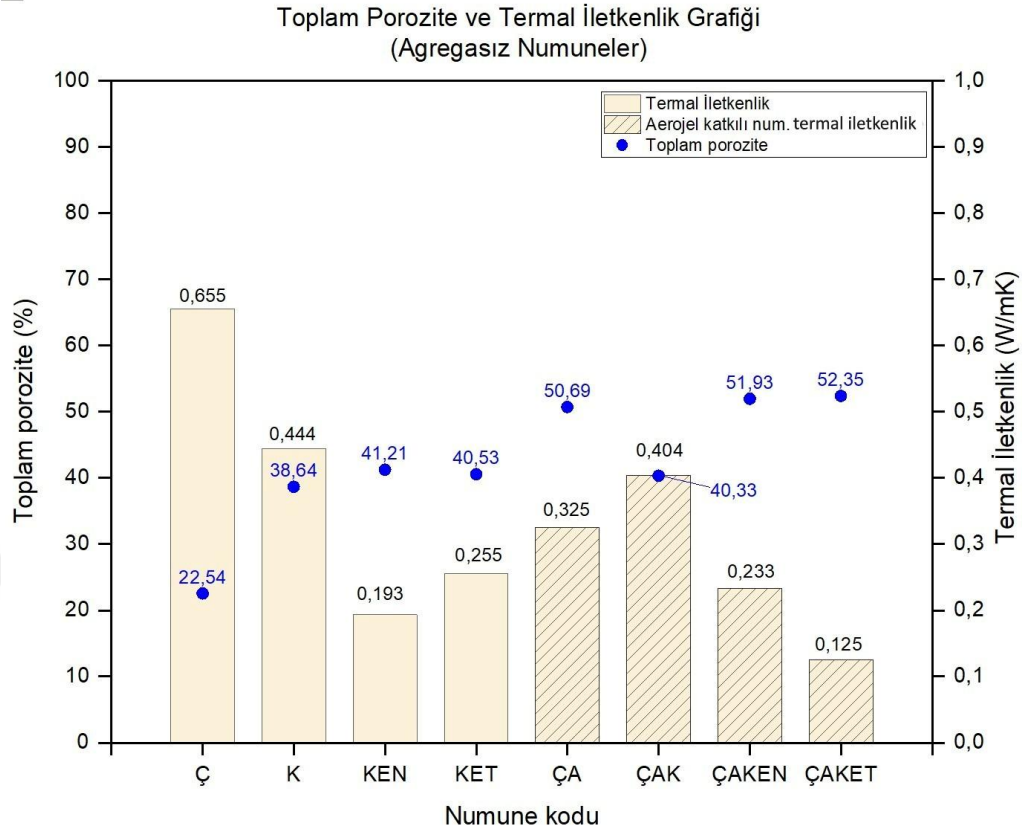
Agregalı grupta aerojel katkısı ile toplam porozite %32,27 ile %36,83 arasında yakın değerlerde olup, 28 günlük basınç dayanımı ise 2,82 MPa ile 22,30 MPa arasında geniş bir düzeye yayılmıştır. KAÇ kontrol numunesi %35,78 toplam porozite değeri ile 22,30 MPa basınç dayanımı göstermiştir. Keten lifi katkılı KAKET numunesinde en yüksek porozite (%36,83) görülürken basınç dayanımı 2,82 MPa gibi çok düşük bir seviyededir. Aynı şekilde KAKEN %33,70 toplam porozite değerinde 3,96 MPa dayanım, KAK ise %32,27 toplam porozite değerinde 5,66 MPa dayanım göstermiştir. Bu bağlamda aerojel katkısı karışımlara gözeneklilik kazandırmanın yanında yük taşıma kapasitesini zayıflatmıştır. Ayrıca lif katkıları da bu duruma dezavantaj sağlamış, liflerin matrisle bütünleşememesi çatlak oluşumunu ve ilerleyişini kolaylaştırarak basınç dayanımı üzerinde olumsuz etki etmiştir. Özetle porozite ve basınç dayanımı arasında ters orantılı ilişki beklenildiği şekilde mevcut olmakla birlikte aerojel ve lif katkısının birlikte kullanımı çok düşük dayanımlı kompozitlerin oluşmasına sebep olmuştur.

4.4.3. Porozite ve termal iletkenlik ilişkisi

Çimento bazlı ürünlerde toplam porozite sadece mekanik performansı değil, termal iletkenlik özelliklerini de etkileyen bir unsurdur. Genel olarak toplam porozite artışında termal iletkenlik katsayısının düşmesi beklenmektedir. Gözeneklerin büyük oranda hava ile dolu olması sayesinde bu durum meydana gelmektedir. Çünkü hava çimento hamuruna göre çok daha düşük termal iletkenliğe sahiptir. Kompozitlerdeki boşluklar ısı geçişini yavaşlatmaktadır. Gözeneklerin şekli, dağılımı ve matristeki bağlantılılığı doğrudan termal iletkenlik ile ilişkilidir. Örnek olarak açık ve bağlantılı gözenekli yapılar hem ısı hem de nem taşınımına izin vererek termal iletkenlikteki düşüşü sınırlı kılabilir. Bununla birlikte matrislerde kullanılan aerojel, perlit ve EPS gibi katkı maddeleri artırılmış porozite sağlar ve termal iletkenlik değerlerini daha da düşürebilmektedir. Toplam porozite artışı ısı yalıtım performansını yükseltmekte ancak mekanik dayanımı düşürmektedir. Bu bağlamda da kullanım şekline göre özellikler arasında dengeli bir bağ oluşturulmalıdır.

Çalışma kapsamında hazırlanan agregasız numune grubuna ait toplam porozite ve termal iletkenlik ilişkisi Şekil 4.34' te gösterilmektedir.

2



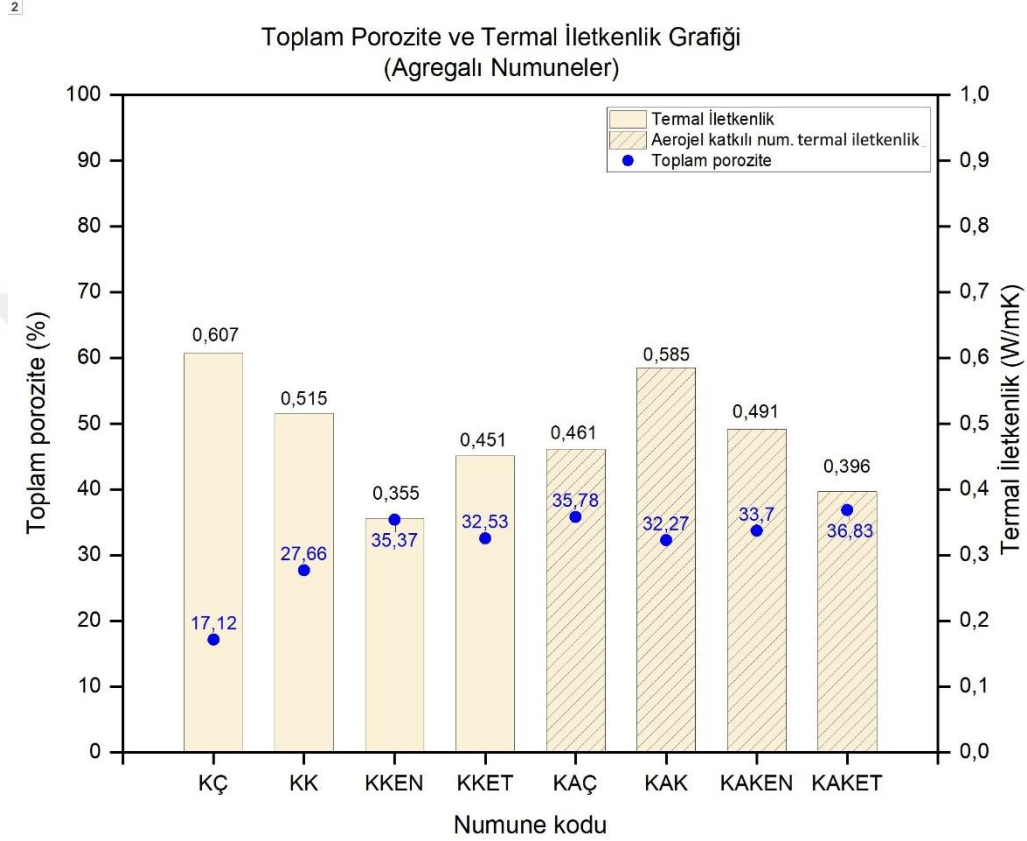
Şekil 4.34. Agregasız numunelere ait toplam porozite ve termal iletkenlik ilişkisi.

