T.C.
KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI



KALSİNE EDİLMİŞ ZEOLİTİN CAM LİFİ TAKVİYELİ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERDE KULLANIMI

UĞUR COŞKAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ GÖKHAN KAPLAN

TEMMUZ - 2021
KASTAMONU

TEZ ONAYI

Uğur COŞKAN tarafından hazırlanan "**Kalsine Edilmiş Zeolitin Cam Lifi Takviyeli Çimento Esaslı Kompozitlerde Kullanımı**" adlı tez çalışmasının savunma sınavı **26.07.2021** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Danışman	Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN Atatürk Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Doç. Dr. Ahmet BENLİ Bingöl Üniversitesi	.....
Jüri Üyesi	Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR Kastamonu Üniversitesi	.....

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü Prof. Dr. İzzet ŞENER .....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.

UĞUR COŞKAN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KALSİNE EDİLMİŞ ZEOLİTİN CAM LİFİ TAKVİYELİ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERDE KULLANIMI

UĞUR COŞKAN

KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
DANIŞMAN:DR. ÖĞR. ÜYESİ GÖKHAN KAPLAN

Bu çalışmada, ıslanma-kuruma ve donma-çözülme döngülerine maruz bırakılan çimento esaslı kompozitlerin; mekanik, kapilarite ve hızlandırılmış eskitme özelliklerine doğal ve kalsine edilmiş zeolitlerin ve cam liflerinin etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bağlayıcı miktarına göre %0, 1,5 ve %3 oranında cam lifi kullanılmıştır. Çimento esaslı kompozitlerde bir adet doğal, iki adet kalsine edilmiş olmak üzere üç farklı zeolit kullanılmıştır. Zeolitler çimento yerine %15 ve 30 oranında ağırlıkça karışıma ilave edilmiştir. Kalsine zeolitler 600 ^{o}C'de 30 dakika ve 800 ^{o} C'de 15 dakika süre ile kalsine edilmiştir. Taze çimento kompozitlerinin işlenebilirliğinin belirlenmesi için yayılma çapları ölçülmüştür. Mekanik özellikler 7, 28 ve 91. günlerde basınç ve eğilme dayanımı ile değerlendirilmiştir. Çimento esaslı kompozitlerin; kuru birim hacim ağırlığı, su emme, görünür porozite, kuruma büzülmesi ve kapilaritesi de incelenmiştir. Dayanıklılık performansı; hızlandırılmış eskitme, donma-çözülme (60-120 döngü) ve ıslanma-kuruma (25, 50 ve 75 döngü) testleri ile değerlendirilmiştir. Dayanıklılık testleri yapıldıktan sonra; çimento esaslı kompozit numunelerin basınç, eğilme, ultrases geçiş hızı, mikroyapısal incelemeler ve ağırlık kaybı özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar, kalsinasyonun doğal zeolitin amorf içeriğini ve BET yüzey alanını ve puzolanik reaktivitesini arttırdığını göstermiştir. Kalsine zeolitli karışımlar, tüm yaşlarda basınç ve eğilme dayanımı göz önüne alındığında, doğal zeolitlerle yapılan karışımlardan daha iyi performans göstermiştir. 91 günlük çimento esaslı kompozitlerde %15 600 ^{o}C'de kalsine edilen zeolitli karışımlarda cam lifi kullanılmadığı durumda, referans karışıma çok yakın basınç dayanımı elde edildiği belirlenmiştir. Benzer şekilde, %15 800 ^{o}C'de kalsine edilen zeolitli karışımlarda %1,5 oranında cam lifi kullanılması durumunda referans karışıma göre daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Cam lifi, Kalsine zeolit, Durabilite, Mikroyapı, Beyaz çimento

Temmuz 2021, 88 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

THE USAGE OF CALCINED ZEOLITE WITH GLASS FIBER REINFORCED CEMENT BASED COMPOSITES

UĞUR COŞKAN

KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING
SUPERVISOR:DR. ÖĞR. ÜYESİ GÖKHAN KAPLAN

In this study, the effects of natural and calcined zeolites and glass fibers on the mechanical, sorptivity and accelerated aging properties of cement-based composites exposed to wetting-drying and freeze-thawing cycles were experimentally investigated. According to the amount of binder, 0, 1.5 and 3% glass fiber was used. Three different zeolites, one natural and two calcined, were used in cement-based composites. Zeolites were added to the mixture at the rate of 15 and 30% by weight instead of cement. Calcined zeolites were calcined at 600 ^{o}C for 30 minutes and at 800 ^{o}C for 15 minutes. Flow diameters were measured to determine the workability of fresh cement composites. Mechanical properties were evaluated by compressive and flexural strength on days 7, 28 and 91. Dry unit weight, water absorption, apparent porosity, drying shrinkage and sorptivity of cement-based composites were also investigated. Durability performance was evaluated by accelerated aging, freeze-thaw (60-120 cycles) and wetting-drying (25, 50 and 75 cycles) tests. After durability tests; Compression, flexural, ultrasound pulse velocity, microstructural investigations and mass loss properties of cement-based composite samples were investigated. The results showed that calcination increased the amorphous phase content and BET surface area and pozzolanic reactivity of the natural zeolite. Mixtures with calcined zeolites outperformed mixtures made with natural zeolites when considering compressive and flexural strengths at all ages. It was determined that in the case of zeolite mixtures calcined at 15% 600 ^{o}C in 91-day cement-based composites, compressive strength very close to the reference mixture was obtained when no glass fiber was used. Similarly, when 1.5% glass fiber is used in zeolite mixtures calcined at 15% 800 ^{o}C, higher compressive strength was obtained than the reference mixture.

KEYWORDS: Glass fiber, Calcined zeolite, Durability, Microstructure, White cement

July 2021, 88 Pages

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın tüm aşamalarında değerli bilgi ve tecrübesiyle beni yönlendiren, her konuda yardım ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca yanımda olan ve yardımını esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR'a, yüksek lisans eğitimime başladığım günden itibaren yardım ve destekleriyle yanımda olan kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Hakan ADA'ya, akademik hayata atılmamda teşvik ve desteğini esirgemeyen değerli arkadaşım İngilizce Öğretmeni Kerem TEKŞEN'e, çalışmamda kullanılan zeolitin temininde emekleri geçen Sayın Metin AKGÜN'e ve dayım Necati BAYRAM'a, laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Kastamonu Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümü öğrencisi değerli arkadaşlarıma, tez çalışmam boyunca desteğini esirgemeyen annem Mükerrem COŞKAN'a ve bu zorlu süreç boyunca hep yanımda olan sevgili eşim Ebru COŞKAN'a çok teşekkür ederim.

Bu çalışmayı sevgili kızım Güneş'e ithaf ediyorum.

Uğur COŞKAN
Kastamonu, 2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI ..... **ii**
TAAHHÜTNAME ..... **iii**
ÖZET ..... **iv**
ABSTRACT ..... **v**
TEŞEKKÜR ..... **vi**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **ix**
TABLOLAR DİZİNİ ..... **xi**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xii**
1. GİRİŞ **1**
2. LİTERATÜR TARAMASI **3**
2.1 Lifli Betonlar 3
2.1.1 Lifli Betonların Tarihçesi 4
2.2 Lifler 4
2.2.1 Liflerin Özellikleri 4
2.2.2 Çelik Lifler 5
2.2.3 Polimer Lifler 6
2.2.4 Cam Lifler 6
2.2.4.1 Cam liflerinin tarihçesi 7
2.2.4.2 Cam liflerinin kimyasal kompozisyonu 9
2.2.4.3 Cam lifi türleri 10
2.2.4.4 Cam liflerinin fiziksel özellikleri 12
2.2.4.5 Cam liflerinin mekanik özellikleri 13
2.2.4.6 Cam liflerinin kimyasal özellikleri 13
2.2.4.7 Cam liflerinin termal ve elektriksel özellikleri 14
2.2.4.8 Cam liflerinin kullanım alanları 15
2.3 Doğal Zeolitler 16
2.3.1 Doğal Zeolitlerin Kimyasal Özellikleri 17
2.3.2 Doğal Zeolitlerin Fiziksel Özellikleri 17
2.3.3 Doğal Zeolitlerin Puzolanik Aktiviteleri 18
2.3.4 Zeolitlerin Kullanım Alanları 19
2.3.5 Doğal Zeolitlerin Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik ve Durabilite Özelliklerine Etkisi 20
3. MALZEME VE YÖNTEM **21**
3.1 Malzemeler 21
3.1.1 Çimento 21
3.1.2 Doğal Zeolit 21
3.1.3 Agrega 22
3.1.4 Cam Lifi 23
3.1.5 Süperakışkanlaştırıcı ve Su 23
3.2 Yöntem 24
3.2.1 Karışımların Hazırlanması ve Kür 24
3.2.2 Çimento Esaslı Kompozitlerin İşlenebilirliği 25
3.2.3 Çimento Esaslı Kompozitlerin Fiziksel Özellikleri 26

3.2.4 Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özellikleri 26
3.2.5 Çimento Esaslı Kompozitlerin Kuruma Büzülmesi Özellikleri 26
3.2.6 Çimento Esaslı Kompozitlerin Kapilarite Özellikleri 27
3.2.7 Çimento Esaslı Kompozitlerin Hızlandırılmış Eskitme Özellikleri 27
3.2.8 Çimento Esaslı Kompozitlerin Donma Çözülme Dayanıklılığı 27
3.2.9 Çimento Esaslı Kompozitlerin Islanma Kuruma Dayanıklılığı 28
3.2.10 Çimento Esaslı Kompozitlerin Mikroyapı Özellikleri 28
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 29
4.1 Cam Lifli Çimento Esaslı Kompozitlerin Taze Hal Özellikleri 29
4.2 Cam Lifli Çimento Esaslı Kompozitlerin Fiziksel Özellikleri 31
4.3 Cam Lifli Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özellikleri 35
4.4 Cam Lifli Çimento Esaslı Kompozitlerin Kuruma Büzülmeleri 43
4.5 Cam Lifli Çimento Esaslı Kompozitlerin Su İşleme Derinlikleri 46
4.6 Cam Lifli Çimento Esaslı Kompozitlerin Hızlandırılmış Eskitme Davranışları 50
4.7 Cam Lifli Çimento Esaslı Kompozitlerin Donma-Çözülme Dayanıklılığı 55
4.8 Cam Lifli Çimento Esaslı Kompozitlerin Islanma-Kuruma Dayanıklılığı 64
4.9 Çimento Esaslı Kompozitlerin Mikroyapıları 74
5. SONUÇLAR 76
KAYNAKLAR 79

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Cam lifi türleri ve öne çıkan bazı özellikleri 7
Şekil 2.2 Zeolit mineralinin moleküler yapısı, şematik ve SEM görüntüsü .. 17
Şekil 2.3 Doğal zeolitlerin fiziksel görünümü 18
Şekil 3.1 Silis agregasının tane dağılımı ve mineralojik yapısı 23
Şekil 4.1 Çimento esaslı kompozitlerin yayılma çapları 30
Şekil 4.2 Çimento esaslı kompozitlerin kuru birim hacim ağırlıkları 32
Şekil 4.3 Çimento esaslı kompozitlerin görünür poroziteleri 32
Şekil 4.4 Çimento esaslı kompozitlerin su emme özellikleri 33
Şekil 4.5 Çimento esaslı kompozitlerin fiziksel özellikleri arasındaki ilişkileri 34
Şekil 4.6 Cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımı 36
Şekil 4.7 %1,5 cam lifli çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımı 37
Şekil 4.8 %3 cam lifli çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımı 38
Şekil 4.9 Cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımı 39
Şekil 4.10 %1,5 cam lifli çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımı 40
Şekil 4.11 %3 cam lifli çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımı 41
Şekil 4.12 Cam lifli çimento esaslı kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin ilişkisi 42
Şekil 4.13 Cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozitlerin kuruma büzülmeleri 43
Şekil 4.14 %1,5 cam lifi içeren çimento esaslı kompozitlerin kuruma büzülmeleri 44
Şekil 4.15 %3 cam lifi içeren çimento esaslı kompozitlerin kuruma büzülmeleri 45
Şekil 4.16 Kuruma büzülmesinin fiziksel ve mekanik özellikler ile ilişkisi ... 45
Şekil 4.17 Cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozitlerin su işleme derinlikleri 47
Şekil 4.18 %1,5 cam lifi içeren çimento esaslı kompozitlerin su işleme derinlikleri 48
Şekil 4.19 %3 cam lifi içeren çimento esaslı kompozitlerin su işleme derinlikleri 49
Şekil 4.20 Su işleme derinliğinin su emme ve kuruma büzülmesi ile ilişkisi . 50
Şekil 4.21 Cam lifi içerikli çimento esaslı kompozitlerin hızlandırılmış eskitme sonrasındaki ağırlık değişimleri 51
Şekil 4.22 Cam lifi içerikli çimento esaslı kompozitlerin hızlandırılmış eskitme sonrasındaki eğilme dayanımları 52
Şekil 4.23 Cam lifi içerikli çimento esaslı kompozitlerin hızlandırılmış eskitme sonrasındaki basınç dayanımları 53
Şekil 4.24 Cam lifi içerikli çimento esaslı kompozitlerin ağırlık değişimi ile porozite arasındaki ilişkisi ..... .54
Şekil 4.25 60 döngü donma-çözülme etkisine maruz çimento esaslı kompozitlerde oluşan ağırlık kayıpları 56

Şekil 4.26 60 döngü donma-çözülme etkisine maruz çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımları 57
Şekil 4.27 60 döngü donma-çözülme etkisine maruz çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımları 58
Şekil 4.28 120 döngü donma-çözülme etkisine maruz çimento esaslı kompozitlerde oluşan ağırlık kayıpları 59
Şekil 4.29 120 döngü donma-çözülme etkisine maruz çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımları 59
Şekil 4.30 120 döngü donma-çözülme etkisine maruz çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımları 61
Şekil 4.31 Cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozitlerin ultrases geçiş hızındaki değişimler 62
Şekil 4.32 %1,5 cam lifli çimento esaslı kompozitlerin ultrases geçiş hızındaki değişimler 62
Şekil 4.33 %3 cam lifli çimento esaslı kompozitlerin ultrases geçiş hızındaki değişimler 63
Şekil 4.34 120 döngü donma-çözülme sonrasında oluşan ağırlık kaybının 91 günlük basınç dayanımı ile ilişkisi 64
Şekil 4.35 Cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozitlerin ıslanma-kuruma etkisi sonucundaki ağırlık kayıpları 65
Şekil 4.36 %1,5 cam lifi içerikli çimento esaslı kompozitlerin ıslanma-kuruma etkisi sonucundaki ağırlık kayıpları 66
Şekil 4.37 %3 cam lifi içerikli çimento esaslı kompozitlerin ıslanma-kuruma etkisi sonucundaki ağırlık kayıpları 67
Şekil 4.38 Cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozitlerin ıslanma-kuruma etkisi sonucundaki basınç dayanımları 68
Şekil 4.39 %1,5 cam lifi içeren çimento esaslı kompozitlerin ıslanma-kuruma etkisi sonucundaki basınç dayanımları 69
Şekil 4.40 %3 cam lifi içeren çimento esaslı kompozitlerin ıslanma-kuruma etkisi sonucundaki basınç dayanımları 70
Şekil 4.41 Cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozilerin ıslanma-kuruma etkisi sonucundaki eğilme dayanımları 71
Şekil 4.42 %1,5 cam lifi içeren çimento esaslı kompozitlerin ıslanma-kuruma etkisi sonucundaki eğilme dayanımları 72
Şekil 4.43 %3 cam lifi içeren çimento esaslı kompozitlerin ıslanma-kuruma etkisi sonucundaki eğilme dayanımları 73
Şekil 4.44 91 gün su kürüne tabi tutulmuş numunelerin mikroyapı görüntüleri 74
Şekil 4.45 Eskitme sürecine tabi tutulmuş numunelerin mikroyapı görüntüleri 75

TABLOLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1 Cam lifi türlerinin kompozisyonları ve ağırlıkça oksit oranları 9
Tablo 2.2 Cam lifi türlerinin bazı fiziksel özellikleri 12
Tablo 2.3 Cam lifi türlerinin bazı mekanik özellikleri 13
Tablo 2.4 Cam lifi türlerinin bazı kimyasal özellikleri 14
Tablo 2.5 Cam lifi türlerinin bazı termal özellikleri 15
Tablo 3.1 Beyaz Portland çimentosuna ait kimyasal ve fiziksel özellikler 21
Tablo 3.2 Zeolite ait kimyasal ve fiziksel özellikler 22
Tablo 3.3 Cam lifinin mühendislik özellikleri 23
Tablo 3.4 Süperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri 24
Tablo 3.5 Deneysel çalışmaya ait değişkenler 24
Tablo 3.6 Karışım oranları ve malzeme miktarları 25
Tablo 4.1 Hızlandırılmış eskitme sonrasında oluşan dayanım kayıplarının ısı haritası 54
Tablo 4.2 60 donma-çözülme döngüsü sonrası oluşan basınç dayanımı kayıpları 57
Tablo 4.3 120 donma-çözülme döngüsü sonrası oluşan basınç dayanımı kayıpları 60

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

SiO_2	**:** Silisyum dioksit
Al_2O_3	**:** Alüminyum oksit
BaO	**:** Baryum oksit
B_2O_3	**:** Boron oksit
ZnO	: Çinko oksit
Fe_2O_3	: Demir oksit
F_2	: Fluorine
CaO	: Kalsiyum oksit
Li_2O	: Lityum oksit
MgO	**:** Magnezyum oksit
Na_2O	: Sodyum oksit
K_2O	: Potasyum oksit
TiO_2	: Titanyum oksit
ZrO_2	: Zirkonyum oksit
H_2O	: Su
HCl	: Hidroklorik asit
H_2SO_4	: Sülfürik asit
Na_2CO_3	: Sodyum karbonat
$Ca(OH)_2$	: Sönmüş kireç
SO_3	: kükürt trioksit

Kısaltmalar

SMC	**:** Sac kalıplama bileşimi
CTP	**:** Cam lifi takviyeli plastik
GFRC	**:** Cam lifi takviyeli beton
ASTM	**:** Amerikan Test ve Malzemeler Kurumu
XRD	**:** X-ışınları difraktometresi
UPV	**:** Ultrases geçiş hızı
SEM	**:** Taramalı elektron mikroskobu
MERLAB	**:** Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı
KYB	**:** Kendiliğinden yerleşen beton
ECC	**:** Tasarlanmış çimeto esaslı kompozit

1. GİRİŞ

Çimento; hammaddelerinin fazla ön işlem gerektirmeden kullanılabilmesi, priz öncesi şekillendirilebilmesinin kolay olması ve sertleşmesini tamamlamasının ardından yüksek bir dayanıklılık göstermesi sebebiyle önemli bir yapı malzemesidir. Çimento, agrega ve su ile birleştirilmesiyle, dayanıklı ve basınç mukavemeti yüksek bir yapı malzemesi olan betona dönüşür.

Günümüzde kullanımı en yaygın yapı malzemesi çimento ve betondur. Kullanımlarının bu kadar yaygın olması bazı sorunları da beraberinde getirmektedir. Üretiminde kullanılan tekniklerin dezavantajı olarak çimento, üretim maliyeti yüksek ve çevreye zararları olan bir malzemedir. Çimento üretiminde enerji tüketimi ve karbondioksit salınımı yüksektir. Ayrıca çimento üretiminde kullanılan hammaddeler gün geçtikçe azalmaktadır. Bununla beraber beton her ne kadar basınç dayanımı yüksek bir çimento esaslı kompozit olsa da dayanıklılık yönünden aynı performansı gösterememektedir. Gelişen inşaat teknolojileri ve betonun çok çeşitli alanlarda kullanımı betondan beklenen özellikleri arttırmaktadır. Betonun; hidratasyon ısısı, su geçirgenliği, asit ve sülfatlara karşı direnci, segregasyon, çatlak oluşumunun önlenmesi gibi özelliklerinin istenilen seviyelere çıkartılması gerekmektedir.

Çimento ve beton üretiminde; maliyet ve enerji tüketiminin düşürülmesi, çevreye verilen zararın en aza indirilmesi, doğal kaynakların en verimli şekilde kullanılarak sürdürülebilirliğin sağlanması ve betonunun zayıf yönlerinin geliştirilerek beklenilen özellikleri sağlayabilmesi için yapılan çalışmalarda, çimento ikamesi olarak puzolanların kullanımı ve betonun çeşitli lifler ile takviye edilmesi araştırılmaktadır.

Çimento esaslı kompozitlerde çimento ikamesi olarak kullanılabilen ve puzolanik özellik gösteren doğal zeolitler, silisyum ve aliminyum temelli, kristal yapılı ve bünyelerinde gözenek ve kanallardan oluşmuş çok boyutlu bir boşluk sistemi bulunduran minerallerdir. Puzolanik aktiviteleri oldukça yüksektir. Adsorbsiyon kapasiteleri, moleküler elek özellikleri, katyon değiştirme yetenekleri gibi işlevleri bulunmaktadır. Çimento ikamesi olarak kullanıldıklarında kompozitin mekanik ve durabilite özelliklerine olumlu katkılar sağlamakta ayrıca çimento kullanımının

azalmasını sağlamaktadırlar. Ülkemizde yüksek miktarda rezervleri bulunup rezervlerin yüzeye yakın olmasından dolayı madencilikleri de kolaydır.

Çimento esaslı kompozitlerde liflerin kullanımı da kompozitin özelliklerini geliştirmektedir. Özellikle betonda plastik dönem mikro çatlaklarının oluşumunun önüne geçilmesinde oldukça etkilidirler. Kompozitlerde sıklıkla kullanılan lif türlerinden biri olan cam lifleri, silika tabanlı olup, göstermesi istenilen özelliğe göre kompozisyonlarında; kalsiyum, bor, sodyum, alüminyum, demir gibi oksitler bulundurabilirler. Cam lifleri yüksek çekme dayanımları, kimyasal etkilere karşı yüksek direnç göstermeleri ve düşük üretim maliyetleri ile öne çıkar.

Bu çalışmada çimento ikame malzemesi olarak zeolit kullanılmıştır. Literatürde zeolitler genelde doğal halleriyle kullanılmakta ise de çalışmada kalsinasyon ile amorf yapılı hale getirilerek kullanılmıştır. Kalsinasyon işlemi 600 ºC ve 800 ºC sıcaklıklarda yapılmıştır. Bu sıcaklık değerleri çimento fabrikaları üretim süreçlerinde kullanılan ön ısıtma ve atık ısı değerleri dikkate alınarak seçilmiştir. Bu sayede zeolitlerin kalsinasyonu için gerekli ek enerji ihtiyacı azaltılarak açığa çıkan atık ısının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Elde edilecek kompozitlerin dış cephe kaplama uygulamalarında kullanılabilirliği de inceleneceğinden kompozitlere cam lifi takviyesi yapılmıştır. Zeolit kullanılarak hem çimento kullanımının azaltılması hem de kompozitte yüksek basınç dayanımı ve düşük birim ağırlık elde edilmesi, cam lifi kullanılarak ise yüksek eğilme tokluğu kazanılması ve mikro çatlak oluşumunun önlenmesi amaçlanmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Lifli Betonlar

Beton, esas olarak; çimento, agrega ve su gibi malzemelerden meydana gelen bir kompozittir. Basınç altında gösterdiği yüksek mukavemet ve görece düşük maliyet avantajı nedeniyle dünyada kullanımı en yaygın yapı malzemesidir. Bu yaygın kullanım betonun çok çeşitli yapılarda kullanılmasını sağlamış bu da betondan beklenen özelliklerin artmasına sebep olmuştur.

Beton, yüksek basınç mukavemeti göstermekle birlikte; çekme ve eğilme dayanımı, deformasyon kabiliyeti, darbe dayanıklılığı, yorulma, enerji soğurma yeteneği, kavitasyon, mikro çatlakların yükleme sonrası etkileri gibi özellikleri açısından düşük bir performans gösterir (Maraşlı, 2019). Geçtiğimiz yıllarda betonun bahsedilen bu zayıf yönlerini düzeltmek amacıyla pek çok çalışma yapılmış ve beton teknolojisinde önemli gelişmeler olmuştur. Kullanım amacına göre betonun beklenilen davranışı gösterebilmesi ve zayıflıklarının giderilmesi için değişik katkı maddeleri ve yöntemler kullanılarak; hafif veya ağır betonlar, prepakt betonlar, kendiliğinden yerleşen betonlar, su altında dökülebilen betonlar ve lif takviyeli betonlar gibi farklı beton tasarımları yapılmıştır (Oltulu ve Oktan, 2019).

Beton karışımına eklenen lifler ile oluşturulan Lif Takviyeli Betonlar; hidrolik bağlayıcı, agrega ve süreksiz şekilde dağıtılmış farklı mekanik ve fiziksel özelliklere sahip lifler ile gerekli durumlarda diğer kimyasal ve mineral katkı maddelerinin suyla karıştırılmasıyla meydana gelen kompozit bir malzemedir (Yıldırım,2019).

Genel olarak lif takviyeli betonların mekanik ve dayanıklılık özellikleri daha iyidir. Liflerin kullanımı betonda; plastik dönem mikro çatlaklarının oluşmasının engellenmesinde, basınç, çekme, eğilme ve darbe dayanımlarının geliştirilmesinde, süneklik ve enerji yutma kabiliyetinin arttırılmasında ve aşınma direnci, asit ve sülfat direnci gibi özelliklerin iyileştirilmesinde olumlu katkılar sağlamaktadır (Maraşlı, 2019).

2.1.1 Lifli Betonların Tarihçesi

Liflerin kullanımı çok eski zamanlardan beri süregelmektedir. Eski yapılarda kullanılan alçı ve kerpiç gibi yapı malzemelerinde lif içeriği olarak bitkisel ve hayvansal kökenli; kenevir, kendir, keçi kılı ve at kuyruğu ve yelesi gibi liflerin kullanıldığı bilinmektedir (Yıldırım, 2019)

Lifli betonlarla ilgili yapılan ilk çalışmalar, J. Lambot'un betonun çekme dayanımını arttırmak amacıyla sürekli teller ve lifler kullanarak oluşturduğu kafes donatılı beton ve 1874'te A.Berard tarafından patenti alınan liflerle donatılı betondur. Kompozitlerin tasarımında farklı türlerde liflerin kullanımı 1960 ve sonrası yapılan çalışmalar neticesinde gelişerek ilerlemiştir. İngiltere'de Nurse ve Majumdar, Danimarka'da West ve Krenchel, Amerika'da Romualdi lifli harç ve betonlarla ilgili çalışmalar yapmışlar ve bu çalışmaları takiben diğer ülkelerde de bu konuda araştırmalar yapılmaya başlanılmıştır. Günümüze kadar yapılan çeşitli araştırmalar sonucunda birçok lifli kompozit geliştirilmiştir (Sarı, 2013).

2.2 Lifler

2.2.1 Liflerin Özellikleri

Lif olarak, doğal olarak bulunabilen ya da sentetik olarak üretilen, fiziksel ve mekanik özellikleri iyi olan malzemeler kullanılabilir. Liflerin boy/çap oranları yüksek olup mekanik özellikleri, aynı malzemenin büyük hacimli haline kıyasla daha iyidir. Liflerin kompozit özellikleri üstündeki etkileri kendi fiziksel özelliklerine de bağlıdır. Liflerde önem arz eden bu özellikler; narinlik ve lif oranı, lif boyu ve liflerin geometrik şekilleridir:

Narinlik ve Lif Oranı: Betonlarda kullanılan liflerin betona yapacakları etkilere ilişkin en önemli faktör liflerin narinliğidir. Narinlik, lifin boyunun çapına oranını göstermektedir. Narinliğin artması ile betonun mekanik özellikleri artarken, işlenebilirliği düşer. Bu dengeyi sağlayabilmek için narinlik oranının 100'ü geçmemesi uygun olmaktadır. Lif miktarındaki artışla beraber betonun çekme ve

basınç dayanımlarında artış olmakta ancak bu artış kullanılan liflerin narinliğine de bağlıdır. Lif miktarındaki artış da işlenebilirliği düşürmektedir (Ekincioğlu, 2003).

Lif Boyu: Liflerin boyları da kompozit özelliklerini etkilemekte olup çimento esaslı kompozitlerde, lif boyunun atması ile gerilme değeri düşmekte, şekil değiştirme kabiliyeti artmaktadır. Uzun lifler, betonda oluşmaya başlayan çatlaklar mikro ölçekli olduğundan bu çatlaklara tutunamaz ve çatlak oluşumunun önüne geçemezler. Beton kırılma aşamasına geldiğinde ise çatlaklar arası bir bağlantı kurup göçmeyi engelleyerek betonun daha sünek davranmasını sağlarlar. Kısa lifler ise tam tersi olarak mikro çatlaklar için boyut olarak daha uygun olurlar ve çatlak oluşumunun önlenmesinde etkilidirler. Mikro çatlaklar daha büyük çatlaklara dönüştüğünde ise lif boyu yetersiz kalır (Güngör, 2013).

Liflerin Geometrik Şekilleri: Kullanılan liflerin geometrik şekilleri, lifler ile matris arasında oluşacak bağın dayanımını etkilemektedir. Lif katkısı genel olarak beton işlenebilirliğini düşürmektedir. Aynı narinlik oranında, dalgalı lifler, düz ve kancalı liflere göre daha yüksek çökme değerleri ortaya çıkarmaktadır. Narinlik oranları ve kullanılan lif miktarlarında farklılık olsa bile kancalı lifler, kompozitlerin basınç gerilmeleri altındaki enerji soğurma kapasitelerini düz ve dalgalı liflere göre daha çok arttırmaktadır (Sarı, 2013).

2.2.2 Çelik Lifler

Çelik tellerden soğuk çekim ya da sıcak çekim yöntemiyle veya çelik sacların kesilmesiyle üretilen çelik liflerin çapları 0,15-2 mm, boyları ise 7-75 mm aralığındadır. Narinlikleri 20 ila 100 arasında değişmektedir. Çelik liflerin çekme dayanımları ve elastisite modülleri yüksektir. Sünek davranış gösterirler ve sünmeleri düşüktür. Kompozitlerde genel olarak hacimce %0,25-2,0 oranında çelik lif kullanılır. Bu orandan daha fazla lif içeriği kullanımı işlenebilirliği düşürebilir. Çelik lifli betonlarda darbe direnci, süneklik ve yorulma direncinde gelişme olmaktadır (Maraşlı, 2019). Çelik liflerin sünekliklerinin yüksek olması betonun karıştırılmasında ve yerleştirilmesinde önemli bir etkendir (Ekincioğlu, 2003). Çelik

lifli betonların en dikkat çekici özellikleri, toklukları ve dinamik yükler altındaki davranışları ile enerji soğurma yeteneklerindeki gelişmedir (Güngör, 2013).

2.2.3 Polimer Lifler

Polimer lifler çok çeşitli kullanım alanları olan yüksek dayanımlı, alkali dirençleri yüksek ve maliyet açısından uygun liflerdir. Çimento esaslı kompozitlerde en sık kullanılan polimer lif türü polipropilen liflerdir. Polipropilen lifler bağlayıcı malzeme içinde ıslanmasıyla birlikte topaklanma yapmaz. Bu liflerin betonda kullanımı, dökümü takiben gerçekleşen plastik büzülmelerden kaynaklı mikro çatlakların azalmasını sağlamaktadır (Yıldırım, 2019). Bunun dışında betonda; segregasyon, süneklik, geçirgenlik, kimyasal direnci, korozyon ve aşınma gibi özelliklere olumlu katkı sağlarlar. Ancak etkileri daha çok betonun plastik davranış gösterdiği dönemdedir ve plastik büzülmelerin önlenmesinde etkilidir. Betonun mekanik özelliklerine çok katkısı olmamaktadır (Güngör, 2013).

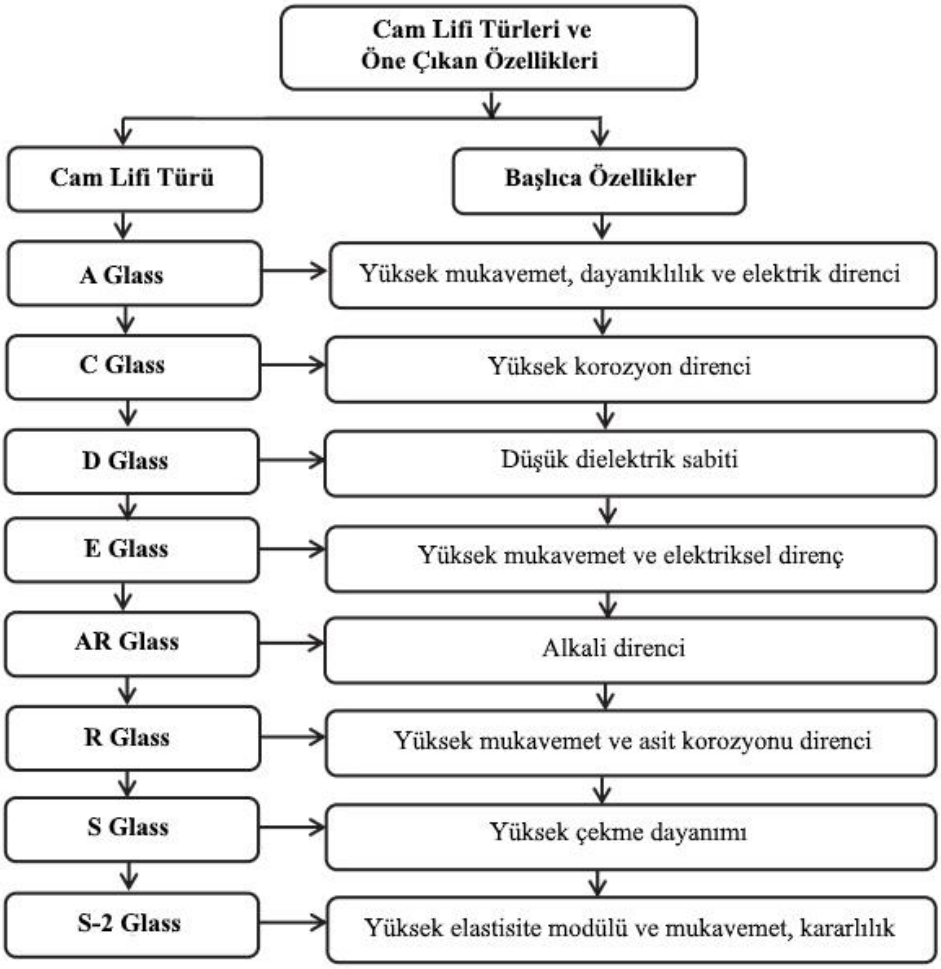
2.2.4 Cam Lifler

Cam lifleri çok yönlü bir malzeme sınıfıdır. Sertlikleri diğer takviye liflerinden daha düşüktür ancak çok yüksek bir mukavemeti düşük bir yoğunluk ile birleştirme gibi belirgin bir avantaja sahiptirler ve en önemlisi maliyet açısından çok uygundurlar (Chawla, 2016).

Günümüzde cam lifleri çeşitli kompozit malzemelerin üretiminde oldukça sık kullanılan bir takviye malzemesi haline gelmiştir. Cam lifleri; filtrasyon, ısı ve ses yalıtımı, termoset ve termoplastik polimerler, havacılık, otomotiv, denizcilik, spor ve eğlence malzemeleri, inşaat gibi birçok alanda kullanılırlar. Gelecekte de başlıca takviye lif malzemesi olarak kullanılmaya devam edecekleri öngörülmektedir (Shioya ve Kikutani, 2014).

Cam liflerinin ana özellikleri; yüksek çekme dayanımı, kimyasal etkilere karşı yüksek direnç göstermeleri ve düşük üretim maliyetleridir. Cam lifleri bu özellikleri neticesinde birçok alanda kullanılmaktadır (Derradji vd 2018). Bununla beraber bazı dezavantajları da vardır. Bunlar; sertliklerinin yüksek olması nedeniyle birbirlerini

aşındırması ve üretim hattında aşınmaya neden olması, bükülme, görece düşük yüzey kalitesi ve eriyik haldeyken viskozitesinin yüksek olmasıdır (Shrivastava, 2018). Çeşitli kompozitlerde kullanılmak üzere birçok cam lifi geliştirilmiştir. Bazı cam lifi türlerinin başlıca özellikleri Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Cam lifi türleri ve öne çıkan bazı özellikleri (Sathishkumar vd. 2014)

2.2.4.1 Cam liflerinin tarihçesi

Cam elyaf üretilebilirliği uzun zamandan beri bilinmektedir. Cam üfleme yönteminden bile daha önce, Mısır'da çanak yapımında kullanılan belirli formdaki killerin kenarlarında sarma yöntemi ile cam lifleri kullanılmıştır. Onaltıncı ve onyedinci yüzyıllarda Venedikli cam ustaları tabak vb. dekore etmek için yüzeyler üzerinde opak beyaz cam lifleri kullanmışlar, yine benzer şekilde İngilizler cam liflerini dekore amaçlı olarak gözlük üretiminde kullanmışlardır (Martynova ve Cebulla, 2018).

Onsekizinci yüzyılın başlarında cam lif benzeri cam şeritler Fransa'da tekstil ürünlerinde dekorasyon için kullanılmıştır. Fransız fizikçi Rene-Antoine Ferho de Reumur 1713'te ince cam şeritlerle süslenmiş tekstiller üretmiştir (Özdemir vd 2006). Ondokuzuncu yüzyılın başlarında ise cam lifleri ipek veya pamukla iç içe geçirilerek tekstil ürünlerinde kullanılmıştır. 1842'de İngiliz ipek dokumacıları cam kumaş imal etmiş ve sonrasında Edward Liebey 1893 yılında Chicago'da camdan dokunmuş bir elbise sergilemiştir (Cevahir, 2017).

Liflerin çok ince deliklerden çekilmesi ile cam lifi üretim tekniği 1930'larda Amerika'da geliştirilmiş ve 1939'da Almanya'da da kullanılmaya başlamıştır. 1930'ların başında, Newark, Ohio, Amerika'da Owens-Illinois Glass Co. firması cam lifi üretim sürecini büyük ölçüde iyileştirerek uygulanabilir ve ekonomik hale getirmiştir (Gardiner, 2009). Bu zamana dek endüstriyel ölçekte üretilen lifler, kesintili olarak üretilen cam yünü idi. Yüksek sıcaklıklarda kullanılan sürekli ve ince elektrik bağlantı tellerine gereksinim duyulması ile elektrik yalıtımına uygun olan ve sürekli olarak çekilebilen yeni bir cam lifi olan E-glass geliştirildi. Bu cam kolay uygulanabilir olduğundan tüm dünyada kesintisiz lif üretimi için standart haline geldi. Elektriksel özellikleri için üretilmiş olsa da başka alanlarda da yaygın olarak kullanıldı. 1935'te cam lifleri kullanılarak üretilen güçlendirilmiş plastiklere ilişkin ilk patentler alınmış ve ilk önemli uygulama alanı 2. Dünya Savaşı sırasında uçaklar için radar kubbeleri olmuştur (Martynova ve Cebulla, 2018). 1953 yılında General Motors Chevrolet Corvette spor arabalarının gövde üretiminde ilk defa cam lifi ve sac kalıplama bileşimi (SMC) kullanarak seri üretim yapmıştır (Cevahir, 2017).

1960'ların başlarında ise ilk yüksek dayanımlı cam lifleri tekstil sektöründen O. Corning firması ile Amerikan Hava Kuvvetleri'nin beraber yürüttüğü çalışmalar neticesinde kullanılmaya başlanılmıştır. Üretilen bu cam lifi çeşidi birçok ticari alanda kullanılmıştır. Bu gelişmelerin ardından başka lif çekme tekniklerinin de bulunmasıyla birlikte cam lifi üretiminde büyük bir artış görülmüştür (Otuzbir, 2020). Diğer üreticilerin de cam lifi üretimine başlamasıyla cam lifi pazarı büyümeye başlamış, dünya çapında birçok geliştirme ve yenilik yapılmıştır (Gardiner, 2009).