Agregasız ve aerojel ilavesiz grupta toplam porozite artışıyla termal iletkenlik değeri düşmüştür. Ç kontrol numunesinde toplam porozite %22,54 iken termal iletkenlik değeri 0,655 W/mK olup en yüksek termal iletkenlik katsayısını vermiştir. Lif katkılarıyla birlikte termal iletkenlik düşmüştür. Ç numunesine göre K numunesi toplam porozite değeri %16 artarken bunu %18 artış ile KET ve %19 artış ile KEN numunesi takip etmektedir. Buna paralel şekilde K numunesinde termal iletkenlik katsayısı 0,444 W/mK iken bunu 0,255 W/mK ile KET ve 0,193 W/mK ile KEN numunesi izlemektedir. Lif katkısı, poroziteyi artırarak ısı iletimini düşürmüştür; özellikle kenevir ve keten lifli numunelerde bu düşüş daha belirgin hale getirmiştir. Basınç dayanımında lif katkıları düşüşe sebep verse de ısı yalıtım açısından olumlu katkı sağlamaktadır.

Agregasız ve aerojel katkılı grup incelendiğinde, toplam porozite artışıyla termal iletkenlik değeri arasında beklenildiği şekilde ters orantılı bir ilişki mevcuttur. ÇA kontrol numunesi %50,69 toplam porozite ve 0,325 W/mK termal iletkenlik katsayısı değerini göstermektedir. ÇAK numunesi ise %40,33 toplam porozite oranı ve 0,404 W/mK termal iletkenlik katsayısına sahiptir. Bunları %51,93 toplam porozite ve 0,233 W/mK termal iletkenlik değeri ile ÇAKEN numunesi takip ederken, en yüksek porozite olan %52,35 ve en düşük termal iletkenlik katsayısı olan 0,125 W/mK ile ÇAKET numunesi izlemektedir. İki grupta da kendi içlerinde kenevir ve keten lifi takviyelerinin verdiği değerler oldukça yakındır. Keçi kılı ise keten ve kenevire göre daha az etkin rol oynamaktadır. Özellikle

enerji etkin kullanımı bağlamında istenen yapı ürünleri için arojel katkısı yanında lif katkılarının kullanımı olumlu karşılanmaktadır.

Agregalı numune grubuna ait toplam porozite ve termal iletkenlik ilişkisi Şekil 4.35' te gösterilmektedir.



Şekil 4.35. Agregalı numunelere ait toplam porozite ve termal iletkenlik ilişkisi.

Agregalı ve arojel ilavesiz karışımlarda da toplam porozite ve termal iletkenlik değerleri arasındaki ters orantı beklenildiği gibidir. KÇ referans numunesinde en düşük toplam porozite (%17,12) ve en yüksek termal iletkenlik katsayısı (0,607 W/mK) ölçülmüştür. Lif katkılı numunelerde porozite artışıyla termal iletkenlik katsayısı da azalmıştır. KK numunesi %27,66 toplam porozite oranına ve 0,515 W/mK termal iletkenlik katsayısına sahiptir. KKEN numunesinde %35,37 toplam porozite ve 0,355 W/mK ve KKET numunesinde %32,53 toplam porozite ve 0,451 W/mK termal iletkenlik katsayısı değerleri görülmüştür. Bu değerler, gözenekliliğin artmasının ısı iletim yollarını kesintiye uğrattığını göstermektedir. Özellikle kenevir ve keten katkısı ile elde edilen gözenekli yapı oluşturma eğilimi daha yüksektir. İki lif katkısında da porozite değerleri çok yakın olmasına rağmen keten lifi katkısında daha düşük termal iletkenlik gözlenmiştir. Keçi kılı katkılı numunelerde liflerin daha düzenli dağılması ve matrise

daha iyi bağlanması, termal iletkenlik değerlerini kenevire göre daha yüksek tutmuştur. Sonuç olarak, agregalı ve aerjel katkısız numunelerde toplam porozite ile termal iletkenlik arasında ilişkinin lifin tipi ve mikroyapısal dağılımına göre değişkenlik gösterebileceği anlaşılmaktadır.

Agregalı ve aerjel katkılı numune grubunda, %36,83 poroziteye sahip olan KAKET numunesi 0,396 W/mK termal iletkenlik değeri ile en düşük değere sahiptir. Benzer olarak KAKEN numunesi %33,70 poroziteyle 0,491 W/mK ve KAK numunesi ise %32,27 poroziteyle 0,585 W/mK iletkenlik sergilemiştir. Aerjel katkısı olmayan gruba kıyasla, bu numunelerde porozite oranları benzer seviyelerde kalmış olsa da termal iletkenlik değerlerinin genel olarak daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, aerjelin mikroyapıya kazandırdığı düşük yoğunluklu, kapalı gözenekli ve termal olarak yalıtkan yapı özelliklerinin sonucu olduğu düşünülmektedir. Aerjelin iç yapısındaki hava dolu nano-gözenekler, ısı transferini sınırlandırmakta ve termal iletkenliği düşürmektedir. Ancak, lif katkısı türleri bu etkide belirleyici olmaktadır. Örneğin, keçi kılı katkılı KAK numunesi, benzer poroziteye sahip olmasına rağmen, diğer aerjelli numunelere göre daha yüksek bir iletkenlik göstermiştir. Bu durum, lifin dağılımının ve mikroyapıda oluşturduğu bağlantı yollarının ısı geçişini kolaylaştırabileceğini göstermektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, agregalı-aerjel katkılı kompozitlerde termal yalıtım performansı porozite ile orantılı olarak artmakta, ancak katkı türlerinin mikro yapı üzerindeki etkisi bu ilişkiyi çeşitlendirebilmektedir.

4.5. Dijital Mikroskop ile Görüntüleme Analiz Sonuçları

Çalışmada üretilen numunelerin niteliksel olarak lif dağılımı, gözenek yapısı ve homojenlik gibi morfolojik özelliklerinin anlaşılabilmesi için dijital mikroskop kullanılmıştır.

Ç numunesine ait çekilen görüntü Şekil 4.36'da verilmiştir.



Şekil 4.36. Ç numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.

Çimento ve sudan oluşan numunenin yüzeyinde hafif pürüzlü bir doku ve bazı

yerlerde renk farklılıkları görülmektedir. Yüzeydeki turuncu renkli bu tonların numune içerisinde meydana gelen mineral faz değişimlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çimentonun hidratasyon sürecinde CO₂ ile reaksiyona girmesinden dolayı karbonatlaşma izi olduğu varsayılmaktadır. Bununla birlikte katkı maddesi içermediği için yüzeyde çatlak ve iri gözenek gibi yapılara rastlanmamıştır. Numune homojen yapılıdır.

K numunesinin mikroskop görüntüsü Şekil 4.37’de izlenebilmektedir. K numunesi yüzeyinin Ç’ye göre heterojen bir yapıda olduğu açıktır. Keçi kılı liflerinin çimento hamuru içinde düzensiz dağılırarak bazı alanlarda yoğunlaştığı bu bağlamda da yüzeyde gözeneklilik ve lif kaynaklı yapısal düzensizlikler olduğu tespit edilmiştir. Keçi kılı gözle görülür düzensizliklere, homojen olmayan gözenek artışına sebep olmuştur. Bazı bölgelerde lifler çimento ile tam bağlanmadan ayrık şekilde görünmektedir. Bu durumda mekanik dayanım ve su emme kapasitesi etkilenmesi olağan bir durumdur. Ayrıca izlenen koyu renkli izlerin sebebinin, kıllardan kaynaklı faz değişimi yaşanması şeklinde yorumlanmaktadır.



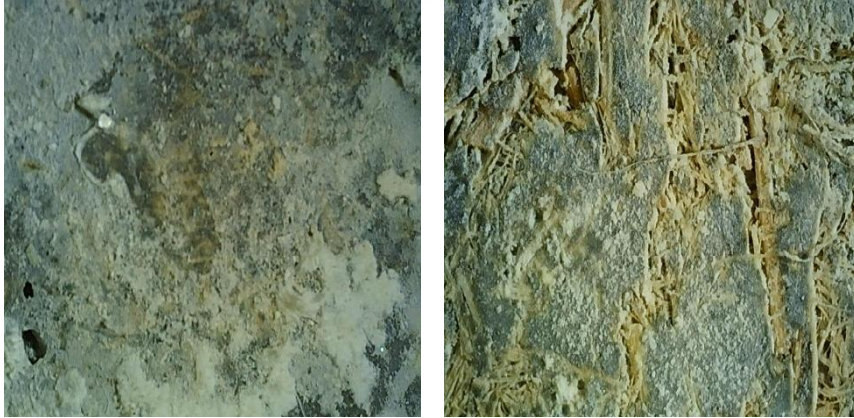
Şekil 4.37. K numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.

KEN numunesinin yüzey incelemesine bakıldığında, kenevir lifleri belirgin ve yoğundur (Şekil 4.38). Liflerin çoğu yüzeyde açıkta kalarak matris içine gömülmemiş bazı yerlerde dağınık bazı yerlerde ise demet şeklindedir. Buradan hareketle kenevir lifleri homojen dağılmadığı aynı zamanda lif çevresi oluşan boşlukların da çimento matrisine yeterince yapışmayarak ara yüzey zayıflığı olduğu sonucu çıkarılmıştır. Oluşan gözenekli yapı ısı yalıtımı açısından olumlu sonuçlar verse de mekanik dayanım olumsuz etkilenmektedir. Bunun giderilmesi için kenevir lifleri çimento matrisine katılmadan önce yüzey işlemlerinden geçirilerek çimento ile daha iyi bağlanması sağlanabilir.