2.2.4.2 Cam liflerinin kimyasal kompozisyonu

Silika esaslı cam lifleri uzun zamandır piyasada bulunmakta olup en temel ve ortak cam lifidir. Çoğu cam lifi silika tabanlıdır ve bileşiminde % 50-60 oranında SiO_2 içerir. Silika esaslı cam lifleri farklı kimyasallar kullanılarak oluşturulan çeşitli kompozisyonlar halinde ticari olarak üretilmektedir. Cam elyaf kompozisyonlarında; kalsiyum, bor, sodyum, alüminyum, demir vb. oksitler sıklıkla kullanılmaktadır (Chawla, 2001). Bileşimlerde silika için kum, alüminyum oksit için kil, kalsiyum oksit için kalsit, bor oksit için kolemanit gibi hammaddeler kullanılır. Cam lifleri kullanılacakları kompozit türüne göre üretilirler ve kompozisyonlarında kullanılan silika ve diğer maddelerin miktarlarına göre farklı özellikler gösterirler (Cevahir, 2017). Kompozitlerde sıkça kullanılan ve ticari olarak bulunabilen bazı cam lifi kompozisyonları Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1 Cam lifi türlerinin kompozisyonları ve ağırlıkça oksit oranları (Derradji vd. 2018)

Cam Lifi Türlerinin Kimyasal Kompozisyonları								
Cam Türleri	**A**	**C**	**D**	**E**	**E-CR**	**AR**	**R**	**S-2**
Oksitler (%)								
SiO_2	63 - 72	64 - 68	72 - 75	52 - 56	54 - 62	55 - 75	56 - 60	64 - 66
Al_2O_3	0 - 6	3 - 5	0 - 1	12 - 16	9 - 15	0 - 5	23 - 28	24 - 25
BaO		0 - 1						
B_2O_3	0 - 6	4 - 6	21 - 24	5 - 10		0 - 8	0 - 0,35	
ZnO					2 - 5			
Fe_2O_3	0 - 0,5	0 - 0,8	0 - 0,3	0 - 0,8	0 - 0,8	0 - 5	0 - 0,5	0 - 0,1
F_2	0 - 0,4			0 - 1			0 - 0,3	
CaO	6 - 10	11 - 15	0 - 1	16 - 25	17 - 25	1 - 10	8 - 15	0 - 0,2
Li_2O						0 - 1,5		
MgO	0 - 4	2 - 4		0 - 5	0 - 4		4 - 7	9,5 - 10
Na_2O+K_2O	14 - 16	7 - 10	0 - 4	0 - 2	0 - 2	11 - 21	0 - 1	0 - 0,2
TiO_2	0 - 0,6			0 - 1,5	0 - 4	0 - 12		
ZrO_2						1 - 18		

2.2.4.3 Cam lifi türleri

Cam fiberler kimyasal kompozisyonlarına göre D, E, AR gibi harflerle sınıflandırılırlar. Her sınıftaki fiber çeşidi, gösterdiği özellikler doğrultusunda bir kullanım alanı bulur. Örnek olarak AR cam fiberler beton kompozitlerde kullanılacak şekilde bir kompozisyona sahiptir. Farklı kullanım alanları için tasarlanmış, özel kompozisyonlara sahip birçok cam fiber geliştirilmiştir (Dumlu, 2013).

Aşağıda sıklıkla kullanılan bazı cam lifi türleri ve özellikleri verilmiştir (Özdemir vd. 2006; Otuzbir, 2020; URL-1, 2021).

A Glass: Alkali cam veya soda-kireç cam olarak da bilinir. En yaygın olarak bulunan cam lifi türüdür. İçeriğinde bor kullanılabilir. Bazı tipleri %0,8'den fazla olmak kaydıyla alkali oksit bileşikleri barındırır. Kimyasal olarak kararlıdır, nispeten ucuzdur, son derece işlenebilirdir. Mukavemet, alkali dayanımı, kararlılık ve elektrik yalıtımı gibi özelliklerin fazla gerekli olmadığı hallerde tercih edilir. Üretiminde soda-kireç-silika camları kullanılır. Geri dönüştürülmüş camlar da A tipi cam lifi üretiminde değerlendirilir.

C Glass: Kimyasal cam olarak adlandırılan C Glass kimyasal etkilere karşı yüksek direnç gösterir. Korozif ortamlarda yapısal olarak kararlıdır. Bu özellik yüksek miktarda kalsiyum borosilikat içeriğinden kaynaklanmaktadır. Üretiminde kullanılan kimyasalların pH değeri, ortam ne olursa olsun (asidik veya alkali) bu tip cam liflerine oldukça yüksek direnç sağlar.

D Glass: Kompozisyonunda borontrioksit bulunması nedeniyle düşük dielektrik sabiti ile bilinen bir cam lifi türüdür. Bu özelliğinden dolayı optik kablolarda kullanılacak ideal cam lifi tipidir. D-Glass ayrıca borosilikat içerir. Bu da bu tip cam liflerine son derece düşük bir termal genleşme katsayısı verir. Bu özelliklerinden dolayı D-cam genellikle elektrikli cihazlarda ve pişirme aletlerinde kullanılır.

E Glass: Daha çok elektrik cam olarak bilinir. İyi elektrik yalıtımı sağlar. İçeriğinde alkali oksit bileşikleri %0,8 oranından daha az olan aliminyumborosilikat cam lifidir. Bu yüzden çok az alkali içerir. Sıcaklık etkisi ile erimez ancak yumuşarlar. Dünyada

en çok kullanılan cam lifi formülüdür. Elektronik uygulamalar için geliştirilmiş olsalar da günümüzde pek çok alanda kullanılmaktadırlar. E-cam, fiberglas kumaş için performans ve maliyet arasında denge sağlayan bir endüstri standardıdır.

ECR Glass: Elektronik cam lifi olarak da adlandırılır. Yüksek mekanik dayanımı, iyi su geçirimsizliği, alkali ve asit korozyonu direnci, ısı direnci, elektrik yalıtımı, yüksek yüzey direnci ile E-camdan daha iyi özelliklere sahiptir. ECR camın diğer cam lifi türlerine göre en büyük avantajı üretim yönteminin çevre dostu olmasıdır. Şeffaf cam lifi takviyeli plastik (CTP) panel uygulamalarında kullanılır.

AR Glass: Alkaliye dayanıklı cam, betonda kullanılmak üzere özel olarak geliştirilmiştir. Bileşimi Zirkonyum ile optimum seviyede özel olarak formüle edilmiştir. Bu tip cam lifini betonda kullanıma uygun kılan şey kompozisyonunda bulunan zirkonyum içeriğidir. Betona mukavemet ve esneklik yönünden katkı sağlar ve beton çatlaklarının oluşumunun önlenmesinde etkilidir. Alkali dayanımları yüksektir. Suda çözünmeleri çok zordur ve PH değişimlerinden etkilenmezler. Yüksek elastisite modülü ve çekme dayanımına sahiptir. Çelikten farklı olarak paslanma yapmaz. Yüksek asidik dayanım ve mukavemete ihtiyaç duyulan uygulamalar için idealdir. AR Glass lifler Premix cam lifi takviyeli beton (GFRC) ile diğer beton ve sıva harcı uygulamalarında kullanılmaktadır. Beton karışımlarına dahil edilmesi oldukça kolaydır.

R Glass: E-cam fiberglas ile karşılaştırıldığında daha yüksek çekme mukavemetine ve elastisite modülüne sahiptir. Asidik mukavemeti de daha yüksektir. Bu özellikler, filament çapının azaltılmasıyla elde edilir. Bu tip cam lifler savunma ve havacılık endüstrileri için geliştirilmiştir. Sert balistik zırh uygulamalarında da kullanılır.

S-2 Glass: Bu lif türü mevcut en yüksek performanslı cam lifi türüdür. Diğer cam lifi türlerine kıyasla bileşiminde daha yüksek miktarda silika mevcuttur. Sonuç olarak; gelişmiş özelliklere, daha iyi ağırlık performansına, yüksek sıcaklık direncine, yüksek basınç direncine ve iyileştirilmiş darbe direncine sahiptir. Çekme mukavemeti, geleneksel cam liflerinden yaklaşık %85 daha fazladır. Hasara karşı mükemmel tolerans gösterir. S-2 cam lifler, geleneksel cam lifi türlerinden daha iyi

olan fiziksel özellikleri nedeniyle çoğunlukla kompozit ve tekstil endüstrisinde kullanılmaktadır.

2.2.4.4 Cam liflerinin fiziksel özellikleri

Cam lifleri; dairesel en kesitli, düzgün yüzeyli ve saydamdırlar. Tipik olarak çapları 3,8 ile 20 µm arasında değişmektedir. Lif kesitinin küçük olması mukavemeti olumlu etkilemektedir. Aşınma dirençleri ve sertlik dereceleri yüksektir. Yoğunlukları 2,1-2,7 g/cm³ arasında değişir. Nem emmezler ancak bünyelerinde %0,13-0,8 arasında nem barındırırlar. Nem miktarı cam liflerinin dayanımları üzerinde etkilidir. Yanıcı değillerdir ancak sıcaklığın yükselmesi ile beraber yumuşamaya başlarlar. 250 °C üstü sıcaklıklarda mukavemetleri etkilenmeye başlar. Erime sıcaklıkları 1150 °C dolaylarındadır (Özdemir vd. 2006). Yaygın olarak kullanılan cam lifi türlerinin bazı fiziksel özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2 Cam lifi türlerinin bazı fiziksel özellikleri (Özdemir vd. 2006)

Cam Liflerinin Fiziksel Özellikleri								
Cam Türleri	**A**	**C**	**D**	**E**	**E-CR**	**AR**	**R**	**S-2**
Yoğunluk gr/cm^3	2,44	2,52	2,11 - 2,14	2,55 - 2,62	2,68 - 2,72	2,7	2,54	2,46 - 2,49
Refraksiyon İndeksi	1,538	1,533	1,465	1,558	1,576	1,562	1,546	1,521
Yumuşama Sıcaklığı ºC	705	750	771	846	882	773	952	1056
Tavlama Sıcaklığı ºC		588	521	657				816
Gerilme Sıcaklığı ºC		522	477	615			736	766

2.2.4.5 Cam liflerinin mekanik özellikleri

Cam lifleri yüksek çekme mukavemetine sahiptir. Dayanıklılıkları ve darbe dayanımları yüksektir. Kopma uzamaları düşüktür. Kopmadan önce %2 dolaylarında uzama gösterirler. Kopma uzaması daha yüksek olan cam lifi türleri de mevcuttur. Sürtünme dayanımları da azdır (Özdemir vd. 2006). Cam liflerinin mukavemet-ağırlık oranı yüksektir ancak elastik modül düşük olma eğilimindedir (Shrivastava, 2018). Yaygın olarak kullanılan cam lifi türlerinin bazı mekanik özellikleri Tablo 2.3'de gösterilmiştir.

Tablo 2.3 Cam lifi türlerinin bazı mekanik özellikleri (Özdemir vd. 2006)

Cam Liflerinin Mekanik Özellikleri								
Cam Türleri	**A**	**C**	**D**	**E**	**E-CR**	**AR**	**R**	**S-2**
Gerilme Dayanımı (MPa)								
-196 ºC		5380		5310	5310			8275
23 ºC	3310	3310	2415	3445	3445	3241	4135	4890
371 ºC				2620	2165		2930	4445
538 ºC				1725	1725		2140	2415
Elastisite Modülü (GPa)								
23 ºC	68,9	68,9	51,7	72,3	80,3	73,1	85,5	86,9
538 ºC				81,3	81,3			88,9
Kopma Uzaması (%)	4,8	4,8	4,6	4,8	4,8	4,4	4,8	5,7
Özgül Gerilme Mukavemeti (x10^3 m)		145	125	145	140		180	220
Özgül Gerilme Modülü (x10^6 m)		3	2,7	3,1	3,25		3,7	3,9

2.2.4.6 Cam liflerinin kimyasal özellikleri

Cam lifleri asit ve baz etkilerine karşı dirençlidirler. Ancak fosforik ve sıcak hidroflorik gibi asitlerden ve konsantre bazlar ile sıcak baz çözeltilerinden etkilenirler. Organik çözücülerden etkilenmezler. Mikroorganizma etkilerinden zarar

görmezler. Cam liflerinin kimyasal etkisi altındaki direnci, bu etkiler altında ağırlıklarının yüzde olarak ne kadarını kaybettikleri ile belirlenmektedir. Belirlenen bu değerin düşük olması cam liflerin bahsedilen etkiler sebebiyle oluşacak korozyona karşı daha yüksek dirençli olduğunu göstermektedir. Asidik koşullarda oluşacak korozyon etkisi; asit konsantrasyonuna, ortam sıcaklığına, liflerin çapına ve çözeltinin hacmine bağlıdır. Cam lifleri yıkama gibi işlemlerde suyun etkisi ile mukavemet yönünden kayba uğramaktadır. Bu kayıp lif çapına ve liflerin alkali içeriğine göre değişmektedir (Özdemir vd. 2006). Bazı cam lifi türlerinin kimyasal özellikleri Tablo 2.4'de belirtilmiştir.

Tablo 2.4 Cam lifi türlerinin bazı kimyasal özellikleri (Özdemir vd. 2006)

Cam Liflerinin Kimyasal Özellikleri									
Cam Türleri		**A**	**C**	**D**	**E**	**E-CR**	**AR**	**R**	**S-2**
Ağırlık Kaybı (%)									
H_2O	24 s	1,8	1,1	0,7	0,7	0,6	0,7	0,4	0,5
	168 s	4,7	2,9	5,7	0,9	0,7	1,4	0,6	0,7
HCl (%)	24 s	1,4	4,1	21,6	42	5,4	2,5	9,5	3,8
	168 s		7,5	21,8	43	7,7	3	10,2	5,1
H_2SO_4 (%10)	24 s	0,4	2,2	18,6	39	6,2	1,3	9,9	4,1
	168 s	2,3	4,9	19,5	42	10,4	5,4	10,9	5,7
Na_2CO_3 (%10)	24 s		24	13,6	2,1		1,3	3	2
	168 s		31	36,3	2,1	1,8	1,5		2,1

2.2.4.7 Cam liflerinin termal ve elektriksel özellikleri

Cam liflerinin dielektrik dayanımı yüksek, dielektrik sabitleri ise düşüktür. Elektriği iletmezler. Düşük çaplarda bile iyi elektrik yalıtımı sağlarlar. Isı iletkenlikleri yoktur. Yüzey alanı / ağırlık oranlarının yüksek olmasından dolayı ısı yalıtımları yüksektir (URL-2). Cam liflerinin dayanımları, termal şartlarda oluşan değişikliklerden bu şartlarda geçirilen zamana göre fazla olmamakla birlikte olumsuz etkilenmektedir (Özdemir vd. 2006). Cam liflerinin türlere göre bazı termal özellikleri Tablo 2.5'de gösterilmiştir.

Tablo 2.5 Cam lifi türlerinin bazı termal özellikleri (Özdemir vd. 2006)

Cam Liflerinin Termal Özellikleri								
Cam Türleri	**A**	**C**	**D**	**E**	**E-CR**	**AR**	**R**	**S-2**
Isı Sığası (J/g^{o}C)								
23 ^{o}C	0,796	0,787	0,733	0,81			0,732	0,737
200 ^{o}C		0,9		1,03	0,97		0,938	0,821
Isıl Genleşme (10^{-7}/^{o}C)								
-30 ^{o}C ila 250 ^{o}C	73	63	25	54	59	65	33	16

2.2.4.8 Cam liflerinin kullanım alanları

Kullanılacakları alandan beklenen özelliği gösterecek şekilde üretilen birçok cam lifi türünün olması ve cam liflerinin yüksek mekanik ve durabilite özelliklerine sahip olmaları çeşitli alanlarda kullanılmalarını sağlamıştır. Cam lifleri; tekstil, ısı ve elektrik yalıtımı, plastik sektörü, kimyasalların saklanması ve nakliyesi, filtrasyon, ambalaj ve kağıt sektörü, yapı sektörü, otomotiv, denizcilik, havacılık ve uzay sektörleri gibi birçok alanda kullanılırlar (Özdemir vd. 2006).

Kompozit üretimi alanında takviye malzemesi olarak çeşitli lifler kullanılmakta ise de bunlar arasında en yaygın olarak kullanılanı cam lifleridir. Cam lifi takviyeli kompozitler inşaat sektöründe; cephe kaplama ve estetiğin ön planda olduğu uygulamalar, prebarik yapı elemanları, su kanalları, kalıcı kalıplar, restorasyon ve dekorasyon gibi alanlarda kullanılmaktadır. Cam liflerinin çimento esaslı kompozitlerde kullanılabilmesi için alkali dirençlerinin yüksek olması gerekmektedir. Bu nedenle inşaat sektöründe AR tipi cam liflerinin kullanımı uygundur. AR cam liflerinin kompozisyonunda bulunan zirkonyum dioksit, bu cam lifi türünün alkali dirençli olmasını sağlamaktadır. Ancak kompozisyondaki zirkonyum dioksit oranının %16'dan az olmaması gerekmektedir (Maraşlı, 2019).

2.3 Doğal Zeolitler

Zeolitler hakkındaki ilk bulgular İsveçli kimyager ve mineralbilimci Frederic Cronstedt tarafından 1756 yılında tespit edilmiştir. Bazı minerallerin ısıtıldığında kaynama benzeri bir su buharı çıkışı eşliğinde eridiğini gözlemleyen Cronstedt, bu mineralleri bünyelerindeki suyu atarken gösterdikleri davranış nedeniyle zeolit olarak adlandırmıştır. Zeolit kelimesi Yunanca'da kaynayan taş anlamına gelmektedir (Yörükoğulları, 1985).

Zeolitler, milyonlarla ifade edilen yıllar önce volkanik kaynaklı küllerin sulu ortamlara ulaşması ve bu ortamlarda değişikliğe uğramalarıyla oluşmuştur. Tektosilikatlar mineral grubunda yer alan zeolitler, bünyelerinde alkali ve toprak alkali elementler bulunduran, kristal yapılı sulu alüminyum silikatlardır (Turan, 2018). Zeolit kristallerinin yapısını oluşturan en temel bileşen Siliyum ve Aliminyumun dörtyüzeyli oksitleridir. SiO_4 ve AlO_4 dörtyüzeylilerinin birleşerek oluşturdukları primer yapı birimleri oksijen iyonları vasıtasıyla birleşerek tek veya çift halkalı yapıyı meydana getirirler. Bu çokyüzlü sekonder yapı şeklinin üç boyutlu farklı formlarda sıralanması ile de mikro gözenekli bir yapıya sahip zeolit iskeleti oluşur. Oluşan bu mikro gözenekler mikro açıklıklarla birleşerek çok boyutlu boşluklardan oluşan bir kanal sistemi meydana getirirler. Boşluk hacminin toplam hacme oranı %20-50 civarındadır. Sıvı ve gaz molekülleri ile alkali iyonlar, zeolitin yapısında oluşan bu boşluklara rahatça girebilir ve kanallarda yer değiştirebilir. Bu yapı zeolitlerin en dikkat çekici özelliği olan moleküler elek özelliğini kazanmasını sağlar (Karaüç, 2008).

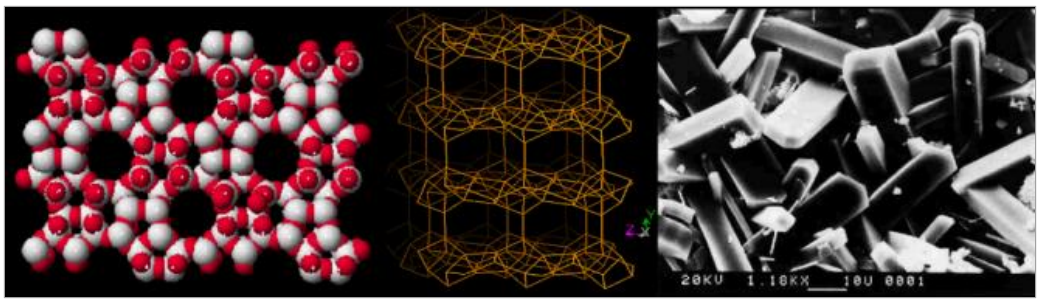
Zeolitlerin; alkali topraklarda, denizlerde derin tortullarda, sıcak olmayan hidrolojik ve jeotermal açık sistemlerde ve alkali-tuzlu göllerde oluştuğu bilinmektedir (Soylu ve Gökkuş, 2017). Zeolit kaynakları dünyada çeşitli bölgelerde bulunmakla birlikte en çok zeolit üretimini Çin gerçekleştirmektedir. Ülkemizde; Balıkesir/Bigadiç, Manisa/Gördes, Kütahya/Şaphane, İzmir/Urla, Bolu ve Kapadokya'da kalitesi ve rezervi yüksek zeolit kaynakları vardır. Doğal olarak bulunan zeolit türleri arasında; natrolit, lamontit, hölantin, şabazit, filipsit, klinoptilolit ve analsit oldukça yaygındır (Gülen vd. 2012).

2.3.1 Doğal Zeolitlerin Kimyasal Özellikleri

Zeolitler yapılarında bulundurdukları Si/Al oranı ve sahip oldukları katyon türü ile katyon sayılarında farklılıklar gösterse de genel olarak kimyasal yapıları aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$(Li, Na, K)_x\,(Mg, Ca, Fe, Sr, Ba)_y\,[Al(x + 2y)\,Si_{n-(x+2y)}\,O_{2n}] \cdot m_0H_2O$$

İfade de geçen; x, tek yüklü alkali katyonların, y, çift yüklü toprak alkali katyonların, m_0, su molekülünün sayısını, n ise oksijen atomu sayısının ikide birini belirtmektedir. Zeolit yapısında bulunan su moleküllerinin sayısı genellikle oksijen atomlarının sayısından azdır. Silisyum ve Aliminyum atomlarının sayısı oksijenin yarısı kadardır. Dörtyüzeyli alüminyum atomlarının sayısı, değiştirilebilir katyonların pozitif yüklerinin (x + 2y) toplamı kadardır. Silisyum ve alüminyum atomlarının yer değiştirme oranı 1/5 ile 1/1 arasındadır ve bu yer değiştirme zeolit iskeletinin, alkali ve toprak alkali metal katyonlarınca karşılanan negatif yükünü gösterir. Zeolitler, iskelet yüzeylerinde negatif yüklü olmalarından dolayı katyon değiştirici özellik gösterirler (Tokat, 2019). Doğal zeolit mineralinin moleküler yapısı, şematik ve SEM görüntüleri Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Zeolit mineralinin moleküler yapısı, şematik ve SEM görüntüsü (Özkırım ve Yörükoğulları, 2005)

2.3.2 Doğal Zeolitlerin Fiziksel Özellikleri

Zeolit yatakları yüzeylere yakın olup genellikle açık renkli kristal tuzları formunda bulunurlar ve madenciliği kolaydır. Rahatlıkla kesilebilir ve işlenebilirler. Yoğunlukları düşüktür. Bulundurdukları katyonlara bağlı olarak farklılaşma olsa da yoğunlukları genellikle 1,9-2,3 g/cm^3 arasındadır. Gözenekli yapıdadırlar. Gözeneklerin çapları ortalama 2-8 Å aralığındadır (Soylu ve Gökkuş, 2017). Mohs

sertlikleri 4–6 aralığında değişmektedir. Asit etkisi altında kaldıklarında erirler ve geride silisli bir tortu bırakırlar (Hatipoğlu, 2014). Doğal zeolitlerin fiziksel görünümü Şekil 2.3'de verilmiştir.



Şekil 2.3 Doğal zeolitlerin fiziksel görünümü (URL-3)

Yapılarında yüksek miktarda silis içerirler. Kısmen sodyum, kalsiyum, potasyum, stronsiyum ve baryum içeriği de bulunabilir. Adsorbsiyon kapasiteleri yüksektir ve moleküler elek özelliği gösterirler. İyon değişikliği yapabilirler (Geçer, 2020). Kristal yapılarında bozunma olmadan tersinir olarak bünyelerindeki suyu kaybedebilir, yeniden kazanabilir ya da katyon değiştirebilirler (Turan, 2018).

Zeolitler arasında en çok tercih edilen, ülkemizde ve dünyada en çok kaynağı bulunan zeolit türü klinoptilolittir. Klinoptilolitlerin adsorptif ve moleküler elek özellikleri, kataliz ve dehidrasyon kapasiteleri ile iyon değiştirme yetenekleri yüksektir. Kristal yapısı monokliniktir. Mohs sertlikleri 3,5 civarındadır. Bünyesinin %27 sine kadarında su bulunabilmektedir. Yapıdaki bu su molekülleri 350-400 ºC dolaylarında yapıdan ayrılmaktadır. Isıya karşı dayanıklılığı yüksek olup 750 ºC'ye kadar kristal yapısında değişiklik olmamaktadır. Si/Al molekülleri oranı 0,425:5,25, iskelet yapısındaki boşluk oranı ise %39 dolaylarındadır. Asitlere karşı dayanıklılığı yüksektir (Ersoy, 2000; Soylu ve Gökkuş, 2017).

2.3.3 Doğal Zeolitlerin Puzolanik Aktiviteleri

Puzolanlar, tek başına bağlayıcı özelliği göstermeyen ya da çok az gösteren, bununla birlikte öğütülerek tane boyutlarının inceltilmesi ve bu formda iken $Ca(OH)_2$ (sönmüş kireç) ve su ile bir araya gelmesiyle oluşan reaksiyon sonucunda bağlayıcılık kazanan silisli, silisli-alüminli malzemelerdir. Oluşan bu reaksiyonun

verimliliğinin ve reaksiyon tamamlandığında kazanılan bağlayıcılığın derecesi puzolanik aktiviteyi ifade etmektedir. Puzolanların yeterli seviyede puzolanik aktiviteye sahip olabilmeleri için; yüksek miktarda silika ve alümina içermeleri, amorf yapılı olmaları ve ince taneciklerden oluşan formda bulunmaları gereklidir. Puzolanik aktivite, dayanım aktivite indeksi ile ifade edilmektedir. Bu indeks, puzolanla ikame edilmiş örnekler ile kontrol örneğinin ortalama basınç mukavemetlerinin oranıdır. İstenilen düzeyde bağlayıcılık kazanılabilmesi için bu oranının %70 altında olmaması gerekir (Eren, 2018).

Zeolitlerin puzolanik aktiviteleri oldukça yüksektir. Puzolanik reaksiyona giren zeolitlerin gösterecekleri reaktivite; zeolitin faz yapısı, özgül yüzeyi, çerçeve yapılarındaki Si/Al oranı, katyon değiştirebilirliği ve karışımdaki su oranı gibi etkenlere bağlıdır. Zeolitlerin geniş özgül yüzey alanları ve yarı kararlılıkları reaktivitelerini arttırmaktadır. Puzolanik reaksiyon, uzun zaman periyodunda zeolitin aktif silika ve alümina içeriğinden, kısa periyotda ise katyon içeriğinden etkilenmektedir (Liguori vd. 2019).

Puzolanik aktivitenin arttırılmasında; öğüterek tanecik boyutunun küçültülmesi, kalsinasyon uygulaması ve kimyasal aktivatörler kullanılması etkilidir. Kalsinasyon, yüksek sıcaklıklarda yapılan bir kürleme işlemi olup kalsinasyon sırasında uygulanan sıcaklık değerinin puzolanik aktivite üzerindeki etkisi önemlidir. Puzolanik aktivitenin arttırılabilmesi için uygulama sıcaklığının 680˚C ile 870˚C arasında olması uygundur. Daha yüksek sıcaklıklar puzolanik aktiviteyi düşürmektedir. Bununla birlikte kalsinasyon sonucunda puzolanın özgül yüzeylerinde değişim oluşabilir. Kalsinasyon uygulaması zeolitlerin puzolanik aktivitelerini arttırmaktadır (Eren, 2018).

2.3.4 Zeolitlerin Kullanım Alanları

Zeolitler; adsorbsiyon kapasiteleri, moleküler elek özellikleri, katyon değiştirme yetenekleri gibi işlevleri nedeniyle çok çeşitli alanlarda kullanım imkanı bulmuştur. Enerji, kirlilik kontrolü, metalürji, tarım ve hayvancılık gibi sektörlerde, bunların dışında katkı maddesi olarak; kağıt ve inşaat sektörlerinde, fosfat ikamesi olarak

deterjan sektöründe, çeşitli ilaçlar ile diş macunlarının üretimi için sağlık sektöründe kullanılmaktadır (Gülen vd 2012).

Zeolitler, inşaat sektöründe; mukavemet ve dayanıklılık yönünden olumlu etkileri sebebiyle puzolanik çimento ve beton üretiminde, hafif ve işlenebilirlikleri yüksek olduklarından kesilmiş yapı taşı ve hafif agrega olarak kullanımları uygundur. Zeolitler, sürekli su altında bulunan ve korozyon etkilerinin yüksek olduğu ortamlarda kullanılan hidrolik çimentolar için önemli bir katkıdır.(Sarıkaya, 2006).

2.3.5 Doğal Zeolitlerin Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik ve Durabilite Özelliklerine Etkisi

Zeolitler; silika ve alümin içerikleri, geniş özgül yüzeyleri, düşük özgül ağırlıkları, puzolanik aktivitelerinin yüksekliği ve kolay öğütülebilirlikleri ile çimento esaslı kompozitlerde kullanıma uygundurlar (Yazıcıoğlu, 2016). Ancak karışımda kullanılacak zeolit miktarının iyi belirlenmesi gerekmektedir.

Çimento ikame malzemesi olarak zeolitlerin kullanılması ile karışımda kullanılan zeolit oranına bağlı olarak; priz süresinde kısalma, hidratasyon ısısında düşüş, serbest kireç içeriğinin giderilmesi, birim hacim ağırlıkta azalma, aşınma direncinde artış, geçirimsizlik, asit ve sülfat etkilerine ve korozyona karşı gösterilen dirençte artma, geç yaşlardaki dayanımda yükselme, ısıl iletkenlik katsayısında düşüş gibi özellikler elde edilmektedir (Hatipoğlu, 2014; Geçer, 2020). Bunların yanı sıra zeolit katkısı karışımın alkali seviyesini düşürerek alkali-silika reaksiyonu riskini en aza indirmekte ve betonda oluşabilecek genleşme ve çatlamaları engellemektedir (Caputo vd. 2008).

Yukarıda bahsedilen olumlu etkilerin yanı sıra çimento katkısı olarak zeolit kullanımının, karışımın su ihtiyacının artması ve işlenebilirliğin azalması gibi istenmeyen etkileri de mevcuttur. Ancak bu etkiler süper akışkanlaştırıcılar kullanılarak giderilebilir (Caputo vd. 2008). Zeolitlerin kalsine edilerek çimento ikamesi yapılması durumunda, kalsinasyon yapılmamış zeolitlere kıyasla karışımın su ihtiyacı azalmakta ve daha yüksek basınç dayanımı elde edilmektedir (Küçükyıldırım ve Uzal, 2014).

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 Malzemeler

3.1.1 Çimento

Bu çalışmada ASTM C 150 (ASTM C150 2020) standardına uygun beyaz Portland çimentosu kullanılmıştır. Beyaz Portland çimentosuna ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Beyaz Portland çimentosuna ait kimyasal ve fiziksel özellikler

Kimyasal Özellikler		**Fiziksel Özellikler**		
Oksit	**%**			
CaO	66,4	Özgül Ağırlık	3,21	gr/cm^3
SiO_2	19,9	Blaine Özgül Yüzey Alanı	4660	cm^2/gr
Al_2O_3	3,3			
Fe_2O_3	0,2	Priz Başlangıcı	55	dk.
MgO	1,1	Priz Sonu	360	dk.
SO_3	3,3	2 Günlük Basınç Dayanımı	38,1	MPa
Na_2O	0,5			
K_2O	1,7	28 Günlük Basınç Dayanımı	61,5	MPa
Kızdırma Kaybı	3,3			

3.1.2 Doğal Zeolit

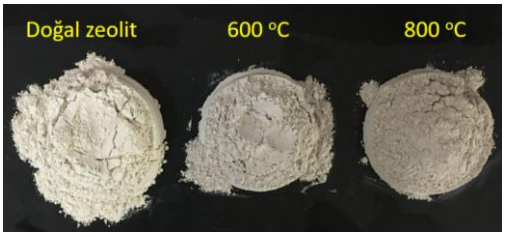
Çalışmada çimento yerine kullanılan zeolit Balıkesir-Bigadiç yöresindeki maden ocaklarından temin edilmiştir. Bigadiç zeolit oluşumları incelendiğinde zeolit minerali olarak %75'in üzerinde klinoptilolit-höylandit'in varlığı ortaya konulmuştur. Doğal klinoptilolit yüksek absorbsiyon kapasitesi, katyon değişimi, dehidrasyon kapasitesi ile en çok tercih edilen zeolit minerali türüdür. Klinoptilolit ile höylandit arasındaki fark klinoptilolitin silis içeriğince daha zengin ve ısıya karşı daha dayanıklı olmasından kaynaklanmaktadır (Köktürk, 1995; Bilgin ve Kantarcı, 2018).

Bu çalışmada üç farklı zeolit kullanılmıştır. 1. doğal zeolit (Z0), 2. 600 ºC'de kalsine edilen (Z600), 3. 800 ºC'de kalsine edilen zeolittir (Z800). Zeolitlere ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 3.2'de sunulmuştur.

Tablo 3.2 Zeolite ait kimyasal ve fiziksel özellikler

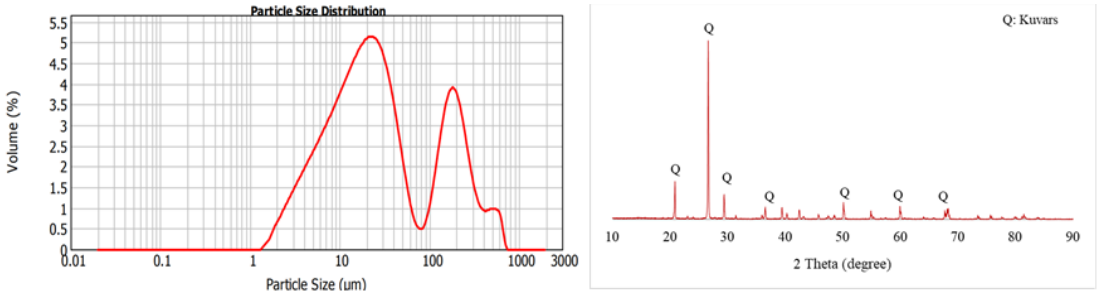
Kimyasal Özellikler								
CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	Kız. K.
2,18	70,11	11,45	1,89	1,62	0,77	2,36	0,03	9,52

Fiziksel Özellikler		
	Özgül ağırlık (g/cm^3)	BET Özgül yüzey alanı (m^2/g)
ZN	2,11	28,645
Z600	2,16	32,582
Z800	2,21	35,594



3.1.3 Agrega

Çimento esaslı kompozitlerin hazırlanmasında silis agregası kullanılmıştır. Agrega 0-1 mm elek açıklığına sahiptir. Agregaya ait tane boyutu dağılımı (Particle size distribution) mastersiezer ile belirlenmiş ve Şekil 3.1'de XRD (X-ışınları difraktometresi) analizi ile birlikte sunulmuştur. Silis kumuna ait d10, d50 ve d90 değerleri sırasıyla 5.05 µm, 23.85 µm ve 228.90 µm olarak belirlenmiştir. Ayrıca XRD analizine göre silis agregasında kuvars pikleri gözlenmiştir.



Şekil 3.1 Silis agregasının tane dağılımı ve mineralojik yapısı

3.1.4 Cam Lifi

Karışımların hazırlanmasında 12 mm uzunluğundaki cam lifleri bağlayıcı miktarına göre %1,5 ve 3,0 oranlarında kullanılmıştır. Cam lifinin mühendislik özellikleri Tablo 3.3'de sunulmuştur.

Tablo 3.3 Cam lifinin mühendislik özellikleri

Özellikler	
Lif uzunluğu	12 mm
Lif çapı	14 µm
Çekme dayanımı	1700 MPa
E-Modülü	72 GPa
Narinlik (l/d)	857
Özgül ağırlık	2,68
Yumuşama sıcaklığı	860 ^{o}C
Korozyon direnci	Mükemmel



3.1.5 Süperakışkanlaştırıcı ve Su

Karışımların su/bağlayıcı (s/b) oranının düşük olması işlenebilirliği azaltmaktadır. Ayrıca karışıma ilave edilen zeolit ve cam liflerinin de işlenebilirliği azaltacağı düşünüldüğü için yeni nesil bir süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Süperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri Tablo 3.4'de verilmiştir. Karışım ve kür suyu olarak içilebilir nitelikteki Kastamonu şebeke suyu kullanılmıştır.

Tablo 3.4 Süperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri

Özellikler					
Özgül ağırlık	Görünüm	Klor içeriği	Kimyasal yapı	Katı madde	pH
1,14	Koyu kahverengi	<%0,1	Polikarboksilik eter	%33	6,0-6,3

3.2 Yöntem

3.2.1 Karışımların Hazırlanması ve Kür

Çimento esaslı kompozitlerin üretiminde çimento yerine kullanılan zeolit için ani kalsinasyon işlemi uygulanmıştır. Ani kalsinasyon işlemi 600 ºC'de 30 dakika, 800 ºC'de 15 dakika olacak şekilde uygulanmıştır. Ani kalsinasyon uygulanan zeolitli karışımlar doğal zeolit ile üretilen karışımlar ile karşılaştırılmıştır. Kalsine edilen zeolitler kalsinasyon işleminden sonra 1 saat bilyalı değirmen ile öğütülmüştür. Doğal zeolitler de aynı şekilde 1 saat süre ile öğütme işlemine tabi tutulmuştur. Deneysel çalışma kapsamında yapılan testler üç örnek üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sadece basınç dayanımı deneyinde 6 adet numune kullanılmıştır. Karışımların hazırlanmasında Hobart tipi mikser kullanılmıştır. Tüm karışımların agrega/bağlayıcı (çimento+zeolit) oranı 1, su/bağlayıcı oranı ise 0,33 olarak seçilmiştir. Doğal ve kalsine zeolit çimento yerine %15 ve 30 oranında, cam lifi ise bağlayıcı ağırlığına bağlı olarak %1,5 ve 3,0 oranında kullanılmıştır. Deneysel çalışmaya ait karışım değişkenleri Tablo 3.5'de verilmiştir. Bu oranlara göre 18 adet zeolitli ve 3 adet referans karışım olmak üzere toplam 21 karışım hazırlanmıştır. Karışımlarda kullanılan malzeme miktarları Tablo 3.6'da sunulmuştur. Kalıplarından 24 saat sonra sökülen çimento esaslı kompozitler deney gününe kadar su kürüne tabi tutulmuştur.

Tablo 3.5 Deneysel çalışmaya ait değişkenler

Değişkenler	Düzey 1	Düzey 2	Düzey 3
Kalsinasyon Tipi	0	600 ºC-30 dakika	800 ºC-15 dakika
Cam Lifi (%)*	0	1,5	3
Zeolit İkame Oranı(%)	0	15	30
*Bağlayıcı ağırlığına göre katılmıştır (Çimento+Zeolit)			

Tablo 3.6 Karışım oranları ve malzeme miktarları

Karışım No.	Karışım Oranları			Malzeme Miktarları (gr)					
	Zeolit (%)	Kalsinasyon Sıcaklığı (ºC)	Cam Lifi (%)	Agrega	Çimento	Zeolit	Su	SA*	Cam Lifi
M1	15	0	0	450	382,5	67,5	148,5	15,8	0
M2	30	0	0	450	315	135	148,5	27	0
M3	15	0	1,5	450	382,5	67,5	148,5	15,8	6,8
M4	30	0	1,5	450	315	135	148,5	27	6,8
M5	15	0	3	450	382,5	67,5	148,5	15,8	13,5
M6	30	0	3	450	315	135	148,5	27	13,5
M7	15	600	0	450	382,5	67,5	148,5	15,8	0
M8	30	600	0	450	315	135	148,5	27	0
M9	15	600	1,5	450	382,5	67,5	148,5	15,8	6,8
M10	30	600	1,5	450	315	135	148,5	27	6,8
M11	15	600	3	450	382,5	67,5	148,5	15,8	13,5
M12	30	600	3	450	315	135	148,5	27	13,5
M13	15	800	0	450	382,5	67,5	148,5	15,8	0
M14	30	800	0	450	315	135	148,5	27	0
M15	15	800	1,5	450	382,5	67,5	148,5	15,8	6,8
M16	30	800	1,5	450	315	135	148,5	27	6,8
M17	15	800	3	450	382,5	67,5	148,5	15,8	13,5
M18	30	800	3	450	315	135	148,5	27	13,5
R1	-	-	0	450	450	0	148,5	3,4	0
R2	-	-	1,5	450	450	0	148,5	3,4	6,8
R3	-	-	3	450	450	0	148,5	3,4	13,5

*Süperakışkanlaştırıcı (SA) miktarı zeolit miktarı arttıkça arttırılmıştır.