Şekil 4.38. KEN numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.

Keten lifi katkısının yer yer demetler halinde yer yer dağınık şekilde olduğu, yüzeyde yakın ve çimentoya tam tutunamadığı görülmüştür. Keten lifi çevresindeki boşluk ve çatlaklar Şekil 4.39’da incelenebilmektedir. Lif yoğunluğunun yüksek olduğu alanlarda mikro gözenek oranının da arttığı, bu nedenle karışımda homojen bir yapıdan uzaklaşıldığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda, keten lifinin çimento matrisindeki davranışını iyileştirmek için kenevir lifinde de önerildiği gibi ön işleminden geçirilebilir.

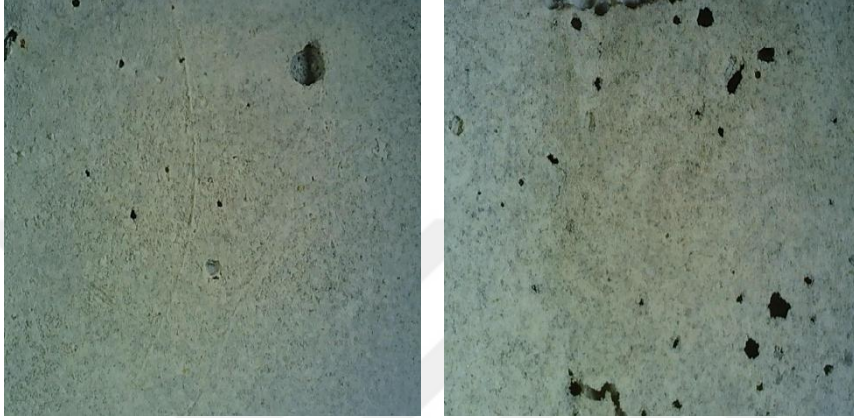


Şekil 4.39. KET numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.

Üç farklı lifin değerlendirmesi yapıldığında, keçi kılı katkılı numunede liflerin kısa ve nispeten düzgün yapıda olduğu, çimento matrisi ile daha homojen bir şekilde karıştığı gözlemlenmiş, bazı yerlerde liflerin yüzeye yakın yerleşerek etrafında gözenekler oluştuğu, ara yüzey bağının sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Buna karşılık, kenevir lifi ve keten lifi katkılı numunede liflerin daha düzensiz ve yoğun şekilde kümелendiği, bazı bölgelerde çimento ile bağ kuramadan açıkta kaldığı tespit edilmiştir. Bu lifler yapısı gereği yüksek su emme kapasitesi ve gözenekliliği artırmış bu da matrisin homojenliğini bozmuştur. Keten ve kenevir lifleri morfolojik olarak daha fazla

düzensizlik sergilemektedir.

ÇA numunesine ait görüntüler Şekil 4.40'ta verilmiştir. ÇA' nın yüzeyi genel olarak homojen görünmektedir. Aerojel katkısının gözeneklilik üzerinde belirgin bir etkisi mevcuttur. Ç numunesi ile kıyaslandığında; Ç' de yüzeyde sınırlı sayıda küçük çaplı gözenekler mevcutken ÇA' nın hem mikro hem de makro gözenekleri daha yüksek ve düzensizdir.



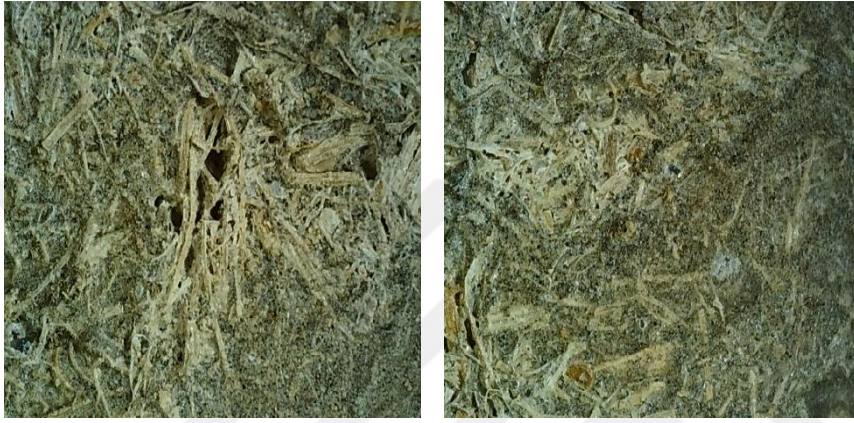
Şekil 4.40. ÇA numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.

ÇAK numunesi incelenirken aerojel içermeyen karışımlardaki gibi keçi kılının yüzeye yakın yerleştiği ve tam olarak matrise bağlanamadığı tespit edilmiştir (Şekil 4.41). Lif çevresinde zayıf arayüz etkileşimi ve oluşan gözeneklerle birlikte aerojelin gözenekli yapısı da mevcuttur. Aerojel katkısı ile oluşan gözeneklilik numuneye ısı yalıtım açısından avantaj sağlamakta, keçi kılının heterojen ve yüzeye yakın konumlanması, ara yüzeyde zayıflık ve bölgesel boşluk oluşumu gibi istenmeyen etkileri beraberinde getirmiştir. Ancak ÇA' ya göre keçi kılı ilavesinde nispeten daha az boşluk gözlenmiştir.



Şekil 4.41. ÇAK numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.

Çimento esaslı aerjel ilaveli ve keten lifi içeren ÇAKEN numunesine ait iki görüntüde de liflerin yüzeyde yoğun olarak ve karmaşık şekilde yerleştiği görülmektedir (Şekil 4.42). Kenevir lifleri matrise zayıf bir şekilde bağlanmıştır. Liflerin çevresinde oluşan boşluklar ve düzensiz gözenek yapısı, aerjelin hafifliği ve kenevir lifinin su emici özelliğiyle birlikte değerlendirildiğinde, karışımda yüksek düzeyde havanın tutulması ve gözenekliliğin artmasına neden olduğu düşünülmektedir. Aerjel etkisiyle birlikte daha yüksek poroziteli, daha hafif bununla birlikte mekanik performansın düştüğü bir kompozit oluşmuştur.



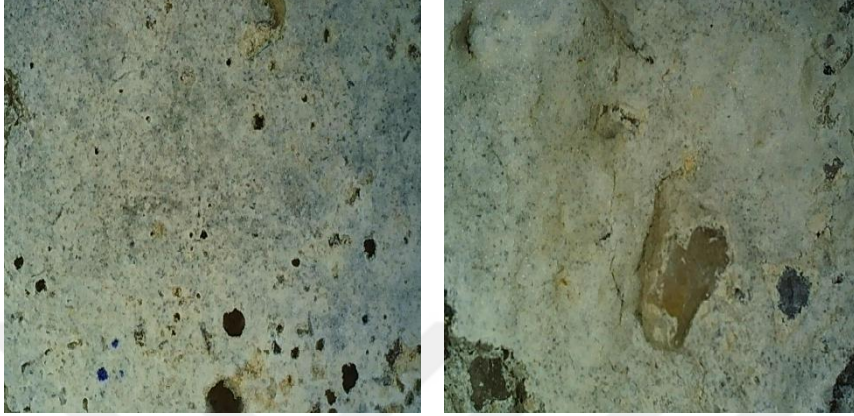
Şekil 4.42. ÇAKEN numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.

ÇAKET numunesi incelendiğinde kenevir liflerinde olduğu gibi keten liflerinde de benzer etkilerle karşılaşmıştır. Mekanik performansı etkileyen gözenekli yapılar, zayıf ara yüz bağlantıları ve liflerin düzensiz bağlanması Şekil 4.43’ de gösterilmiştir.



Şekil 4.43. ÇAKET numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.

Agregalı ve aerjel ilavesiz grupta KÇ kontrol numunesi incelendiğinde yüzeyin genel olarak homojen ve yoğun olduğu, bazı yerlerde gözeneklerin bulunduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.44). Diğer kompozitlere göre daha dengeli ve kontrollü bir yüzey yapısı vardır.



Şekil 4.44. KÇ numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.

KK numunesine ait mikroskop görüntüleri Şekil 4.45’te verilmektedir. Keçi kılıları agregalı karışımlara dağınık bir şekilde yerleşmiştir. Bazı bölgelerde yüzeyde kalmasıyla birlikte ara yüzeylerde gözenekler oluşmuştur. Bununla birlikte mekanik performansın düşmesi beklenen bir durumdur.



Şekil 4.45. KK numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.

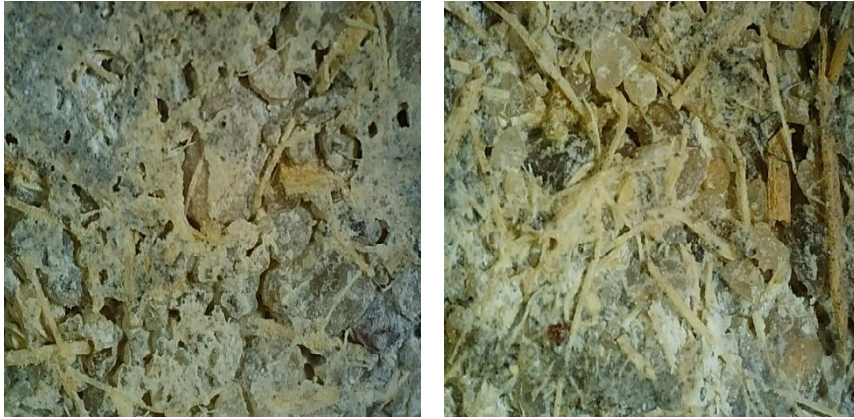
Kenevir lifi ilaveli agregalı KKEN numunesinde lifler yoğun ve dağınık yerleşmiş, kısmen yüzeyde kısmen matris içinde konumlanmıştır (Şekil 4.46). Bu durum diğer numunelerle benzer şekilde zayıf arayüz bağlantısına ve gözenekliliğe sebep

olmuştur. Lif kümelenmesiyle gözenekler genel olarak kumların arasında oluşmuştur. Böylece homojen dağılım sağlanamayıp bölgesel anlamda zayıf noktalar ortaya çıkmıştır. Bu durum gözeneklilik artışıyla birlikte ısı yalıtımında olumlu ancak mekanik dayanımda oldukça olumsuz olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4.46. KKEN numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.

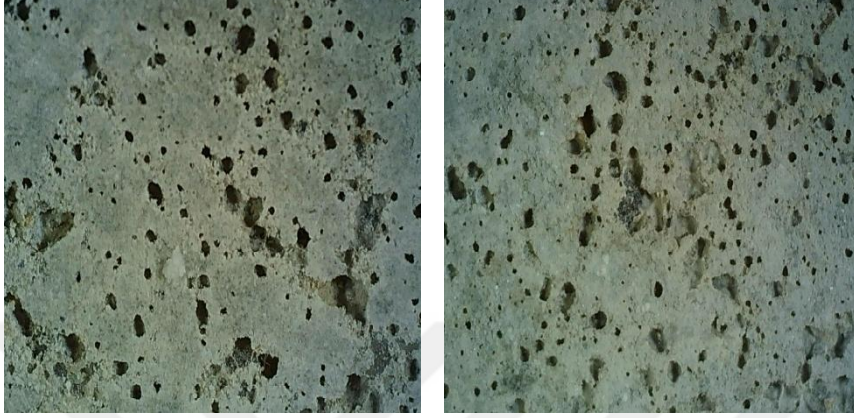
KKET numunesi ile keten liflerinin agregalı karışımlarda dağılımının gösterildiği görüntüler Şekil 4.47’dedir. Keten liflerinin dağılımı da kenevir liflerinin dağılımıyla benzer özelliktedir. Keten lifleri çevresinde oluşan boşluklar, keten liflerinin yüksek su emiciliği nedeniyle çimento hidratasyon sürecini etkilemektedir.



Şekil 4.47. KKET numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.

Agregalı ve aerjel ilaveli kontrol numunesi KAÇ’ ye ait mikroskoptan alınan görüntüler Şekil 4.48’ de yer almaktadır. Yüzey yapısında yoğun ve farklı büyüklüklerde gözenekler bulunmaktadır. Aerjelin matrise eklenmesiyle toplam porozitenin artması ve

numunenin hafiflemesi olağandır. Değişken boyutlardaki gözenekler büyük oranda yuvarlak ve düzgündür ancak yer yer birleşmiş ve düzensiz boşluklar bulunmaktadır. Burada oluşan düzensizlikler basınç dayanımı açısından zayıf alanlar oluşturabilmektedir.



Şekil 4.48. KAÇ numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.

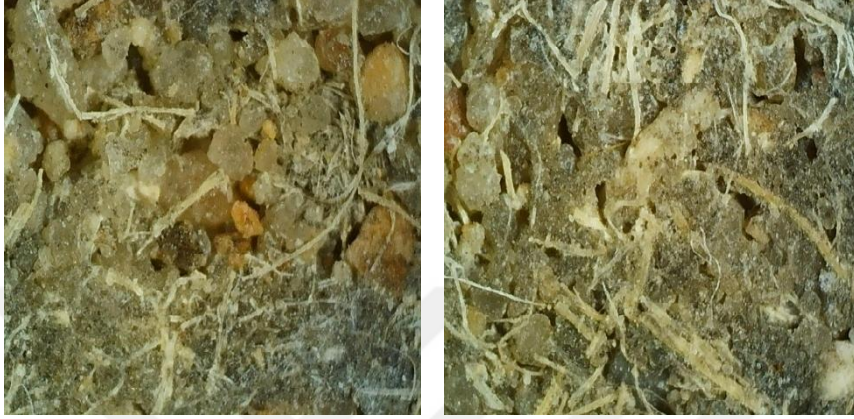
Bu gruptaki keçi kılı takviyesi diğer keçi kılı takviyeli numunelerde olduğu gibi KAK numunesinde de benzer etkileri sergilemektedir (Şekil 4.49). Keçi kılı matrise ince ve dağınık şekilde dahil olmuştur. Yer yer yüzeyde yer yer ise kum taneleri arasındaki boşluklara yerleşmiştir. Bu durumda toplam gözeneklilik bir miktar düşmektedir. Keçi kılının homojen dağılmamasından kaynaklanan ara yüzey bağlantılarındaki zayıflıklar mekanik dayanımını azaltmaktadır.



Şekil 4.49. KAK numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.

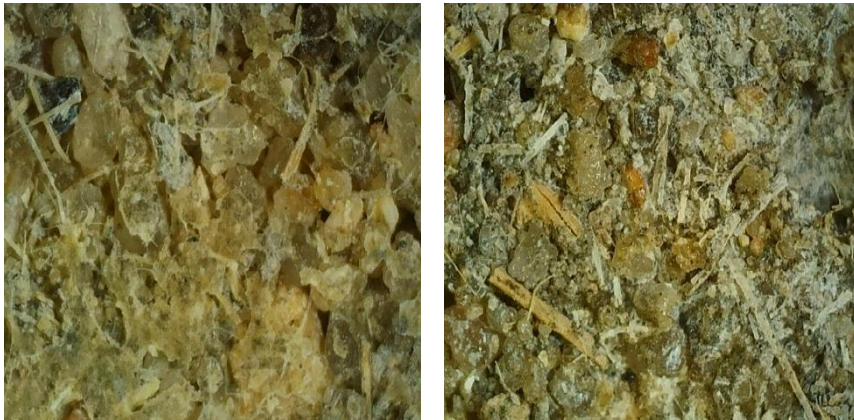
KAKEN numunesi görüntüleri incelendiğinde diğer gruplarda olduğu gibi zayıf

arayüzey etkileşimi ve düşük mekanik performans mevcuttur (Şekil 4.50). Aerojel katkısıyla oluşan yüksek gözeneklilik yoğunluğu düşürmüştür. Kenevir liflerinin bazı bölgelerde matris içi bağı güçlendirdiği ve bu sebeple de toplam porozite üzerinde az da olsa düşme sağladığı görülmüştür. Aerojel etkisi ile de termal iletkenlik değeri potansiyeli bulunan numunede mekanik dayanım açısından olumsuz etki söz konusudur.



Şekil 4.50. KAKEN numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.

KAKET numunesi görüntüsünde keten liflerinin karışımda düzensiz, yönsüz ve çoğunlukla yüzeye yakın yerleşmiştir (Şekil 4.51). Keten liflerinin bir kısmı matris içine uyum sağlamışken bazıları ayrılmış olarak görünmektedir. Lif ve kum çevresi gözenekli lif dağılımı heterojendir. Bu durum diğer numunelerdeki gibi bölgesel zayıflıklara sebebiyet vermektedir. Aerojelin katkısıyla gözeneklilik yüksektir. Matrisin bağlayıcılığı, özellikle liflerin etrafında yeterli düzeyde gerçekleşmemiş, bu da boşluklu ve parçalanmış yüzeyler oluşturmuştur. Keten liflerinin etkili olabilmesi için liflerin ön işlemden geçirilmesi ve karışımda kıvam artırıcı katkıların kullanılması önerilmektedir.



Şekil 4.51. KAKET numunesi mikroskop altındaki görüntüsü.