3.2.2 Çimento Esaslı Kompozitlerin İşlenebilirliği

Çimento esaslı kompozitlerin işlenebilirliği yayılma tablası kullanılarak belirlenmiştir. Harçların akış çapları ASTM C 1437 (ASTM C1437 2020)

standardına göre belirlenmiştir. Çimento esaslı kompozitlerin yayılma çapları, X ve Y yönlerinde (iki eksen) ortalama uzunluk ölçülerek belirlenmiştir.

3.2.3 Çimento Esaslı Kompozitlerin Fiziksel Özellikleri

Çimento esaslı kompozitlerin görünür porozite, su emme ve kuru birim hacim ağırlık gibi fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Çimento esaslı kompozitlerin fiziksel özellikleri 91 günlük kürleme sürecinin sonunda belirlenmiştir. Fiziksel özellikler 50x50x50 mm küp numuneler üzerinde ölçülmüştür. Fiziksel özellikler ASTM C642 (ASTM C642 2013) standardına göre ölçülmüştür. Etüvde kurutulmuş numuneler, 50 ºC'de üç gün süreyle kurutularak fiziksel deneyler gerçekleştirilmiştir.

3.2.4 Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Çimento esaslı kompozitlerin eğilme ve basınç dayanımları 7, 28 ve 91. günlerde belirlenmiştir. Çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımı ASTM C348 (ASTM C348 2021) standardına göre gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımı için 40x40x160 mm prizma numuneleri kullanılmıştır. ASTM C349'a (ASTM C349 2018) göre, üç nokta eğilme deneyinden sonra elde edilen numunelerde basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir.

3.2.5 Çimento Esaslı Kompozitlerin Kuruma Büzülmesi Özellikleri

Çimento esaslı kompozitlerin kuruma büzülmeleri belirli aralıklarla 120 gün boyunca ölçülmüştür. Kuruma büzülmesinin zamana bağlı değişimi 25x25x285 mm harç çubuklarında ölçülmüştür. Çimento esaslı kompozitler yedi günlük su küründen sonra laboratuvar koşullarında bekletilmiştir. Kuruma büzülmesi, ASTM C596 (ASTM C596 2018) standardı ile belirlenmiştir. Laboratuvar koşullarında bekletilen harç çubuklarının boy değişimi yedi günde bir ölçülmüştür. Çimento esaslı kompozitlerin boy değişimleri dijital bir komparatör ile belirlenmiştir.

3.2.6 Çimento Esaslı Kompozitlerin Kapilarite Özellikleri

Kompozitlerin zamana bağlı su işleme derinlikleri ASTM C 1585 (ASTM C1585 2020) standardına göre belirlenmiştir. 50x50x50 mm küp numunelerde su işleme derinlikleri 28. güne kadar ölçülmüştür. Kapilarite testi, etüvde kurutulmuş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Etüv kurusu numuneler 50 ºC'de üç gün süreyle kurutularak elde edilmiştir. Numunelerin yan yüzeylerine (yaklaşık 1 cm) su yalıtım malzemesi uygulanmıştır. Bu sayede suyun sadece dikey yönde hareket etmesi sağlanmıştır. Su işleme derinlikleri 91 gün kür işlemine tabi olan numunelerde ölçülmüştür.

3.2.7 Çimento Esaslı Kompozitlerin Hızlandırılmış Eskitme Özellikleri

Çimento esaslı kompozitler hızlandırılmış eskitme süreci için 101 gün 50 ºC sıcaklıktaki su içerisinde bekletilmiştir. Literatürde cam lifi takviyeli kompozitlerde genellikle bu yöntem ile hızlandırılmış eskitme süreci uygulanmaktadır. Hızlandırılmış eskitme sürecinde 40x40x160 mm boyutunda prizma numuneler kullanılmıştır. Eskitme sürecinin sonunda numuneler üzerinde ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Ayrıca basınç ve eğilme dayanımı gibi mekanik özellikler de belirlenmiştir.

3.2.8 Çimento Esaslı Kompozitlerin Donma Çözülme Dayanıklılığı

Çimento esaslı kompozitlerin donma-çözülme dayanıklılığı için ASTM C666 (ASTM C666 2015) standardı kullanılmıştır. 40x40x160 mm boyutlarındaki numunelerde donma-çözülme dayanıklılığı belirlenmiştir. Çimento esaslı kompozitler 60 ve 120 donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılmıştır. Ayrıca numunelerin hasar derecesini belirlemek için ağırlık kaybı ve ultrases ses geçiş hızı (UPV) ölçülmüştür. Çimento esaslı kompozitler, 91 günlük kür sürecinden sonra donma-çözülme etkisine maruz bırakılmıştır. Döngülerde donma süresi 7 saat, çözülme süresi 5 saat (günde iki döngü) olarak belirlenmiştir.

3.2.9 Çimento Esaslı Kompozitlerin Islanma Kuruma Dayanıklılığı

Çimento esaslı kompzoitlerin ıslanma kuruma dayanıklılığı için 25, 50 ve 75 olmak üzere üç farklı döngü gerçekleştirilmiştir. Numuneler 24 saat oda koşullarındaki su içerisinde bekletildikten sonra 24 saat 50 ºC sıcaklığa sahip etüvde kurutulmuştur. Kurutma esnasında etüvün fan hızı yüksek devirli olarak ayarlanmıştır. Islanma kuruma etkisinde bir döngü iki günden oluşmaktadır. Islanma kuruma döngüleri için 40x40x160 mm boyutundaki numuneler üretilmiştir. Islanma kuruma etkisinden sonra numuneler üzerinde mekanik özellikler ve ağırlık kayıpları belirlenmiştir.

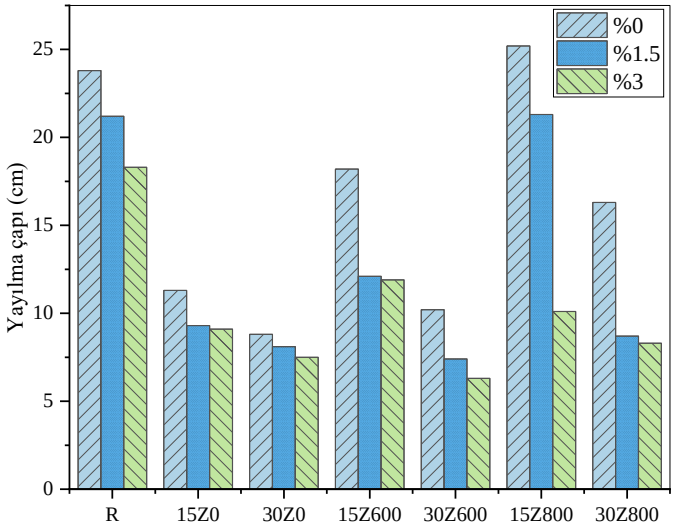
3.2.10 Çimento Esaslı Kompozitlerin Mikroyapı Özellikleri

Normal kür ve hızlandırılmış eskitme sürecine maruz kalan çimento esaslı kompozitlerin mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. SEM görüntüleri farklı büyütmelerde elde edilmiştir. SEM görüntüleri Kastamonu Üniversitesi'ne bağlı MERLAB (Merkezi Araştırma Laboratuvarı) biriminde elde edilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Cam Lifli Çimento Esaslı Kompozitlerin Taze Hal Özellikleri

Şekil 4.1'de cam lifi ve zeolit katkılı kompozitlerin yayılma çapları verilmiştir. Referans karışımların yayılma çapı 18,3-23,8 cm arasında değişmektedir. Referans karışımlarda %1,5 ve 3 oranında cam lifi kullanılması durumunda yayılma çapı sırasıyla %10,9 ve %23,1 oranında azalmıştır. Karışımlarda %15 oranında doğal zeolit kullanılması durumunda yayılma çapları genellikle 10 cm değerinin altına düşmektedir. Doğal zeolitin %30 oranında olması durumunda yayılma çapı %63 ile 68,5 oranında azalmaktadır. Kalsine edilen zeolitlerde ise işlenebilirlik doğal zeolitli karışımlara göre nispeten iyileşmiştir. 600 ºC'de kalsine edilen zeolitlerin %15 oranında kullanılması halinde yayılma çapı 11,9-18,2 cm arasında değişmektedir. Ancak zeolit oranının %30 olduğu karışımlarda %3 cam lifi kullanılması yayılma çapını 6,3 cm'ye kadar düşürmüştür. Kalsinasyon sıcaklığının arttırılarak 800 ºC'ye çıkarılması halinde yayılma çaplarında artışlar gözlenmiştir. Özellikle %15 oranında kalsine zeolit kullanılan karışımların yayılma çapı referans karışıma göre artış göstermiştir. Ancak %1,5 ve 3 oranında cam lifi kullanılması ile yayılma çapları sırasıyla %15,5-59,9 oranında azalmıştır. 800 ºC'de kalsine edilmiş zeolitin %30 oranında kullanılması halinde yayılma çapı referans karışıma göre azalmıştır. Ancak yayılma çapı doğal zeolit ve 800 ºC'de kalsine edilmiş zeolite göre daha fazladır. 800 ºC'de kalsine zeolitte cam lifi kullanımı işlenebilirliği daha fazla etkilemiştir. Bu karışımlarda cam lifi kullanılması halinde yayılma çapı yaklaşık %48 oranında azalmıştır.



Şekil 4.1 Çimento esaslı kompozitlerin yayılma çapları

Çimento esaslı kompozitlerde kullanılan cam lifi pasta içerisinde içsel sürtünmeyi arttırdığı için karışımların yayılma çapları azalmıştır. Özellikle zeolitli karışımlarda %3 oranında cam lifi kullanılması yayılma çapının 17 cm değerinin altında olmasına neden olmuştur. Kalsinasyon sıcaklığı arttıkça karışımların işlenebilirliği iyileşmektedir. Bu durum boşluklu bir yapıya sahip olan zeolitin kalsinasyon ile boşluk yapısının azaldığını göstermektedir. Özellikle ani kalsinasyon işleminin bu süreçte etkili olduğu gözlenmiştir. Ani kalsinasyon ile zeolitlerin boşluk yapısı azalmış ancak özgül yüzey alanları artış göstermiştir. Bu yüzden kalsinasyon uygulanmış zeolitlerde ikame oranı arttıkça işlenebilirlik azalmaktadır. İşlenebilirlik açısından 800 ºC'de kalsine edilen zeolitlerin doğal zeolitli karışımlara göre daha uygun olduğu belirlenmiştir.

Cam lifi ilavesi çimento esaslı malzemelerin taze hal özellikleri üzerinde bazı olumsuz etkilere sahiptir. Lif ilavesinin en belirgin dezavantajı işlenebilirliği azaltmasıdır. Cam lifi takviyeli çimento esaslı malzemelerin karışım süreci daha zor olmaktadır (Kuder vd. 2007). Lif takviyeli betonlar için, karıştırma süresinin uzaması, agregaların sürtünmesi nedeniyle lif yüzeyinin ciddi pürüzlülüğünü arttırır ve bu da betonun performansı üzerinde olumlu bir etki gösterir. Bununla birlikte, çok fazla karıştırma, lifleri daha küçük parçalara ayırabilir ve dolayısıyla önemli ölçüde azaltılmış bir performansa neden olabilir. Jiao vd. (2019) tarafından cam lifi takviyeli kompozitlerin reolojik özellikleri incelenmiş ve cam lifi oranı arttıkça karışımların

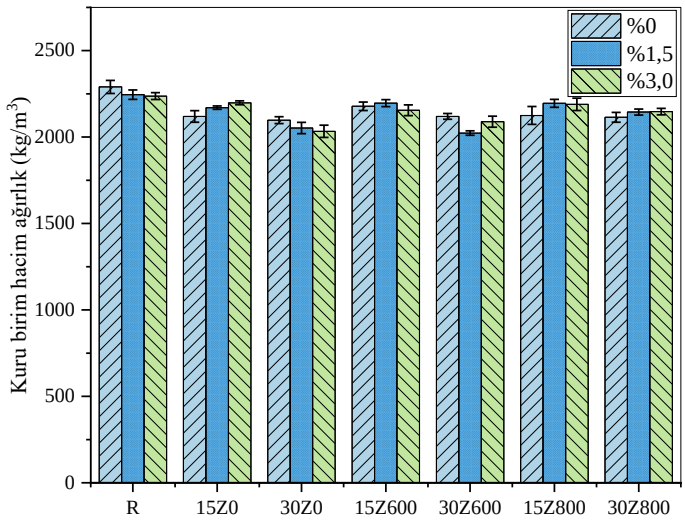
kayma gerilmelerinin arttığı gözlenmiştir. Ahmad vd. (2017) yaptıkları çalışmada kendiliğinden yerleşen betonlara cam lifi takviyesinin işlenebilirliği azalttığını belirtmişlerdir. Bobde vd. (2018) cam lifinin işlenebilirliği azaltmasının nedeninin agregaların hareketinin kısıtlanmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Ayrıca cam liflerinin işlenebilirliği azalttığını literatürde birçok çalışma göstermiştir (Topçu ve Canbaz, 2007; Hamad, 2017).

Doğal zeolitlerin yüksek su ihtiyacı, suyun iç gözeneklerde tutulmasının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Zeolitin gözenekleri su emmeyi önleyecek şekilde değiştirilirse su ihtiyacının da azalacağı düşünülmektedir. Literatürde, doğal zeolitlerin kalsinasyonunun kristal yapılarının kararsızlaşmasına neden olduğu belirtilmiş ve gözenek yapısının değiştirilmesi için bazı ısıl işlemler önerilmiştir (Liebig ve Althaus, 1998; Perraki vd. 2005; Habert vd. 2008). Önceki araştırmalar kalsinasyonun doğal zeolitlerin özgül yüzey alanını azalttığını göstermiş ve bunun sonucunda da su ihtiyacı azalmıştır (Ateş ve Hardacre, 2012). Seraj vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada doğal zeolitlere yapılan kalsinasyonun karışımların işlenebilirliğini önemli derecede iyileştirdiği gözlenmiştir. Narasimhulu vd. (2014) doğal ve kalsine zeolit kullanımı ile su ihtiyacının arttığını ve hedef işlenebilirlik için daha fazla süperakışkanlaştırıcı kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Vımalan ve Lavanya (2021) kendiliğinden yerleşen beton (KYB) üretiminde kalsine zeolit kullanarak yayılma çaplarının arttığını gözlemlemişlerdir. Bu etki kalsinasyon sonrasında zeolit bünyesindeki boşlukların azalması ile açıklamışlardır.

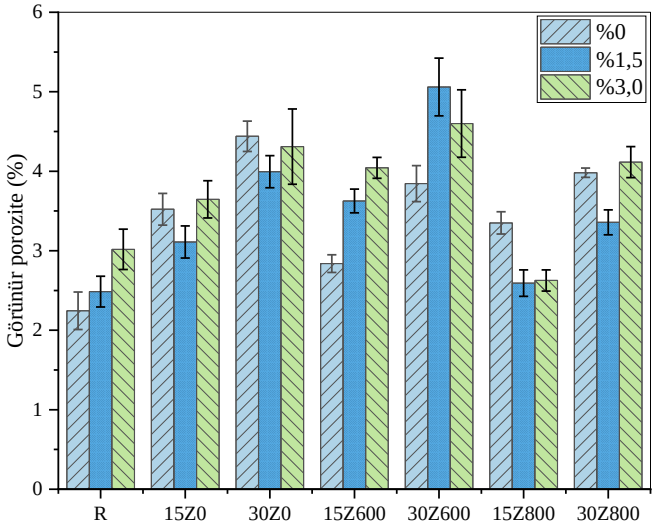
4.2 Cam Lifli Çimento Esaslı Kompozitlerin Fiziksel Özellikleri

Referans ve zeolitli karışımların etüv kurusu birim hacim ağırlıkları Şekil 4.2'de sunulmuştur. Çimento esaslı kompozitlerin kuru birim hacim ağırlıkları 2023-2290 kg/m^3 arasında değişmektedir. En yüksek kuru birim hacim ağırlık değeri (2290 kg/m^3) cam lifi kullanılmayan referans karışımda elde edilmiştir. En düşük kuru birim hacim ağırlık değeri ise 600 ºC'de kalsine edilmiş zeolitin %30 oranında kullanıldığı karışımlarda gözlenmiştir. Karışımların kuru birim hacim ağırlıkları arasında çok belirgin farklar gözlenmemiştir. %15 oranında zeolit kullanılan karışımlarda cam lifi kullanılması genellikle birim hacim ağırlık değerlerini

arttırmaktadır. %30 zeolit kullanılan karışımlarda ise cam lifi kullanımı genellikle birim hacim ağırlıkları azaltmıştır. Zeolitin özgül ağırlığı çimentoya göre daha düşük olduğu için karışımların birim hacim ağırlıkları referans karışıma göre azalmıştır.



Şekil 4.2 Çimento esaslı kompozitlerin kuru birim hacim ağırlıkları

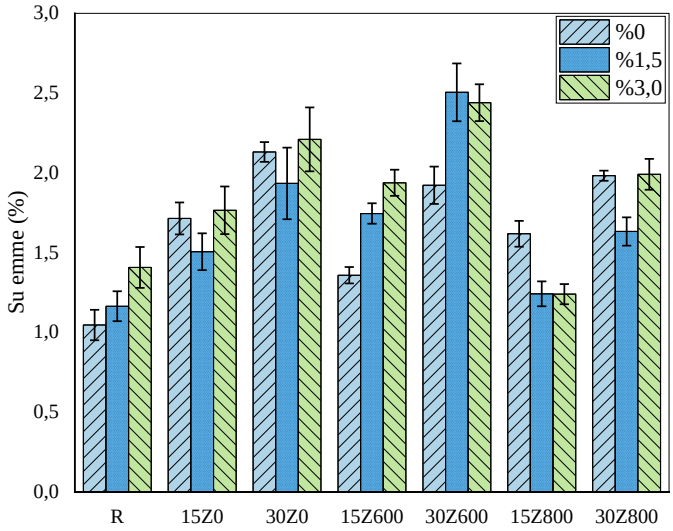


Şekil 4.3 Çimento esaslı kompozitlerin görünür poroziteleri

Şekil 4.3'de karışımların görünür porozite değerleri arasında kuru birim hacim ağırlığa göre daha belirgin farklar oluştuğu görülmektedir. Referans karışımın porozite değeri %2,2-3,0 arasında değişmektedir. Referans karışımda cam lifinin %3 olması durumunda porozite %36,3 oranında artmıştır. Çimento esaslı kompozitlerde zeolit kullanımı ile birlikte porozite değerleri artış göstermiştir. Doğal zeolit kullanılan karışımların poroziteleri %3,1-4,4 arasında değişmektedir. Doğal zeolitin

%30 olması halinde porozite değeri %15 ikame oranına göre yaklaşık %30 artmaktadır. Cam lifi kullanılmayan 600 ºC'de kalsine edilmiş zeolitli karışımların poroziteleri doğal zeolitli karışıma göre %19 azalmıştır. Ancak 600 ºC'de kalsine edilmiş zeolitli karışımlarda cam lifi kullanımıyla birlikte porozite değerleri belirgin bir şekilde artmıştır. Bu durum özellikle 600 ºC'de kalsine edilmiş zeolitin %30 oranında kullanılması halinde daha açık gözlenebilmektedir. 800 ºC'de kalsine edilmiş zeolitin porozite değerleri doğal zeolitli karışımlara göre azalmıştır. 800 ºC'de kalsine edilmiş zeolitli karışımların porozite değerleri %2,6-4,1 arasında değişmektedir. Ayrıca bu karışımlarda cam lifi kullanılması (özellikle %1,5 oranı) genellikle porozite değerlerinin azalmasını sağlamıştır.