Özetle aerojel katkısının gözenekliliği arttırdığı, liflerin ise karışımın viskozitesini azaltarak homojen dağılımı zorlaştırdığı düşünülmektedir. Tüm numunelerde lifler ve çimento matrisi arasında zayıf bağlanma görölmüş bu durum da lif çevrelerinde boşlukların oluşmasına ve sürekliliğin bozulmasına yol açmıştır. Tek başına çimento pastasında agrega kullanımında homojen bir yapı olsa da lif ilavesiyle birlikte liflerin agregalar arasında yığılmaya sebep olduğu ve mekanik dayanımı zayıflattığı tespit edilmiştir.



5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasından elde edilen veriler ışığında sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Çalışmada çevreci ve enerji etkin kullanım amacıyla alternatif ısı yalıtım malzemesi ortaya çıkarmak için, yöresel mimari malzemeleri (keçi kılı, kenevir ve keten lifi) ve nanoteknoloji ürünü aerojel ilave edilerek çimento esaslı kompozitler üretilmiştir. Üretilen numuneler agregalı ve agregasız, aerojel ilaveli ve ilavesiz olmak üzere gruplandırılmıştır. Toplam 16 adet numuneye fiziksel testler, basınç dayanımı testi ve termal iletkenlik testi uygulanmış olup, kontrol numunelerine göre yüzdece değişim oranları Çizelge 5.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1. Numunelere ait özelliklerin yüzdece değişim oranları.

Num. grubu	Numune kodu	Toplam porozite %	% Değişim	Termal iletkenlik (W/mK)	% Değişim	Basınç dayanımı (MPa)	% Değişim
Agregasız	Aerojelsiz	Ç	22,54	0	0,655	0	39,33
		K	38,64	71	0,444	-32	20,11
		KEN	41,21	83	0,194	-70	16,45
		KET	40,53	80	0,255	-61	12,70
	Aerojelli	ÇA	50,69	0	0,326	0	14,77
		ÇAK	40,33	-20	0,404	24	15,62
		ÇAKEN	51,93	2	0,233	-28	12,96
		ÇAKET	52,35	3	0,126	-61	11,88
Agregalı	Aerojelsiz	KÇ	17,12	0	0,607	0	35,83
		KK	27,66	62	0,515	-15	8,49
		KKEN	35,37	107	0,355	-41	5,25
		KKET	32,53	90	0,451	-26	3,45
	Aerojelli	KAC	35,78	0	0,461	0	22,30
		KAK	32,27	-10	0,585	27	5,66
		KAKEN	33,70	-6	0,491	7	3,96
		KAKET	36,83	3	0,396	-14	2,82

Agregasız ve aerojel içermeyen grupta lif katkılarıyla; toplam porozitenin önemli ölçüde (%71-83) arttığı, termal iletkenlik değerinin (%32-70) düştüğü ve bu düşüşün kenevir ve keten liflerinde yüksek oranda olduğu, basınç dayanımındaysa ciddi düşüşler (%49-68) meydana geldiği tespit edilmiştir.

Agregasız ve aerojel içeren grupta keçi kılı katkısı hariç diğer liflerde toplam porozitenin yükseldiği, poroziteyle bağlantılı olarak en iyi termal performansı %61 oranında düşüşle keten lifi ilaveli numunenin gösterdiği belirlenmiştir. Basınç dayanımında ÇAKET numunesinde %20’lik bir azalma mevcuttur.

Agregalı ve aerojel içermeyen grupta lif katkılarıyla; toplam porozitenin %62 ile %107 oranında ciddi şekilde yükseldiği, termal iletkenliğin %15 ile %41 oranında

azaldığı, basınç dayanımında ise %75 ile %87 oranında dramatik bir düşüş sergilediği görülmektedir.

Agregalı ve aerjel içeren grupta toplam porozitede lif katkılarının önemli bir değişikliğe sebep olmadığı, bununla bağlantılı olarak termal iletkenlik değerinin sadece keten lifi içeren numunede %14 oranında azaldığı ancak basınç dayanımında da en fazla düşüşün bu numunede olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışma kapsamında üretilen numunelerde agreganın etkileri şu şekildedir:

- Kullanılan kum, özellikle aerjel içermeyen karışımlarda çimento matrisinin yapısal bütünlüğünü desteklemiş bunun yanında karışıma hacim kazandırmıştır.
- Karışımda homojen dağılımla basınç dayanımı artmaktadır.
- Agregasız numunelere göre daha düşük porozite ve düşük su emme yüzdesi sergilemektedir.
- Toplam porozite oranı düşmesiyle birlikte termal performans düşmektedir.
- Lif eklendiğinde, kum taneleri arasında topaklanma ve yığılma görülmüştür. Bu bağlamda da çimento pastasının boşluklara yerleşmesi zorlaşmış ve dayanım önemli ölçüde azalmıştır.

Aerjelin etkileri aşağıdaki gibi belirtilebilir:

- Porozite üzerinde önemli rol oynayarak toplam poroziteyi arttırmakta ve numunelerin yoğunluğu da düşmektedir.
- Artan gözeneklilikle birlikte termal iletkenlik azalmaktadır.
- Yüksek poroziteye rağmen su emme oranı daha sınırlıdır. Bu durum aerjelin hidrofobik yapısıyla ilişkilendirilmektedir.
- Aerjel kullanımı basınç dayanımını üzerinde olumsuz etkiye sahiptir.

Lif kullanımının etkileri aşağıdaki gibidir:

- Her üç lif türü de çimento matrisinde belirli mikroyapısal değişimlere neden olmuş, ancak keçi kılı katkısı en homojen lif dağılımını gösterirken; kenevir ve keten lifi ile çimento pastası arasındaki bağ zayıf kalmıştır. Bu durum özellikle lif çevresindeki boşlukların artmasına ve yapısal sürekliliğin bozulmasına neden olmuştur.
- Gözeneklilik artışıyla birlikte su emme oranı da artmıştır.
- Kenevir ve keten lifleri benzer özellikler sergilemiş, fiziksel ve mekanik performansta önemli bir ayrışma olmamıştır.
- Tüm lif katkılarında porozite artışıyla birlikte termal iletkenlik düşmüştür. Kenevir ve keten lifleri keçi kılına göre daha iyi performans göstermiştir.

- Üç lif türünde de basınç dayanımı düşmüştür. Özellikle agregalı numunelerde düşüş dramatik şekildedir. Homojen dağılımla ilişkili olarak keçi kılı basınç dayanımı üzerinde daha etkin kenevir ve keten lifleri ise daha düşük performans sergilemiştir.

Sonuç olarak; aerojel katkısı ısı yalıtımı açısından önemli role sahiptir. Aerojel ve lif katkısının birlikte kullanımı homojen dağılım açısından zor olmakta ve basınç dayanımı bakımından dikkatle tasarlanma gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. Bu bağlamda termal iletkenliğin ön planda olduğu mekanik performans gerektirmeyen yapısal elemanlarda kullanımı tercih edilmelidir. Benzer şekilde agrega ve lif kombinasyonlarında da mekanik performans için karışım oranları optimize edilmelidir. Buradan hareketle bu çalışmada elde edilen verilere göre üretilen numunelerin taşıyıcı olmayan hafif yapı malzemeleri olarak, sıva ve harç şeklinde kullanımı sağlanabilir.

Tüm bunlara ek olarak, çalışmada kullanılan lifler hazır olarak üretim tesislerinden temin edilmiştir. Özellikle keten lifi gibi tekstil sektöründe de yaygın kullanıma sahip ve pahalı olan liflerin direk kullanımı yerine tekstil artığı olarak temin edilip yapı uygulamalarında kullanımı çevresel etki bağlamında çok değerli bulunmaktadır. Ayrıca homojen dağılım için liflerin küçük parçalar haline getirilmesi zaman ve enerji kullanımı açısından çalışmanın sınırlılıklarından biridir. Tekstil artığı olarak zaten küçük parçalar halinde temin edilen liflerle yaşam döngüsü üretim aşamasındaki sınırlılık, süre, maliyet ve enerji tüketimi yönünden avantaj sağlanacaktır.

Araştırmada karşılaşılan sınırlılıkların biri de aerojelin pahalı ve erişiminin zor olmasıdır. Ancak elde edilen verilerden anlaşıldığı üzere, aerojelin ısı yalıtım açısından gösterdiği performans yüksek ve etkilidir. Bu bağlamda diğer yaygın kullanılan ısı yalıtım malzemelerine kıyasla aerojel kullanımının ilk yatırım maliyeti yüksek olsa bile gerek hafif ve boşluklu yapısı gerek hidrofobik olması sebebiyle kullanım ömrü ve etkinliği düşünüldüğünde maliyet olarak da avantajlı hale gelmektedir. Ancak aerojel konusunda Türkiye'deki yapı sektörü kullanıcılarının daha fazla bilgilendirilmesi ve kullanımının daha yaygınlaştırılması gerekmektedir.

Çalışmada elde edilen verilere göre, karışım oranları ve kullanılan aerojel ve lif miktarına bağlı olarak, ISO ve CEN tarafından belirtilen ısı iletim katsayısı değerine (0,065 W/mK) ulaşamamıştır; ancak çimento kompozitlerine göre bu değere yaklaşım söz konusudur. Bu bağlamda alternatif ısı yalıtım malzemesi üretiminde bir öneri ortaya çıkmıştır. Sonraki araştırmalar için ortaya çıkan veriler önemlidir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda kullanılabilecek bazı öneriler aşağıda verilmektedir:

- Lif kullanım oranını arttırmak, daha homojen bir dağılım sağlamak ve daha hafif harç karışımları oluşturmak için liflerin toz haline getirilmesinin olumlu katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Ancak liflerin parçalanması mekanik dayanım için dezavantaj olacağından hangi amaçla kullanılacağı önem kazanmaktadır.

- Çalışmanın devamı olacak şekilde doğal liflerin daha etkili kullanılabilmesi ve çimento matrisine daha iyi tutunabilmesi için liflerin kimyasal ön işlemden geçirilmesi söz konusu olabilir.

- Termal performansın artırılması için aerojel oranı arttırılabilir.

- Çalışmada kullanılan çimento ile birlikte farklı bağlayıcı türleri de karışımlara eklenip, matris dağılım dengesine bakılarak performans değerlendirmesi yapılabilir.
- Üretilen numunelere yangın dayanımı ve akustik performans analizi gibi deneysel ölçümlerde bulunulabilir.
- Tüm yaşam döngüsü süreçlerini kapsayan etki değerlendirmesi yapılması, ortaya çıkan malzemenin hem insan sağlığı üzerindeki hem de çevre etkilerinin somut verilere ulaştırılması bağlamında etkili bir yol olacaktır.



6. KAYNAKLAR

- Aamr-Daya, E., Langlet, T., Benazzouk, A., Quéneudec, M. 2008. Feasibility study of lightweight cement composite containing flax by-product particles: Physico-mechanical properties. *Cement and Concrete Composites*, 30(10): 957-963.
- Abbas, N., Khalid, H. R., Ban, G., Kim, H. T., & Lee, H. K. 2019. Silica aerogel derived from rice husk: an aggregate replacer for lightweight and thermally insulating cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 195: 312-322.
- Adhikary, S. K., Rudžionis, Ž., & Vaičiukynienė, D. 2020. Development of flowable ultra-lightweight concrete using expanded glass aggregate, silica aerogel, and prefabricated plastic bubbles. *Journal of Building Engineering*, 31: 101399.
- Adıgüzel, D. 2019. Çimento hamurunun yüksek sıcaklık dayanımına farklı katkı maddelerinin etkisinin termal analiz cihazları yardımıyla belirlenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, 73 s.
- Ahmed, A., Qayoum A., Mir, F.Q. 2019. Investigation of the thermal behaviour of the natural insulation materials for low temperature regions. *Journal of Building Engineering*, 26: 100849.
- Al Zaidi, A. K. A., Demirel, B., & Atis, C. D. 2019a. Effect of different storage methods on thermal and mechanical properties of mortar containing aerogel, fly ash and nano-silica. *Construction and Building Materials*, 199: 501-507.
- Al Zaidi, I. K., Demirel, B., Atis, C. D., & Akkurt, F. 2019b. Investigation of mechanical and thermal properties of nano SiO₂/hydrophobic silica aerogel co-doped concrete with thermal insulation properties. *Structural Concrete*, 21(3): 1123-1133.
- Alkan, A. 2021. Kenevir ürünlerinin çimentolu kompozitlerde kullanımı. Yüksek lisans doktora tezi, Yozgat Bozok Üniversitesi, Yozgat, 56 s.
- Al-Mohamadawi, A., Benhabib, K., Dheilly, R. M., & Goullieux, A. 2016. Influence of lignocellulosic aggregate coating with paraffin wax on flax shive and cement-shive composite properties. *Construction and Building Materials*, 102: 94-104.
- Arnaud, L., & Gourlay, E. 2012. Experimental study of parameters influencing mechanical properties of hemp concretes. *Construction and building materials*, 28(1): 50-56.
- Arslan, M. A. ve Aktaş, M., 2018. İnşaat sektöründe kullanılan yalıtım malzemelerinin ısı ve ses yalıtımı açısından değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 21(2): 299-320.
- Aruntaş H. Y., Şahinöz M. ve Dayı M., 2021. Çimento hamur ve harçlarında kireç kullanımının incelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 24(3): 1045-1054.
- Avcioğlu, S. 2017. Yoğunluk ölçümü deneyi föyü. Deney föyü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun, 62 s.
- Awwad, E., Mabsout, M., Hamad, B., Farran, M. T., & Khatib, H. 2012. Studies on fiber-reinforced concrete using industrial hemp fibers. *Construction and Building Materials*, 35: 710-717.
- Ayçam, İ. ve Tuna, M. 2010. Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu, 26-28

Mayıs, Ankara.

- Aydın, I., 2010. Binalarda Uygulanan Isı Yalıtım Sistemlerinin Karşılaştırılması. Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 342 s.
- Baetens R, Jelle B.P, Thue J.V, Tenpierik M.J., Grynning S, Uvsløkk S, Gustavsen A, 2010. Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. *Energy and Buildings*, 42(2): 147-172
- Balčiūnas, G., Pundienė, I., Lekūnaitė-Lukošiūnė, L., Vėjelis, S., & Korjakins, A. 2015. Impact of hemp shives aggregate mineralization on physical–mechanical properties and structure of composite with cementitious binding material. *Industrial Crops and Products*, 77: 724-734.
- Baş, C. Ö. 2023. Kalsine Marn Katkılı Çimento İçeren Polipropilen Esaslı Mikro ve Makro Sentetik Lif Takviyeli Harçların Özellikleri. Yüksek lisans tezi, Ordu Üniversitesi, Ordu, 82 s.
- Bayer, G., 2006. Binalarda uygulanan ısı yalıtım sistemleri ve örnek bir projede ısı yalıtım maliyet analizi. Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 104 s.
- Berardi, U., Iannace, G. 2015. Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications. *Building and Environment*, 94: 840-852.
- Bostancı, L. 2020. Silika Aerogel katkılı Alkali-Aktive Edilmiş Uçucu Kül Harçlarının Mekanik, Por Yapısı ve Mikro Yapı Özellikleri. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2): 588-608.
- Bostancı, L., & Sola, O. C. 2018. Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Aerogel-Incorporated Alkali-Activated Slag Mortars. *Advances in Civil Engineering*, 4156248.
- Bostancı, L., Ustundag, O., Sola, O. C., & Uysal, M. 2019. Effect of various curing methods and addition of silica aerogel on mortar properties. *Grđevinar*, 71(08): 651-661.
- Bostanci, L. 2018. Mechanical properties and thermal conductivity of aerogel incorporated alkali-activated slag mortars. *Advances in Civil Engineering*, 4156248.
- Bozasky, D. 2010. The historical development of thermal insulation materials, *Periodica Polytechnica*, 41(2):49-56.
- Brevet, H., Dheilily, R. M., Montrelay, N., Houessou, K. J., Petit, E., & Goullieux, A. 2024. Effects of Flaxseed Mucilage Admixture on Ordinary Portland Cement Fresh and Hardened States. *Applied Sciences*, 14(9): 3862.
- Brzyski, P., Barnat-Hunek, D., Suchorab, Z., & Łagód, G. 2017. Composite materials based on hemp and flax for low-energy buildings. *Materials*, 10(5): 510.
- Buratti C, Belloni E, Merli F, Zinzi M, 2021. Aerogel glazing systems for building applications: A review. *Energy and Buildings*, 231: 110587.
- Candamano, S., Crea, F., Coppola, L., De Luca, P., & Coffetti, D. 2021. Influence of acrylic latex and pre-treated hemp fibers on cement based mortar properties. *Construction and Building Materials*, 273: 121720.