Cam lifi kullanımı çimento esaslı kompozitlerde bazı durumlarda mikro filler etkisi yaparak poroziteyi azaltmaktadır. Ancak bazı durumlarda işlenebilirliği olumsuz etkilediği için porozite değerleri artış gösterebilmektedir. Zeolit çimentoya göre daha gözenekli bir yapıya sahip olduğu için genellikle ikame oranı ile birlikte porozite değerini arttırmıştır. Ancak 800 ºC'de yapılan ani kalsinasyon işlemi porozite değerlerini doğal zeolit ve 600 ºC'de kalsine edilen zeolitli karışımlara göre azaltmıştır.

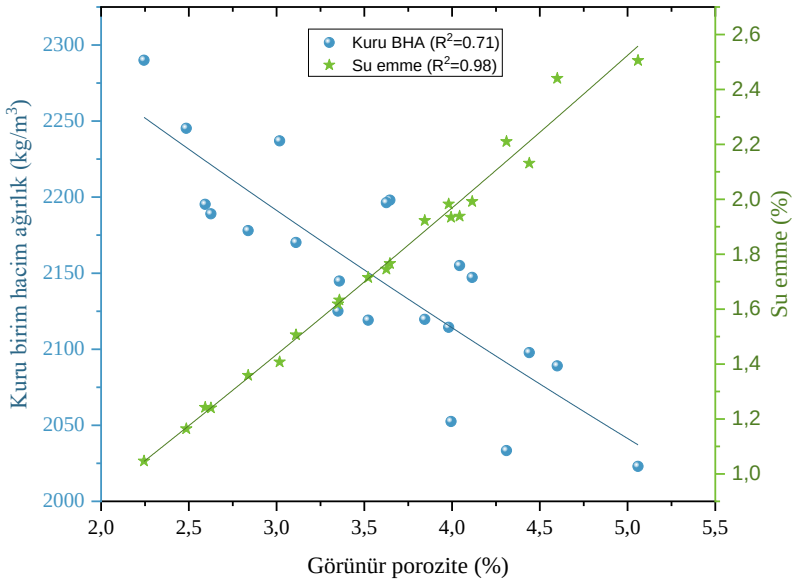


Şekil 4.4 Çimento esaslı kompozitlerin su emme özellikleri

Şekil 4.4'de görüldüğü gibi referans ve zeolitli karışımların su emme değerleri %1,0 ile 2,5 arasında değişmektedir. Referans karışımlarda %1,5 ve 3,0 oranında cam lifi kullanılması durumunda su emme değerleri sırasıyla %16,1-%38,8 oranında

artmaktadır. Cam lifi referans karışımlarda işlenebilirliği azalttığı için porozite ve su emme değerleri artmıştır. Çimento esaslı kompozitlerde doğal zeolit kullanılması halinde su emme değerleri %1,5 değerini aşmıştır. Doğal zeolitli karışımlarda cam lifinin %1,5 oranında kullanılması halinde su emme değerleri nispeten azalmıştır. Cam lifi içermeyen 600 ºC'de kalsine edilmiş zeolitin kullanılması halinde su emme değeri doğal zeolitli karışımlara göre %21 oranında azalmıştır. Ancak cam lifi kullanılması halinde su emme değerleri belirgin bir şekilde artmıştır. 800 ºC'de kalsine edilmiş zeolitin (cam lifsiz) 600 ºC'de kalsine edilmiş zeolite göre su emme değeri %20 artmıştır. Ancak bu karışımlarda cam lifi kullanılması halinde porozite değeri azalmıştır. 800 ºC'de kalsine edilmiş %30 zeolitli karışımların su emme değerleri ise %2'nin altındadır. %1,5 oranında cam lifi kullanılması su emme değerlerini azaltmıştır.

Görünür porozite değerlerinde olduğu gibi cam lifi kullanılması mikro filler etki yaratarak bazı durumlarda su emme değerlerini azaltmaktadır. Ayrıca zeolitin bünyesindeki boşluklar kalsinasyon işlemi ile azalmasına rağmen yine de çimentoya göre daha boşluklu bir yapıya sahiptir. Bu durum da karışımların su emme değerlerini arttırmaktadır.



Şekil 4.5 Çimento esaslı kompozitlerin fiziksel özellikleri arasındaki ilişkileri

Şekil 4.5'de görüldüğü gibi görünür pozorite ve kuru birim hacim ağırlık arasında R^2 değeri 0,71 olarak elde edilmiştir. Karışımların porozite değeri azaldıkça kuru birim

hacim ağırlıkarı artmaktadır. Çimento esaslı kompozitlerin su emme ve porozite değerleri arasında ise 0,98 gibi oldukça yüksek bir R^2 değeri elde edilmiştir. Karışımların beklendiği gibi porozite değerleri arttıkça su emme değerleri de artmaktadır.

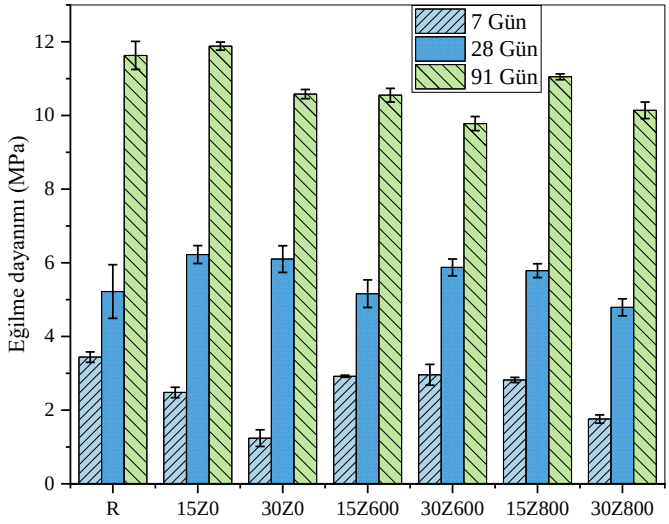
Hamad (2017) tarafından yapılan çalışmada cam lifi içeriği arttıkça karışımların birim hacim ağırlıkları artmıştır. Bu etki cam liflerinin özgül ağırlığından dolayı oluşmuştur. Filho vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada cam lifinin sisal lifine göre su emme ve görünür poroziteyi azalttığı belirtilmiştir. Yuan ve Jia (2021) tarafından yapılan çalışmada cam lifi katkılı karışımların referans karışıma göre su emmeyi azalttığı gözlenmiştir. Bu etki çimento ve lif arasındaki güçlü aderans ve cam lifinin sahip olduğu hidrofilik özellik ile açıklanmıştır (Hannawi vd. 2016). Ayrıca cam lifi ve sertleşmiş çimento arasındaki aderansın yüksek olması da bu süreci etkilemektedir (Xue vd. 2019). Bazı çalışmalarda liflerin mikrofiller etki ile poroziteyi azalttığı da belirtilmiştir (Ramezanianpour vd. 2013).

Zhang vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada zeolitin 500 ºC'de 30 dakika kalsine edilmesinden sonra su emme değerinin %15,4'den %26,1'e çıktığı rapor edilmiştir. Vımalan ve Lavanya (2021) tarafından yapılan çalışmada kalsine zeolit kullanılmasıyla su emme ve porozite değerleri azaltılmıştır.

4.3 Cam Lifli Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Cam lifi içermeyen karışımların eğilme dayanımları Şekil 4.6'da verilmiştir. Karışımların 7 günlük eğilme dayanımları 1,2-3,4 MPa arasında değişmektedir. Doğal zeolitin %30 oranında kullanılması halinde eğilme dayanımı %63,9 oranında azalmıştır. Bu oran 600 ºC'de kalsine edilen zeolitli karışımlarda %13,9, 800 ºC'de kalsine edilen zeolitli karışımlarda %18,0 olarak belirlenmiştir. Zeolitin kalsine edilerek kullanılması erken yaşlarda oluşan eğilme dayanımı kayıplarını azaltmıştır. 7 günlük eğilme dayanımlarında zeolitin ikame oranı arttıkça eğilme dayanımları azalmaktadır. Ancak bu olumsuz etki 28 günlük çimento esaslı kompozitlerde büyük oranda azalmıştır. 28 günlük eğilme dayanımları 4,8-6,2 MPa arasında değişmektedir. Doğal zeolitin çimento yerine %15 oranında kullanılması durumunda

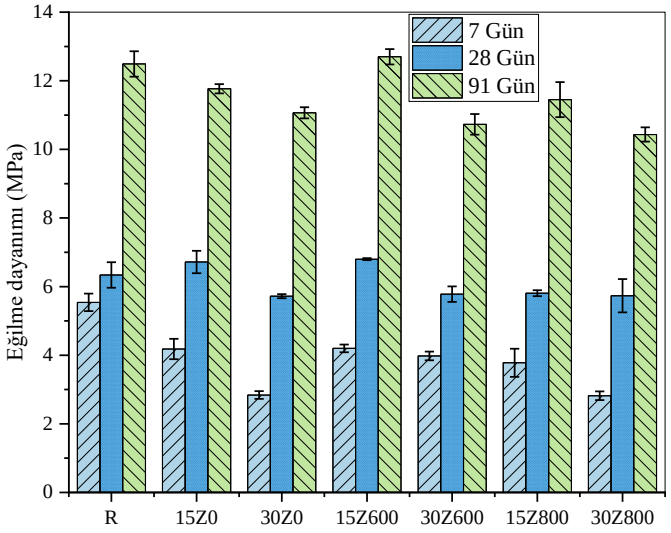
eğilme dayanımı %19,2 oranında artmıştır. 800 ºC'de kalsine edilen zeolit kullanılması halinde eğilme dayanımı %10,9 oranında artmıştır. Çimento esaslı kompozitlerde puzolanik aktivitenin etkisiyle 91 günlük eğilme dayanımları oldukça artış göstermiştir. 91 günlük eğilme dayanımları 9,8-11,8 MPa arasında değişirken en yüksek eğilme dayanımı doğal zeolitin %15 oranında kullanıldığı karışımda elde edilmiştir. En düşük eğilme dayanımı ise 9,8 MPa değeri ile 600 ºC'de kalsine edilen zeolitin %30 oranında kullanıldığı karışımda elde edilmiştir. Zeolit oranı arttıkça karışımların 91 günlük eğilme dayanımları genellikle azalmaktadır. Ancak oluşan dayanım kaybı ihmal edilebilir bir seviyededir.



Şekil 4.6 Cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımı

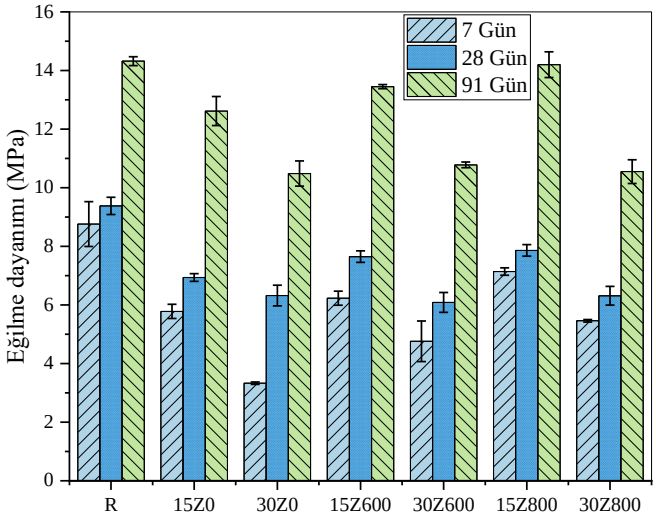
Çimento esaslı kompozitlerde cam lifi kullanımıyla birlikte eğilme dayanımlarında artışlar gözlenmiştir (Şekil 4.7). 7 günlük eğilme dayanımları 2,8-5,5 MPa arasında değişmektedir. Zeolit oranındaki artış 7 günlük eğilme dayanımlarını azaltmaktadır. Özellikle %30 oranında doğal zeolit kullanımında eğilme dayanımı %48,7 oranında azalmıştır. Benzer durum 800 ºC'de kalsine edilen zeolitin %30 oranında kullanılmasında da gözlenmiştir. 28 günlük eğilme dayanımları ise 5,7-6,7 MPa arasında değişmektedir. Referans karışımda %1,5 oranında cam lifi kullanılması durumunda eğilme dayanımı lifsiz karışıma göre %21,1 oranında artmaktadır. 91 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde zeolit ikame oranı arttıkça karışımların eğilme dayanımı azalmaktadır. En yüksek eğilme dayanımı 12,8 MPa değeri ile 600 ºC'de kalsine edilen zeolitin %15 oranında kullanıldığı karışımda elde edilmiştir.

Puzolanik aktivite ile lif-matris arayüzeyi iyileşerek eğilme dayanımlarında artışlar elde edilmiştir. Ayrıca ani kalsinasyon işlemi ile referans ve doğal zeolit ile üretilen karışımlara yakın eğilme dayanımları elde edilmiştir. 800 ºC'de kalsine edilen zeolitin %30 gibi yüksek bir oranında kullanılması halinde eğilme dayanımı referans karışıma göre %16,1 azalmıştır. Eğilme dayanımları açısından kalsine zeolitlerin kullanılmasının daha uygun olabileceği belirlenmiştir.



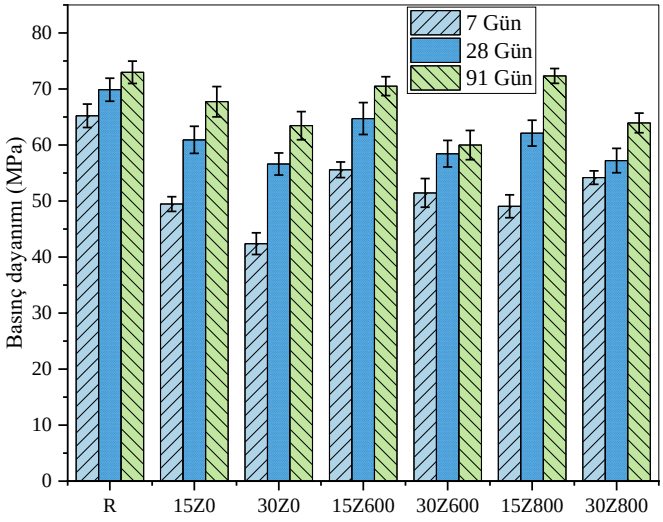
Şekil 4.7 %1,5 cam lifli çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımı

%3 cam lifi kullanılan çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımları Şekil 4.8'de sunulmuştur. Kompozitlerin 7 günlük eğilme dayanımları 4,8-8,8 MPa arasında değişmektedir. Cam lifinin %3 olması halinde kompozitlerin 7 günlük eğilme dayanımları lifsiz karışımlara göre 2 kattan fazla artış göstermiştir. 28 günlük eğilme dayanımlarında da zeolit ikame oranı arttıkça eğilme dayanımları azalmaktadır. Zeolit içerikli karışımların 7 ve 28 günlük eğilme dayanımları referans karışımın altında kalmıştır. Ancak 91 günlük eğilme dayanımlarında puzolanik aktivite etkisiyle zeolitli karışımlar yüksek eğilme dayanımları göstermiştir. 800 ºC'de kalsine edilen zeolitin %15 oranında kullanılması halinde eğilme dayanımı referans karışıma göre %0,7 oranında azalmaktadır. En düşük eğilme dayanımları doğal zeolitli karışımlarda gözlenmiştir. Kalsine edilen zeolitli karışımlarda lif-matris aderansının daha yüksek olduğu gözlemlenebilmektedir.



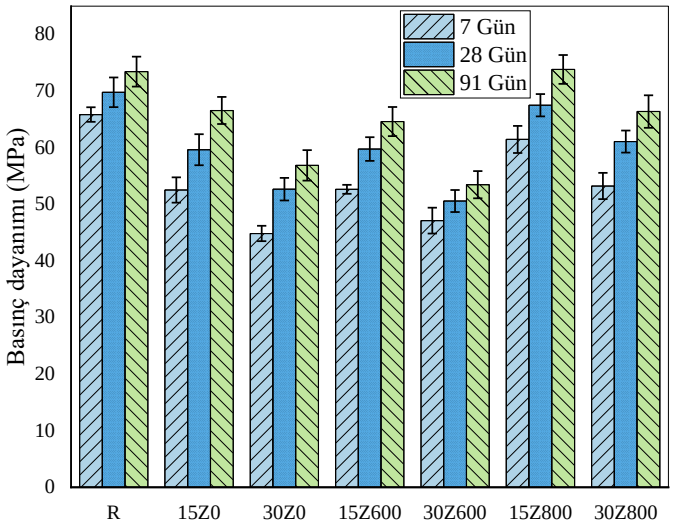
Şekil 4.8 %3 cam lifli çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımı

Cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozitlerin zamana bağlı basınç dayanımları Şekil 4.9'da verilmiştir. Karışımların basınç dayanımlarının eğilme dayanımı ile paralellik gösterdiği görülmektedir. 7 günlük basınç dayanımları 42,3-65,4 MPa arasında değişirken, en düşük basınç dayanımı %30 doğal zeolitli karışımlarda elde edilmiştir. Referans karışımda 7. günde 60 MPa'nin üzerinde basınç dayanımı elde edilirken zeolitli karışımlarda 45 MPa ve üzeri basınç dayanımları elde edilmiştir. Çimento esaslı kompozitlerin 28 günlük basınç dayanımları 56,6-69,9 MPa arasında değişmektedir. Karışımlarda %30 oranında doğal zeolit kullanılması halinde basınç dayanımı %19 azalmıştır. Zeolit ikame oranı arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır. 800 ºC'de kalsine edilen zeolitin %15 yerine %30 oranında kullanılması durumunda basınç dayanımı %8,1 azalmıştır. 91 günlük karışımlarda referans ve kalsine edilmiş zeolitlerin %15 oranında kullanılması halinde 70 MPa ve üzeri basınç dayanımları elde edilmiştir. En düşük basınç dayanımı 63,4 MPa değeri ile doğal zeolitin %30 oranında kullanıldığı karışımlarda elde edilmiştir. Zeolit oranındaki artış genellikle poroziteyi arttırdığı için karışımların basınç dayanımları azalmaktadır.



Şekil 4.9 Cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımı

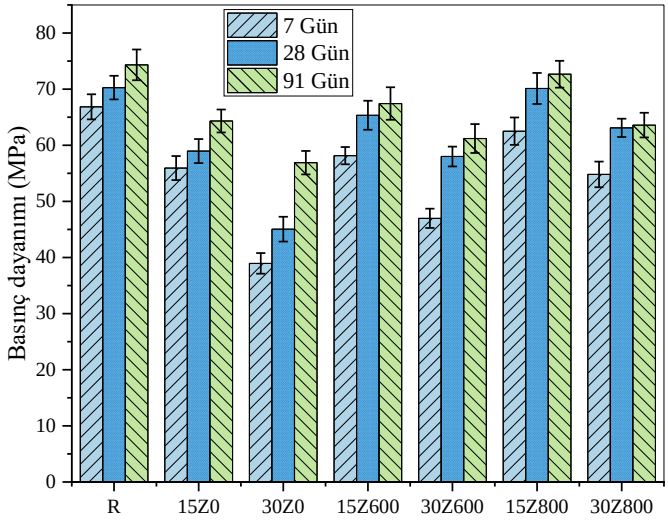
Şekil 4.10'da çimento esaslı kompozitlerin üretiminde %1,5 oranında cam lifi kullanılması sonucunda elde edilen basınç dayanımları verilmiştir. 7 günlük basınç dayanımlarının 44,8-65,9 MPa arasında değiştiği görülmektedir. Cam lifindeki artışın referans karışımın basınç dayanımına bir etkisi olmazken 800 ºC'de kalsine edilen zeolitin %15 oranında kullanılması halinde basınç dayanımı lifsiz karışıma göre %25,4 artış göstermiştir. 28 günlük basınç dayanımlarının 50,6-69,9 MPa arasında değiştiği gözlenmiştir. Cam lifinin %1,5 oranında kullanılması halinde doğal zeolit ve 600 ºC'de kalsine edilen zeolitli karışımların basınç dayanımları lifsiz karışımlara göre azalmıştır. Bu karışımlarda oluşan işlenebilirlik kaybı basınç dayanımlarını nispeten azaltmıştır. Ancak 800 ºC'de kalsine edilen zeolitli karışımlarda tam tersi bir durum olarak %10'a kadar basınç dayanımı artışları gözlenmiştir. Çimento esaslı kompozitlerin 91 günlük basınç dayanımları 53,3-73,8 MPa arasında değişmektedir. Zeolit ikame oranı arttıkça basınç dayanımları azalmaktadır. Doğal zeolitin %30 oranında olması halinde basınç dayanımı referans karışıma göre %22,5 oranında azalmıştır. Ancak zeolitin kalsine edilmesi karışımların basınç dayanımlarını arttırmıştır.