- Collet, F., & Pretot, S. 2014. Thermal conductivity of hemp concretes: Variation with formulation, density and water content. *Construction and building materials*, 65: 612-619.
- Çelik, Ç. 2003. Yerfıstığı kabuğunun agrega olarak kullanım olanaklarının araştırılması. Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 183 s.
- Çelikten, S. 2019. Alkali ile aktive edilmiş hafif betonların özelliklerinin araştırılması. Doktora tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, 212 s.
- Çomak, B., Bideci, A., & Bideci, Ö. S. 2018. Effects of hemp fibers on characteristics of cement based mortar. *Construction and Building Materials*, 169: 794-799.
- Çöl, F., 2020. Isı Yalıtımı Açısından Konvansiyonel Malzemelerle Nanoteknolojik Malzemelerin Karşılaştırılması. Yüksek lisans tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi, İstanbul, 140 s.
- D.J. Oldham, C. Egan, R. Cookson., 2011. Sustainable acoustic absorbers from the biomass. *Applied Acoustics*, 72: 350-363.
- De Bruijn, P. B., Jeppsson, K. H., Sandin, K., & Nilsson, C. 2009. Mechanical properties of lime-hemp concrete containing shives and fibres. *Biosystems engineering*, 103(4): 474-479.
- De Fátima Júlio, M., Soares, A., Ilharco, L. M., Flores-Colen, I., & de Brito, J. 2016. Aerogel-based renders with lightweight aggregates: Correlation between molecular/pore structure and performance. *Construction and Building Materials*, 124: 485-495.
- Del Valle-Zermeño, R., Aubert, J. E., Laborel-Préneron, A., Formosa, J., & Chimenos, J. M. 2016. Preliminary study of the mechanical and hygrothermal properties of hemp-magnesium phosphate cements. *Construction and Building Materials*, 105: 62-68.
- Demir, İ., & Doğan, C. 2020. Physical and mechanical properties of hempcrete. *Open Waste Manag.* 13(1): 26-34.
- Dhakal, U., Berardi, U., Gorgolewski, M., & Richman, R. 2017. Hygrothermal performance of hempcrete for Ontario (Canada) buildings. *Journal of cleaner production*, 142: 3655-3664.
- Fernea, R., Manea, D. L., Plesa, L., Iernuțan, R., & Dumitran, M. 2019. Acoustic and thermal properties of hemp-cement building materials. *Procedia Manufacturing*, 32: 208-215.
- Fic, S., Brzyski, P., & Szeląg, M. 2013. Composite based on foam lime mortar with flax fibers for use in the building industry. *Ecological Chemistry and Engineering*, 20(7-8): 899-907.
- Gao, T., Jelle, B. P., Gustavsen, A., & Jacobsen, S. 2014. Aerogel-incorporated concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*, 52: 130-136.
- Gencil, O., Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Benli, A., Martinez-Barrera, G., Brostow, W., Tek, M., Bodur, B. 2021. Characteristics of hemp fibre reinforced foam concretes with fly ash and Taguchi optimization. *Construction and Building Materials*, 294: 123607.

- Gonzalez-Lopez, L., Claramunt, J., Haurie, L., Ventura, H., & Ardanuy, M. 2021. Study of the fire and thermal behaviour of façade panels made of natural fibre-reinforced cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 302: 124195.
- Göre, M. and O. Kurt, 2021. Bitkisel Üretimde Yeni Bir Trend: Kenevir. *International Journal of Life Sciences and Biotechnology*. 4(1): 138-157
- Görhan, G., & Kürklü, G. 2015. Farklı Sınıf Çimento Harcı Üretiminde Metakaolin Katkısı Kullanımının Araştırılması. *International Journal of Engineering Research and Development*, 7(3): 7-14.
- Gündüz, L. G. ve Atalayer, G. 2019. Kıl dokuma ile kültürel mirası geleceğe aktarmak üzerine deneysel bir çalışma. *Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Dergisi*, 4(2): 322-332.
- Hamzaoui, R., Guessasma, S., Mecheri, B., Eshtiaghi, A. M., & Bennabi, A. 2014. Microstructure and mechanical performance of modified mortar using hemp fibres and carbon nanotubes. *Materials & Design*, 56: 60-68.
- Hanif, A., Diao, S., Lu, Z., Fan, T., & Li, Z. 2016. Green lightweight cementitious composite incorporating aerogels and fly ash cenospheres–Mechanical and thermal insulating properties. *Construction and Building Materials*, 116: 422-430.
- İrklı Eryıldız, D. ve Başkaya, A., 2000. Saman Balyası ile Yapılanma: Kırıkkale-Hasandede’de Bir Prototipin Yapımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 15(2): 87-104.
- Jayaseelan, J., Vijayakumar, K. R., Ethiraj, N., & Sivabalan, T. 2017. The effect of fibre loading and graphene on the mechanical properties of goat hair fibre epoxy composite. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 282: 012018.
- Juradin, S., Boko, I., Grubeša, I. N., Jozić, D., & Mrakovčić, S. 2021. Influence of different treatment and amount of Spanish broom and hemp fibres on the mechanical properties of reinforced cement mortars. *Construction and building materials*, 273: 121702.
- Kanıt, R., & Işık, N. S. 2004. Horosan harcı kullanılarak yapılan model kemerin performansının deneysel ve sayısal olarak belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, 7(2): 179-183.
- Kaplan, G., & Bayraktar, O. Y. 2021. The effect of hemp fiber usage on the mechanical and physical properties of cement based mortars. *Res. Eng. Struct. Mater*, 7: 245-258.
- Kara, C. 2020. Nano SiO₂ Katkılı Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 19: 247-253.
- Karşın, N. 2022. Kenevirin Yapı Malzemesi Olarak Beton Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. Yüksek lisans tezi, Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, 53 s.
- Kayır, M. 2021. Aerojel yalıtım malzemesi üretimi ve karakteristik özelliklerinin belirlenmesi. Yüksek lisans tezi, Batman Üniversitesi, Batman, 75 s.

- Khamidi, M. F., Glover, C., Farhan, S. A., Puad, N. H. A., & Nuruddin, M. F. 2014. Effect of silica aerogel on the thermal conductivity of cement paste for the construction of concrete buildings in sustainable cities. *WIT Transactions on The Built Environment*, 137: 665-674.
- Khazma, M., Goullieux, A., Dheilly, R. M., & Quéneudec, M. 2012. Coating of a lignocellulosic aggregate with pectin/polyethylenimin mixtures: Effects on flax shive and cement-shive composite properties. *Cement and Concrete Composites*, 34(2): 223-230.
- Kırbıyık E., 2012. Ses ve ısı yalıtımlı ekolojik yapı malzemelerinin incelenmesi ve Trakya bölgesinde yetiştirilen ayçiçeği bitkisinin yalıtım malzemesi olarak araştırılması. Yüksek lisans tezi, Trakya Üniversitesi, Edirne, 76 s.
- Kim, S., Seo, J., Cha, J., & Kim, S. 2013. Chemical retreating for gel-typed aerogel and insulation performance of cement containing aerogel. *Construction and Building Materials*, 40: 501-505.
- Kocagül M., 2013. Isı yalıtımında ideal yalıtım malzemesi kullanılmasının deneysel araştırılması. Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 90 s.
- Kouta, N., Saliba, J., & Saiyouri, N. 2020. Effect of flax fibers on early age shrinkage and cracking of earth concrete. *Construction and Building Materials*, 254: 119315.
- Kouta, N., Saliba, J., & Saiyouri, N. 2021. Fracture behavior of flax fibers reinforced earth concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 241: 107378.
- Langlet, T., Aamr-Daya, E., Benazzouk, A., Dheilly, R. M., & Queneudec, M. 2007. The suitability of utilising flax by-product materials for lightweight cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 30: 957-963.
- Li, P., Wu, H., Liu, Y., Yang, J., Fang, Z., & Lin, B. 2019. Preparation and optimization of ultra-light and thermal insulative aerogel foam concrete. *Construction and Building Materials*, 205: 529-542.
- Li, Z., Wang, L., & Wang, X. 2004. Compressive and flexural properties of hemp fiber reinforced concrete. *Fibers and polymers*, 5: 187-197.
- Li, Z., Wang, X., & Wang, L. 2006. Properties of hemp fibre reinforced concrete composites. *Composites part A: applied science and manufacturing*, 37(3): 497-505.
- Liu, Z. H., Ding, Y. D., Wang, F., & Deng, Z. P. 2016. Thermal insulation material based on SiO₂ aerogel. *Construction and Building Materials*, 122: 548-555.
- Lu, J., Jiang, J., Lu, Z., Li, J., Niu, Y., & Yang, Y. 2020. Pore structure and hardened properties of aerogel/cement composites based on nanosilica and surface modification. *Construction and Building Materials*, 245: 118434.
- Marceau, S., Glé, P., Guéguen-Minerbe, M., Gourlay, E., Moscardelli, S., Nour, I., & Amziane, S. 2017. Influence of accelerated aging on the properties of hemp concretes. *Construction and Building Materials*, 139: 524-530.
- Mutlu Danacı, H., 2012. Yöresel Mimari ve Kültürel Peyzaj Analizi: Antalya Elmalı Örneği. Doktora tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 224 s.

- Ng, S., Jelle, B. P., & Stæhli, T. 2016. Calcined clays as binder for thermal insulating and structural aerogel incorporated mortar. *Cement and Concrete Composites*, 72: 213-221.
- Ng, S., Jelle, B. P., Sandberg, L. I. C., Gao, T., & Wallevik, Ó. H. 2015. Experimental investigations of aerogel-incorporated ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 77: 307-316.
- Özer, N. ve Acun Özgünler, S., 2019. Yapılarda Yaygın Kullanılan Isı Yalıtım Malzemelerinin Performans Özelliklerinin Duvar Kesitleri Üzerinde Değerlendirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2): 25-48.
- Özer, N., 2017. Atıklardan üretilen ısı yalıtım malzemelerinin yaygın kullanılan ısı yalıtım malzemeleri ile karşılaştırılması. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 130 s.
- Page, J., Amziane, S., Gomina, M., Djelal, C., & Audonnet, F. 2021a. Using linseed oil as flax fibre coating for fibre-reinforced cementitious composite. *Industrial Crops and Products*, 161: 113168.
- Page, J., Khadraoui, F., Boutouil, M., & Gomina, M. 2017. Multi-physical properties of a structural concrete incorporating short flax fibers. *Construction and Building Materials*, 140: 344-353.
- Page, J., Khadraoui, F., Gomina, M., & Boutouil, M. 2021b. Enhancement of the long-term mechanical performance of flax fiber-reinforced cementitious composites by using alternative binders. *Journal of Building Engineering*, 40: 102323.
- Pedroso, M., Flores-Colen, I., Silvestre, J. D., Gomes, M. G., Silva, L., & Ilharco, L. 2020. Physical, mechanical, and microstructural characterisation of an innovative thermal insulating render incorporating silica aerogel. *Energy and Buildings*, 211: 109793.
- Polat, E.S. 2018. Uluslararası enerji ekonomi ve güvenlik kongresi, 21-22 Nisan, İstanbul.
- Poletanovic, B., Dragas, J., Ignjatovic, I., Komljenovic, M., & Merta, I. 2020. Physical and mechanical properties of hemp fibre reinforced alkali-activated fly ash and fly ash/slag mortars. *Construction and Building Materials*, 259: 119677.
- Rahimi, M., Hiseine, O. A., & Tagnit-Hamou, A. 2022b. Effectiveness of treated flax fibers in improving the early age behavior of high-performance concrete. *Journal of Building Engineering*, 45: 103448.
- Rahimi, M., Omran, A., & Tagnit-Hamou, A. 2022a. Role of homogenization and surface treatment of flax fiber on performance of cement-based composites. *Cleaner Materials*, 3: 100037.
- Rattanadecho, P., Suwannapum, N., Chatveera, B., Atong, D., & Makul, N. 2008. Development of compressive strength of cement paste under accelerated curing by using a continuous microwave thermal processor. *Materials Science and Engineering*, 472(1-2): 299-307.
- Riffat, S. B., & Qiu, G. 2013. A review of state-of-the-art aerogel applications in buildings. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 8(1): 1-6.

- Sassu, M., Giresini, L., Bonannini, E., & Puppino, M. L. 2016. On the use of vibro-compressed units with bio-natural aggregate. *Buildings*, 6(3): 40.
- Sezgin, H., 2006. Yöresel konut mimarisi ve Türkiye’deki örnekleri hakkında. *Tasarım kuram dergisi*, 4: 1-20.
- Smirnova, O. 2017. Perspectives of flax processing wastes in building materials production. *In AIP Conference Proceedings*, 1800(1).
- Somé, S. C., Fraj, A. B., Pavoine, A., & Chehade, M. H. 2018. Modeling and experimental characterization of effective transverse thermal properties of hemp insulation concrete. *Construction and Building Materials*, 189: 384-396.
- Spoljaric, S., A. Genovese and R.A. Shanks, 2009. Polypropylene-microcrystalline cellulose composites with enhanced compatibility and properties. *Composite Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40: 791-799.
- Şahin, M. 2022. Endüstriyel kenevir sapı atığının farklı bağlayıcılar ile kenevir betonu üretiminde değerlendirilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 10(1): 233-243.
- Şimşek, N. 2021. Kenevir lifi, keçi kılı ve polipropilen elyaf katkılı horasan harcının özelliklerinin araştırılması. Yüksek lisans tezi, Kırklareli Üniversitesi, Kırklareli, 117 s.
- T.C. Resmi Gazete. 2017. Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı 2017-2023. Sayı: 30289. <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/01/20180201M1-1.htm> [Erişim Tarihi: 06.01 2022].
- TS 825 “Binalarda Isı Yalıtım Kuralları Standardı”, Türk Standartları Enstitüsü, (2008).
- TS EN 13755. 2009. Doğal Taşlar- Deney Metotları- Atmosfer Basıncında Su Emme Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-1. 2016. Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini.
- TS EN 197-1. 2012. Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar-bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri.
- TSKB. 2021. Enerji Görünümü 2021. <https://www.tskb.com.tr/i/assets/document/pdf/enerji-sektor-gorunumu-2021.pdf> [Erişim Tarihi: 06.01.2022].
- Tung, L. H., Boutouil, M., Khadraoui, F., & Gomina, M. 2012. Mechanical and microstructural characterization of flax fibre-reinforced cement composite. *In Proceedings of the 11th Japan-Korea-France-Canada Joint Seminar on Geoenvironmental Engineering*, 131-136.
- TÜİK. 2022. Bitkisel Üretim İstatistikleri, Türkiye İstatistik Kurumu. <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/> [Erişim Tarihi: 06.01.2022].
- Üstündağ, Ö. (2020). Durabilite ortamlarında kürlenmiş mineral katkılı harçların porozite özellikleri. Doktora tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 138 s.
- Wang, L., Liu, P., Jing, Q., Liu, Y., Wang, W., Zhang, Y., & Li, Z. 2018. Strength properties and thermal conductivity of concrete with the addition of expanded perlite filled with aerogel. *Construction and Building Materials*, 188: 747-757.

- Wang, Y., Huang, J., Wang, D., Liu, Y., Zhao, Z., & Liu, J. 2019. Experimental investigation on thermal conductivity of aerogel-incorporated concrete under various hygrothermal environment. *Energy*, 188: 115999.
- Yarbaşı, N. 2020. Doğal bir materyal olarak keçi kılı lifleriyle modifiye edilen kohezyonlu zeminlerin donma-çözülme direnci. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(13): 157-166.
- Yardımlı, S. (2021). Çevreci yaklaşımlarda malzeme ve yapım tekniği; çağdaş kerpiç yapılar. *Kent Akademisi*, 14(2): 389-413.
- Yılmaz, Y. 2013. Farklı başlangıç maddeleri kullanılarak sol-jel yöntemiyle monolitik silika aerogel ve silika aerogel sentezi ve karakterizasyonu. Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 147 s.
- Yoon, H. S., Lim, T. K., Jeong, S. M., & Yang, K. H. 2020. Thermal transfer and moisture resistances of nano-aerogel-embedded foam concrete. *Construction and Building Materials*, 236: 117575.
- Zak, P., Ashour, T., Korjenic, A., Korjenic, S., & Wu, W. 2016. The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials. *Construction and Building Materials*, 106: 179-188.
- Zeng, Q., Mao, T., Li, H., & Peng, Y. 2018. Thermally insulating lightweight cement-based composites incorporating glass beads and nano-silica aerogels for sustainably energy-saving buildings. *Energy and Buildings*, 174: 97-110.
- Zhang, D., Tan, G. Y., & Tan, K. H. 2021. Combined effect of flax fibers and steel fibers on spalling resistance of ultra-high performance concrete at high temperature. *Cement and Concrete Composites*, 121: 104067.
- Zhu, P., Brunner, S., Zhao, S., Griffo, M., Leemann, A., Toropovs, N., Malekos, A., Koebel, M., Lura, P. 2019. Study of physical properties and microstructure of aerogel-cement mortars for improving the fire safety of high-performance concrete linings in tunnels. *Cement and Concrete Composites*, 104: 103414.
- Zhu, P., Xu, X., Liu, H., Liu, S., Chen, C., & Jia, Z. 2020. Tunnel fire resistance of self-compacting concrete coated with SiO₂ aerogel cement paste under 2.5 h HC fire loading. *Construction and Building Materials*, 239: 117857.

ÖZGEÇMİŞ

Neslihan AKIN

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora	Akdeniz Üniversitesi
2019- Devam ediyor	Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Antalya
Yüksek Lisans (Tezli)	Yıldız Teknik Üniversitesi
2012-2018	Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, Yapı Bilim Dalı, İstanbul
Lisans	Anadolu Üniversitesi
2007-2012	Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Eskişehir

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Mimar	Dome Partners- İstanbul/Türkiye
2014-2017	

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

- 1- Akın, N., Mutlu Danacı, H. (2021). An investigation into the architectural use of nanotechnology in the context of the titanium dioxide. Environmental Science and Pollution Research, 28(45), 64130-64136. Doi: 10.1007/s11356-021-15268-5
- 2- Danaci, H. M., Akın, N. (2022). Thermal insulation materials in architecture: A comparative test study with aerogel and rock wool. Environmental Science and Pollution Research, 29(48), 72979-72990. Doi: 10.1007/s11356-022-20927-2

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- Akın, N., Akıner, İ. (2020). İnşaat Endüstrisinde YBM (BİM) Kullanımının Analizi ve Değerlendirilmesi. International Aegean Symposiums on Innovation Technologies & Engineering. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)
- 2- Akın N., Tuna Taygun G. (2018). Yapı Ürünlerinin Yaşam Döngüsü Değerlendirmesinin Tuğla ile Örneklenmesi. 4. Ulusal Yapı Kongresi, Antalya. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)