Şekil 4.10 %1,5 cam lifli çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımı

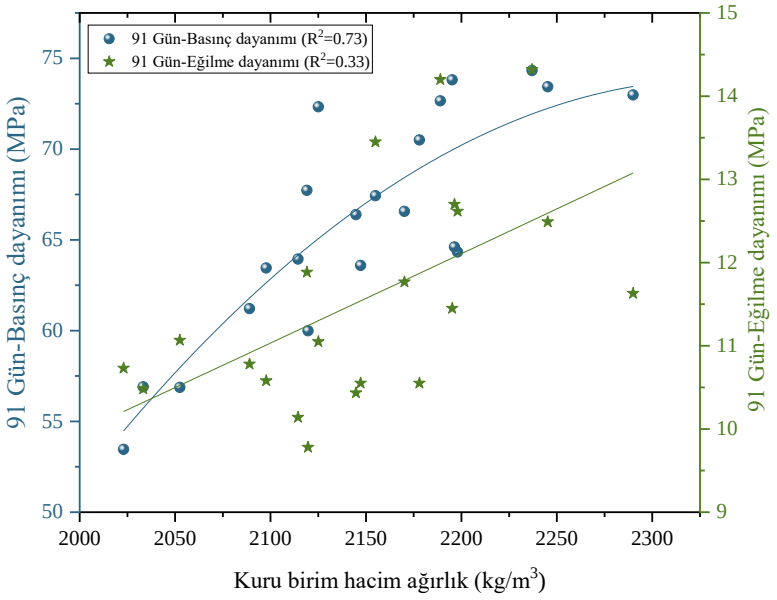
%3 oranında cam lifi kullanılan karışımların basınç dayanımları Şekil 4.11'de verilmiştir. 7 günlük basınç dayanımları açısından en düşük değer 38,9 MPa ile %30 doğal zeolitli karışımlarda elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı 66,8 MPa ile referans karışımda gözlenmiştir. 800 ºC'de kalsine edilen zeolitin %15 oranında karışımlarda kullanılması halinde basınç dayanımı lifsiz karışımlara göre 1,3 kat artış göstermiştir. %30 doğal zeolitli karışımlarda ise %3 cam lifi kullanılması halinde basınç dayanımı lifsiz karışıma göre 1,1 kat azalmıştır. 28 günlük basınç dayanımları ise 45,0-70,3 MPa arasında değişmektedir. 800 ºC'de kalsine edilen zeolitli karışımlarda 60 MPa ve üzeri basınç dayanımı elde edilmiştir. Ancak doğal zeolitli karışımlarda basınç dayanımı 60 MPa'nın altına düşmüştür. 91 günlük basınç dayanımları incelendiğinde 800 ºC'de kalsine edilen zeolit ile üretilen karışımların doğal zeolitli karışımlara göre daha üstün olduğu görülmektedir. Özellikle %30 doğal zeolitli karışımın basınç dayanımı referans karışıma göre %24,6 azalmıştır.

Çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımları incelendiğinde %30 zeolitli karışımlarda cam lifi kullanımı dayanım kayıplarına yol açabilmektedir. Bu yüzden zeolit açısından optimum oranın %15 ve lif oranının en uygun %1,5 olduğu gözlenmiştir. Ayrıca ani kalsinasyon işleminin etkili olduğu ve doğal zeolite göre daha yüksek basınç dayanımları elde edildiği belirlenmiştir.



Şekil 4.11 %3 cam lifli çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımı

Şekil 4.12'de basınç ve eğilme dayanımının kuru birim hacim ağırlık ile arasındaki ilişki verilmiştir. Kuru birim hacim ağırlık ve eğilme dayanımı arasında düşük bir korelasyon (R^2=0,33) gözlenmiştir. Korelasyonun düşük olmasının nedeni karışımlarda kullanılan cam lifleridir. Çünkü bazı karışımlarda birim hacim ağırlık düşük olmasına rağmen cam lifleri eğilme dayanımında artış sağlamıştır. Ancak kuru birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı arasında daha yüksek bir korelasyon (R^2=0,73) elde edilmiştir. Karışımların birim hacim ağırlıkları arttıkça basınç dayanımları da artmıştır. Ancak birim hacim ağırlığı 2150 kg/m^3 altında olmasına rağmen basınç dayanımı 70 MPa olan karışımlar gözlenmiştir. Bu etki cam lifinin basınç tokluğuna katkısı ile açıklanabilmektedir.



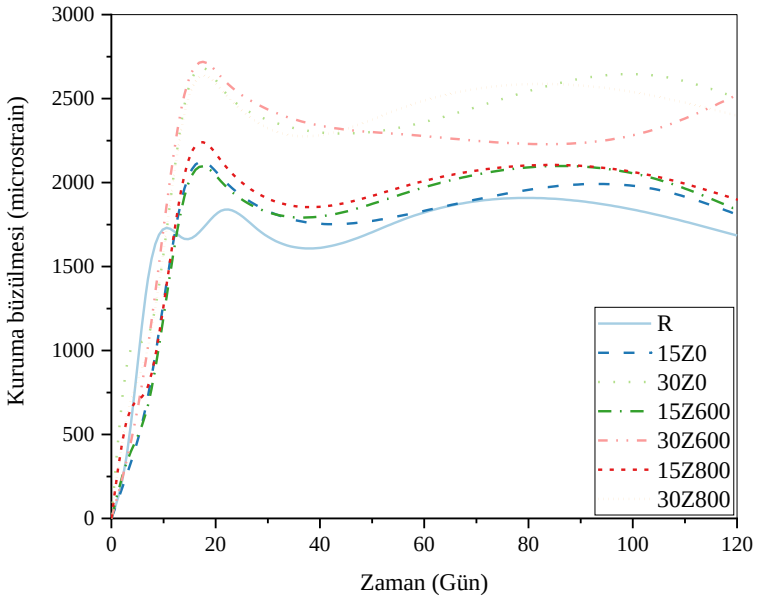
Şekil 4.12 Cam lifli çimento esaslı kompozitlerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin ilişkisi

Fenu vd. (2016) çimento esaslı kompozitlerde cam lifi gibi liflerin kullanılması durumunda daha çok eğilme dayanımının iyileştiğini belirtmişlerdir. Ateş (2016) tarafından yapılan çalışmada da cam lifi esaslı betonlarda üç noktalı eğilme dayanımları artmıştır. Ahmad vd. (2017) yaptıkları çalışmada, kendiliğinden yerleşen betonlarda cam lifi kullanarak basınç dayanımının arttığını belirtmişlerdir. Xiaochun vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada cam lifi ilavesinin betonların eğilme ve basınç dayanımlarını arttırdığı gözlenmiştir. Dawood ve Hamad (2013) yaptıkları çalışmada hacimce %0,6 oranında cam lifi kullanımı ile basınç, çekme ve yarmada çekme dayanımını sırasıyla 56.6, 50 ve 46 oranında arttırmıştır. Hamad (2017) cam lifinin basınç dayanımını arttırmasını uygun işlenebilirlikte poroziteyi azaltması ile açıklamıştır.

Habert vd. (2008) kil gibi doğal puzolanlara uygulanan ısıl işlem ile puzolanik özelliklerinin arttırılabileceğini göstermişlerdir. Perraki vd. (2005) tarafından yapılan çalışmaya göre; zeolit kristal kafesinin deformasyonu yaklaşık 400 °C'de başlar ve ısıl işlemin sıcaklığı arttıkça devam eder. Zeolitin 400 °C'de ısıl işlemi, puzolanik reaktivitesini geliştirir ve $Ca(OH)_2$ ile reaksiyonu hızlandırır. Gelişen puzolanik aktivite karışımların mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Teja vd. (2021) %5 ve 10 oranında kalsine edilmiş zeolit kullanarak betonların mekanik özelliklerini arttırmıştır.

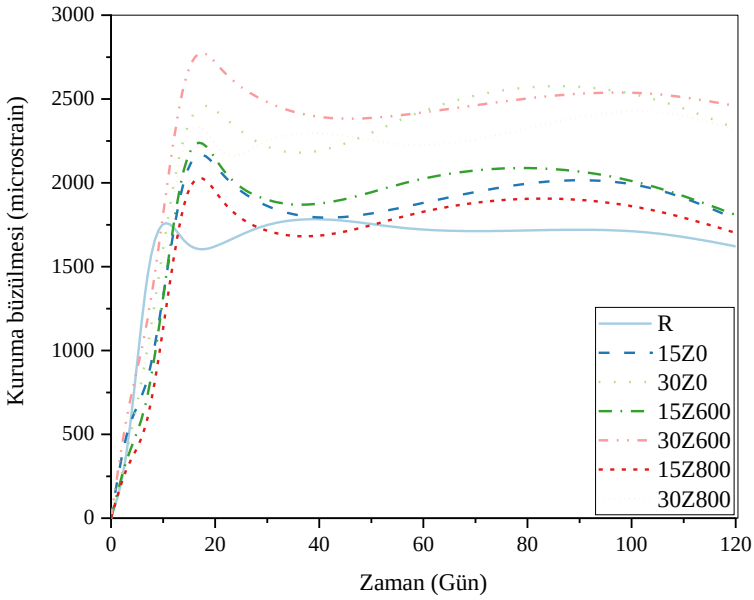
4.4 Cam Lifli Çimento Esaslı Kompozitlerin Kuruma Büzülmeleri

Şekil 4.13'de cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozitlerin zamana bağlı kuruma büzülmeleri verilmiştir. Karışımların 120. gündeki kuruma büzülmesi değerleri 1684-2504x10^{-6} arasında değişmektedir. En düşük büzülme davranışı referans karışımda elde edilmiştir. %30 doğal ve kalsine zeolit içeren karışımların kuruma büzülmesi değeri 2400x10^{-6} değerini geçmiştir. Çimento yerine %30 oranında doğal zeolit kullanılması durumunda kuruma büzülmesi referans karışıma göre %49,7 oranında artmıştır. %15 zeolit içeren çimento esaslı kompozitlerin kuruma büzülmesi değerleri ise 1800-1900x10^{-6} arasında değişmektedir. Zeolit içeriği arttıkça kompozitlerin nispeten porozite değeri artmaktadır. Bu yüzden kapiler boşluklardaki suyun buharlaşması kolaylaştığı için büzülme davranışı artış göstermektedir.



Şekil 4.13 Cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozitlerin kuruma büzülmeleri

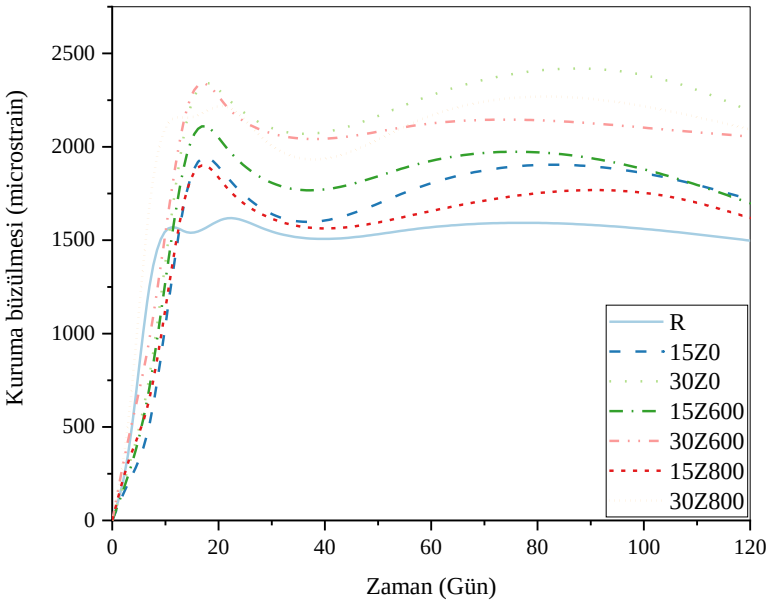
Şekil 4.14'de %1,5 cam lifi kullanılan kompozitlerin zamana bağlı kuruma büzülmeleri verilmiştir. Cam lifinin kullanılması durumunda karışımların kuruma büzülmeleri nispeten azalmıştır. Referans karışımda %1,5 oranında cam lifi kullanılması kuruma büzülmesini lifsiz karışıma göre %4,1 azaltmıştır. Ancak cam lifsiz karışımlarda olduğu gibi %30 zeolit içerikli karışımların kuruma büzülmeleri 2300-2400x10^{-6} değerleri arasında değişmektedir. Zeolit oranının %15 olması durumunda ise kuruma büzülmesi değerleri 1800x10^{-6} değerinin altına düşmektedir.



Şekil 4.14 %1,5 cam lifi içeren çimento esaslı kompozitlerin kuruma büzülmeleri

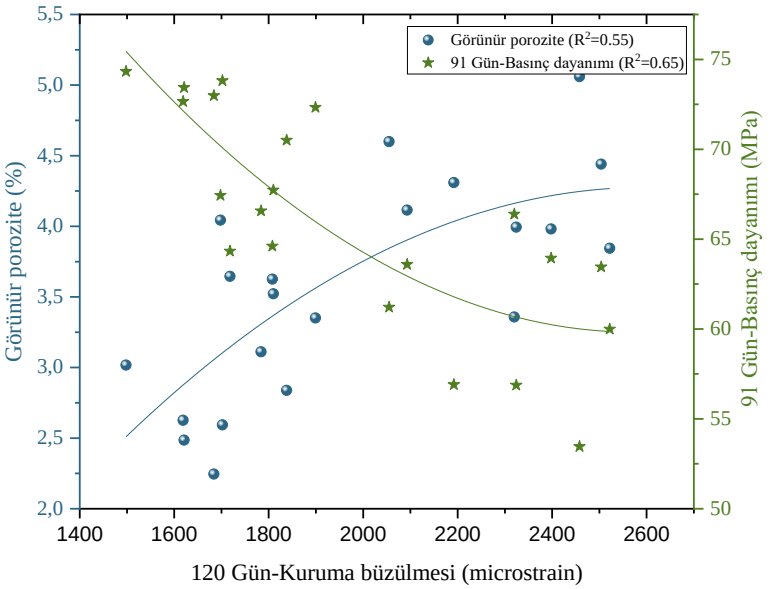
%3 cam lifi içeren çimento esaslı kompozitlerin zamana bağlı kuruma büzülmeleri Şekil 4.15'de verilmiştir. Cam lifinin artması sonucunda referans karışımın kuruma büzülmesi yaklaşık $1500x10^{-6}$ olarak belirlenmiştir. %3 cam lifi kullanılan referans karışımda büzülme değeri %10,9 oranında azaltılmıştır. Ancak diğer karışımlarda olduğu gibi %30 zeolit kullanılması halinde kuruma büzülmesinin $2000x10^{-6}$ değerini aştığı görülmektedir. %15 zeolit kullanılan karışımlarda ise kuruma büzülmesi değeri $1700x10^{-6}$ ve altına düşmüştür.

Karışımlarda kullanılan cam lifi kuruma büzülmesi değerlerini azaltmıştır. Ancak artan zeolit içeriği ile birlikte kuruma büzülmesi değerleri artmaktadır. Zeolit ikame oranı arttıkça pasta hacmi artmaktadır. Pasta hacmindeki bu artış da kuruma büzülmesini arttırmaktadır. Ayrıca %30 ikame oranına sahip karışımların işlenebilirlikleri diğer karışımlara göre nispeten daha azdır. Bu durumda da porozite değeri artarak kapiler boşluklardaki suyun buharlaşması kolaylaşmıştır. Daha hızlı ve çok miktarda su kaybeden %30 zeolit ikameli karışımlarda daha fazla kuruma büzülmesi değerleri ölçülmüştür.



Şekil 4.15 %3 cam lifi içeren çimento esaslı kompozitlerin kuruma büzülmeleri

Şekil 4.16'da 120. gündeki kuruma büzülmesi değerinin porozite ve basınç dayanımı arasındaki ilişki görülmektedir. Görünür porozite ve kuruma büzülmesi arasında nispeten düşük bir korelasyon (R^2=0,55) elde edilmiştir. Çimento esaslı kompozitlerin görünür poroziteleri arttıkça kuruma büzülmeleri de artmaktadır. Kapiler boşluklardaki suyun uzaklaşması bu etki ile açıklanabilmektedir. Basınç dayanımı ve kuruma büzülmesi arasında R^2=0,65 değeri elde edilmiştir. Karışımların basınç dayanımı azaldıkça daha fazla kuruma büzülmesi yapmaktadır.



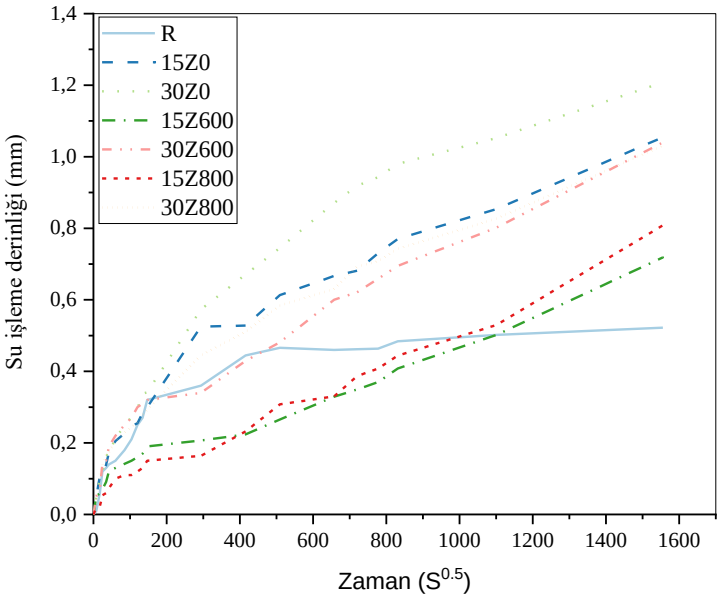
Şekil 4.16 Kuruma büzülmesinin fiziksel ve mekanik özellikler ile ilişkisi

Literatürde cam gibi kısa liflerin kuruma büzülmesini azalttığını gösteren çalışmalar mevcuttur (Voigt vd. 2004). Abdollahnejad vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada atık cam lifleri kullanılan geopolimerlerde kuruma büzülmesi önemli derecede azaltılmıştır. Cam lifinin bu olumlu etkisi köprüleme özelliği ile açıklanmıştır. Chinchillas-Chinchill vd. (2019) mikroliflerin suyun buharlaşma hızını azalttığı için kuruma büzülmesinin de azaldığını belirtmişlerdir. Liang vd. (2002) tarafından yapılan çalışmada ağırlıkça %2 cam lifi kullanımı kuruma büzülmesini %38 oranında azaltmıştır.

Vımalan ve Lavanya (2021) kalsine zeolit kullanarak betonların kapiler yolla su emmelerini azaltmıştır. Bu etki puzolanik reaksiyon sonucu CH kristallerinin azalarak CSH jeline dönüşmesi ile açıklanmıştır. Oluşan yeni CSH jelleri kapiler boşlukları kapatarak su emmeyi azaltmıştır.

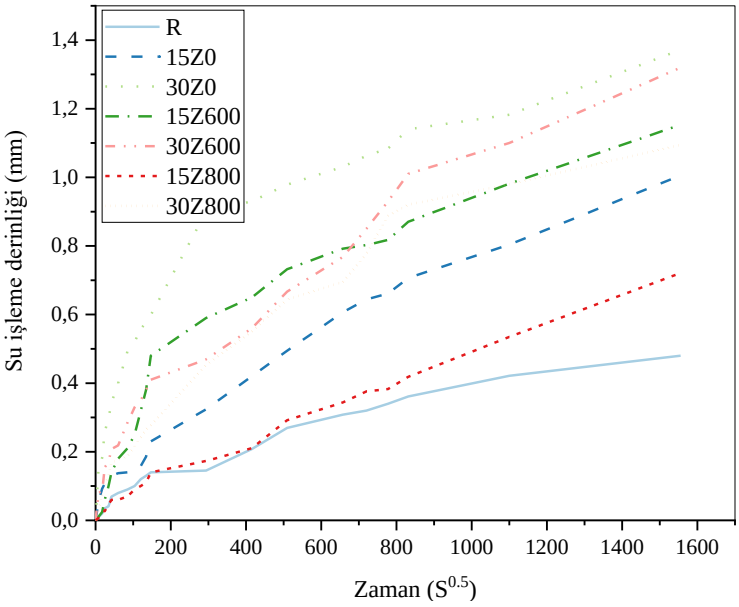
4.5 Cam Lifli Çimento Esaslı Kompozitlerin Su İşleme Derinlikleri

Şekil 4.17'de cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozitlerin zamana bağlı olarak su işleme derinlikleri verilmiştir. Cam lifsiz karışımlarda en az su işleme derinliği 0,52 mm değeri ile referans karışımda elde edilmiştir. Ayrıca su işleme derinliğinin belirli bir süreden sonra sabitlendiği de gözlenmiştir. Doğal zeolitin %30 oranında kullanılması durumunda su işleme derinliği %133 artmıştır. Doğal zeolitin %15 oranında kullanılması durumunda ise su işleme derinliği referans karışıma göre 2,1 kat artmıştır. Referans karışıma en yakın su işleme derinlikleri kalsine edilmiş zeolitlerin %15 oranında kullanılması durumunda elde edilmiştir. Kuruma büzülmesinde olduğu gibi zeolit içeriğindeki artış su işleme derinliklerini arttırmaktadır. Ayrıca zeolitin bünyesel olarak boşluklu bir yapıya sahip olması da su işleme derinliğinin zamanla sürekli artmasına yol açmaktadır.



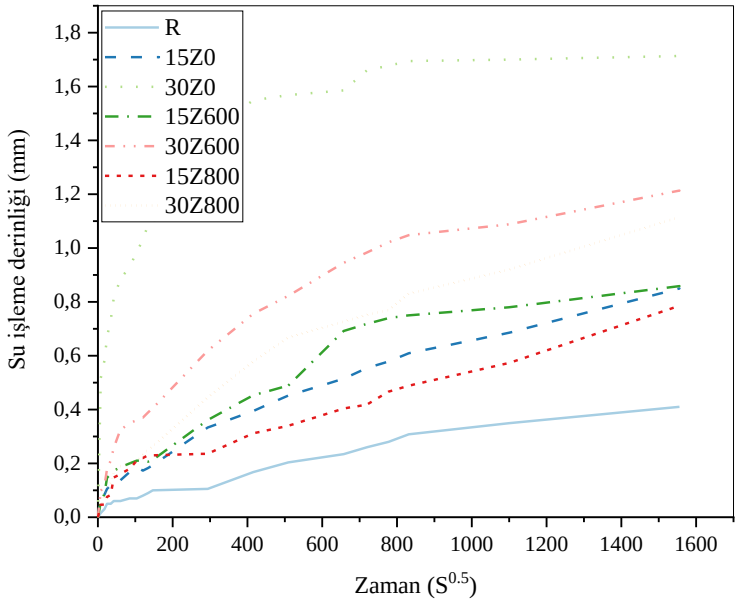
Şekil 4.17 Cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozitlerin su işleme derinlikleri

Şekil 4.18'de %1,5 oranında cam lifi kullanılan çimento esaslı kompozitlerin su işleme derinlikleri verilmiştir. Karışımların su işleme derinlikleri 0,48-1,37 mm arasında değişmektedir. Referans karışımda %1,5 oranında cam lifi kullanılması durumunda su işleme derinliği %7,7 oranında azalmıştır. Lifsiz karışımlarda olduğu gibi %30 oranında doğal zeolit kullanılması halinde su işleme derinliği 1,37 mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca kalsine edilmiş zeolit kullanılan karışımlarda da ikame oranının %30 olması halinde su işleme derinliği 1,0 mm'yi geçmektedir. 800 ºC'de kalsine edilen zeolitin %15 oranında kullanılması durumunda su işleme derinliği 1,5 kat artmıştır.



Şekil 4.18 %1,5 cam lifi içeren çimento esaslı kompozitlerin su işleme derinlikleri

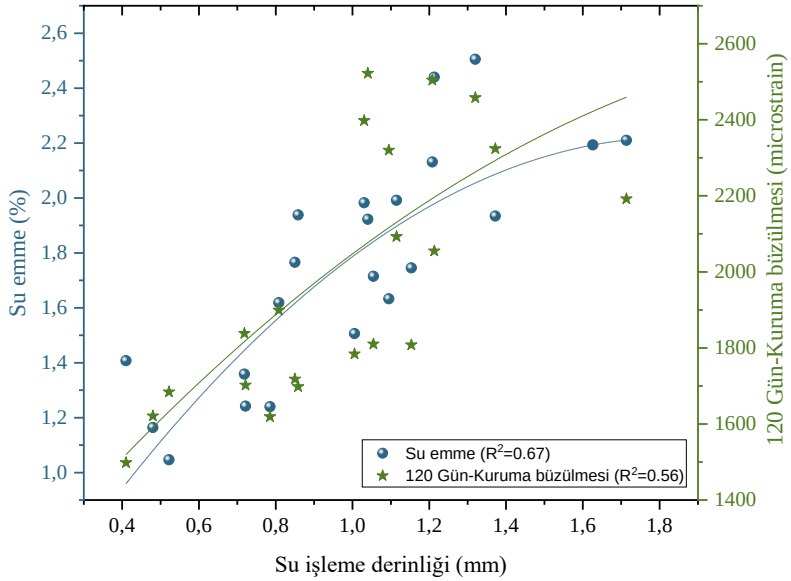
%3 cam lifi kullanılan çimento esaslı kompozitlerde su işleme derinlikleri Şekil 4.19'da görülmektedir. Cam lifinin olması durumunda su işleme derinlikleri genellikle belirli bir süre sonra sabitlenmiştir. Bu durum cam lifinin mikro filler etkisini kanıtlamaktadır. Diğer karışımlarda olduğu gibi referans karışım en düşük su işleme derinliğine sahiptir. %30 doğal zeolit içerikli karışımların su işleme derinliği 4,2 kat artmıştır. %15 doğal ve kalsine zeolit kullanılması halinde su işleme derinlikleri 1,0 mm değerinin altına düşmüştür. Özellikle 800 ºC'de kalsine edilen zeolitin %15 oranında kullanılması durumunda su işleme derinliği 0,79 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.19 %3 cam lifi içeren çimento esaslı kompozitlerin su işleme derinlikleri

Zeolit oranındaki artış karışımların işlenebilirliğini azaltarak homojenliği olumsuz etkilemektedir. Özellikle %3 oranında cam lifi ve %30 oranında zeolitli karışımların işlenebilirliği oldukça azalmaktadır. Bu durum karışımların kapiler yolla emilen su miktarını arttırmıştır. Ancak cam lifi içeriğindeki artış ile birlikte su işleme derinlikleri nispeten azaltılmıştır. Kapilarite açısından 800 ºC'de kalsine edilen zeolitin %15 oranında kullanılması daha uygun olmaktadır. Optimum lif oranının ise %1,5 olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.20'de su işleme derinliğinin su emme ve kuruma büzülmesi arasındaki ilişkisi verilmiştir. Su işleme derinliği ve su emme arasındaki R^2 katsayısının 0,67 olduğu belirlenmiştir. Karışımların porozite değeri arttıkça su emme ve su işleme derinlikleri artmaktadır. Bu yüzden %30 zeolit ve %3 cam lifi kullanımı bu süreci olumsuz etkilemektedir. Ayrıca karışımların su işleme derinliği ve kuruma büzülmesi arasında nispeten daha düşük bir R^2 (0,56) değeri elde edilmiştir. Karışımların su işleme derinliği arttıkça genellikle kuruma büzülmesi değerleri de artmaktadır. Zeolit ve cam lifindeki artış ile birlikte işlenebilirlik azalmakta ve porozite artmaktadır. Kapiler boşluk yapısının arttığı kapilarite deneyi ile tespit edilmiştir. Karışımlardaki artan kapiler boşluk yapısı genellikle kuruma büzülmelerini de arttırmaktadır.



Şekil 4.20 Su işleme derinliğinin su emme ve kuruma büzülmesi ile ilişkisi

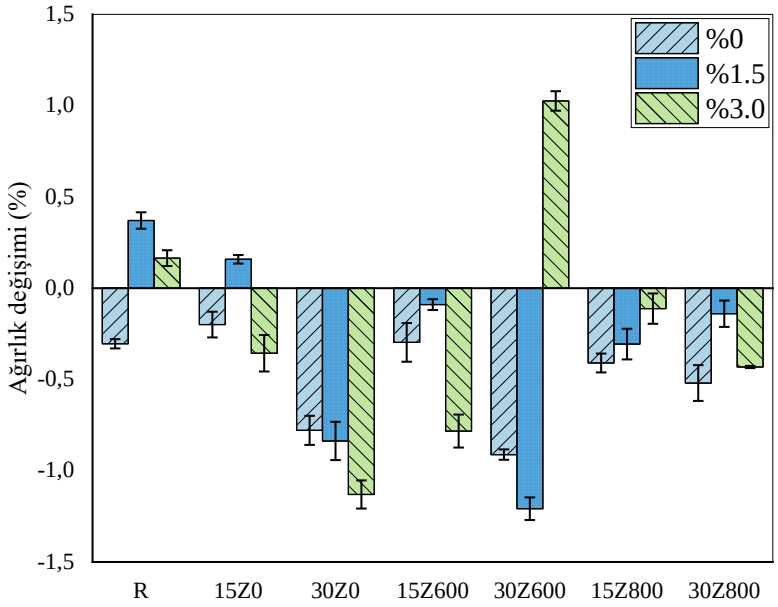
Cam lifi ya da cam lifinin hibrit kullanılması durumunda çimento esaslı malzemelerin geçirimliliğinin azaldığı belirlenmiştir. Bu durum liflerin beton ya da harçta sağladığı çatlak kontrolü ile açıklanmıştır (Lawler vd. 2002). Chinchillas-Chinchill vd. (2019) yaptıkları çalışmada mikroliflerin porozite ve kapiler boşlukların bağlantısını kestiği için su işleme derinliğinin azaldığını belirtmişlerdir.

Narasimhulu vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada kalsine zeolit kullanılan karışımların otojen büzülmelerinin azaldığı tespit edilmiştir. Xuan ve Jun (2021) yaptıkları çalışmada tasarlanmış çimento esaslı kompozit (ECC) üretiminde kalsine zeolit kullanarak otojen büzülmeyi azaltmışlardır.

4.6 Cam Lifli Çimento Esaslı Kompozitlerin Hızlandırılmış Eskitme Davranışları

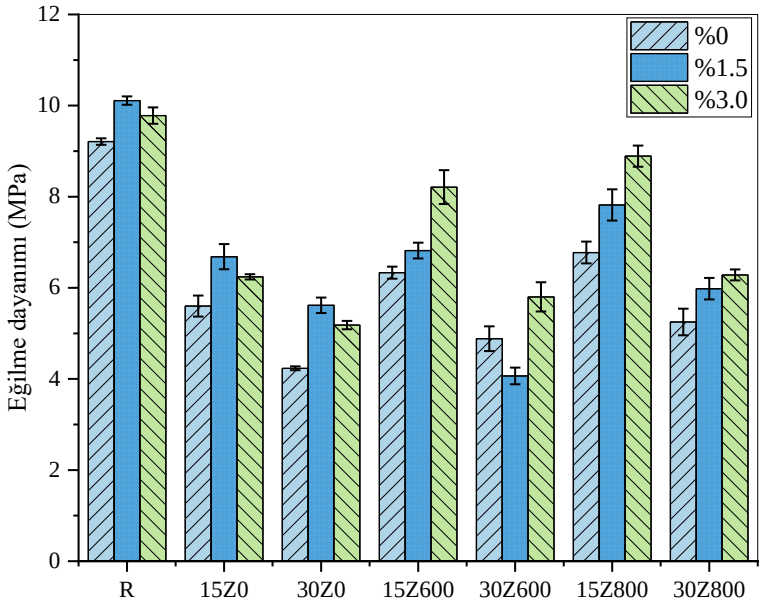
Şekil 4.21'de hızlandırılmış eskitme süreci uygulanan çimento esaslı kompozitlerin ağırlık değişimleri görülmektedir. Genel itibariyle çimento esaslı kompozitlerde ağırlık kaybı meydana gelmektedir. Referans karışımda kullanılan %1,5 ve 3 oranındaki cam lifi, ağırlık kayıplarını ortadan kaldırmış hatta numunelerin ağırlıklarında artışlar gözlenmiştir. En fazla ağırlık kaybı (%1,2) 600 ºC'de kalsine edilen zeolit ile üretilen karışımlarda cam lifinin %1,5 oranında kullanılması durumunda gerçekleşmektedir. 800 ºC'de kalsine edilen zeolit katkılı kompozitlerde

cam lifi kullanılması lifsiz karışımlara göre ağırlık kayıplarını azaltmıştır. Doğal ve 600 ºC'de kalsine edilen zeolit ile üretilen karışımlarda cam lifi ilavesi genellikle ağırlık kayıplarını arttırmıştır. Hızlandırılmış eskitme açısından en uygun lif oranının %1,5 olduğu belirlenmiştir.



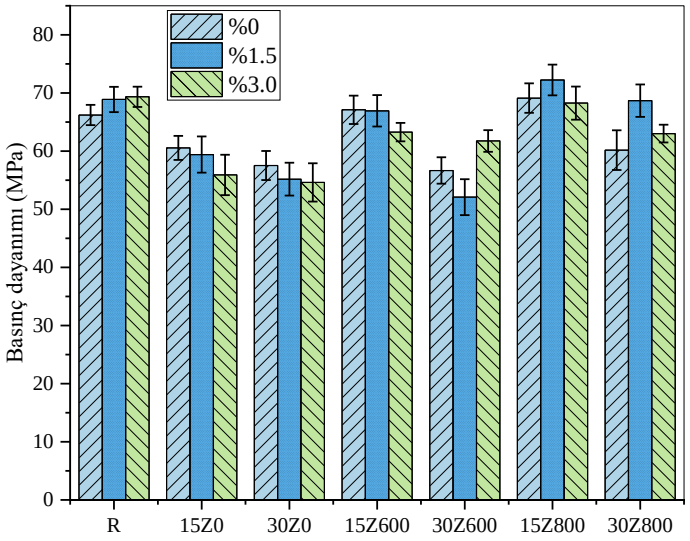
Şekil 4.21 Cam lifi içerikli çimento esaslı kompozitlerin hızlandırılmış eskitme sonrasındaki ağırlık değişimleri

Şekil 4.22'de çimento esaslı kompozitlerin hızlandırılmış eskitme süreci sonrasındaki eğilme dayanımları gösterilmiştir. Çimento esaslı kompozitlerin hızlandırılmış eskitme sonrasındaki eğilme dayanımlarının 4,1-10,1 MPa arasında değiştiği gözlenmiştir. Genellikle lif içeriğindeki artış eğilme dayanımlarını arttırmaktadır. Kalsine edilen zeolitler ile üretilen karışımların eğilme dayanımları doğal zeolit ile üretilen karışımlara göre daha üstün olmaktadır. Özellikle 800 ºC'de kalsine edilen zeolitin %15, cam lifinin %3 olması durumunda eğilme dayanımı 8,9 MPa olarak belirlenmiştir. Cam lifi içermeyen referans karışımın eğilme dayanımı 91 günlük eğilme dayanımına göre %20,8 azalmıştır. 600 ºC'de kalsine edilen zeolitin %15, cam lifinin %3 olması durumunda eğilme dayanımı 91 günlük eğilme dayanımına göre %16,1 oranında azalmıştır. Eskitme süreci lif-matris arasındaki aderansı olumsuz etkilediği için eğilme dayanımları azalmaktadır. Ancak cam lifi kullanımı ile oluşan dayanım kayıpları azaltılmıştır.



Şekil 4.22 Cam lifi içerikli çimento esaslı kompozitlerin hızlandırılmış eskitme sonrasındaki eğilme dayanımları

Şekil 4.23 çimento esaslı kompozitlerin hızlandırılmış eskitme süreci sonrasındaki basınç dayanımlarını göstermektedir. Doğal zeolit ile üretilen karışımlarda cam lifi içeriği arttıkça basınç dayanımı genellikle azalmaktadır. Referans ve 800 ºC'de kalsine edilen zeolit ile üretilen karışımlarda ise cam lifi kullanımı basınç dayanımını arttırmaktadır. Çimento esaslı kompozitlerin hızlandırılmış eskitme sonrasındaki basınç dayanımları 52,1-72,2 MPa arasında değişmektedir. Basınç dayanımı açısından da en uygun lif oranının %1,5 olduğu gözlenmiştir.



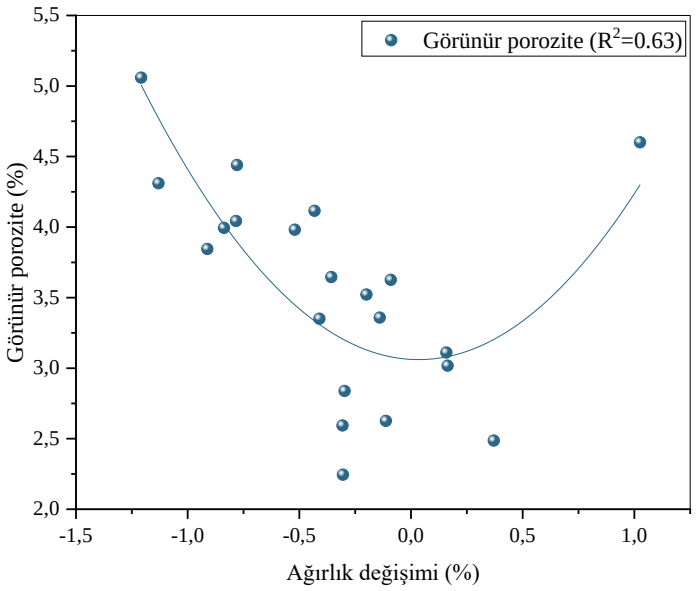
Şekil 4.23 Cam lifi içerikli çimento esaslı kompozitlerin hızlandırılmış eskitme sonrasındaki basınç dayanımları

Tablo 4.1'de çimento esaslı kompozitlerin hızlandırılmış eskitme süreci sonrasındaki basınç dayanımı kayıplarının (91. güne göre) ısı haritası verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi en fazla dayanım kaybı %15,07 değeri ile %15 doğal zeolitli karışımlarda cam lifinin %3 oranında kullanılması halinde oluşmaktadır. Referans ve doğal zeolit ile üretilen karışımlarda cam lifi kullanılmaması durumunda dayanım kayıpları %10'u geçmektedir. Kalsine edilmiş zeolit ile üretilen karışımlarda cam lifi kullanılması genellikle basınç dayanımlarındaki kayıpları azaltmaktadır. 600 ºC'de kalsine edilen zeolitin %15, 800 ºC'de kalsine edilen zeolitin %30 oranında olması durumunda cam lifi %1,5 olarak tercih edilirse basınç dayanımlarında sırasıyla %3,46 ve 3,34 oranında artışlar elde edilmiştir. Bu etki, %1,5 lif içeriğinde nispeten daha iyi işlenebilirliğe sahip olan karışımlarda uygulanan eskitme sürecinde hidrate olmamış zeolit tanelerini aktive ederek lif-matris arayüzeyinin gelişmesini sağlamıştır. Isı haritasına göre genellikle kalsine edilen zeolitlerden üretilen karışımlarda dayanım kayıpları daha az olmuştur.

Tablo 4.1 Hızlandırılmış eskitme sonrasında oluşan dayanım kayıplarının ısı haritası

Mix No.	Cam Lifi (%)		
	0	1,5	3
R	10,23	6,6	7,2
15Z0	11,85	12,05	15,07
30Z0	10,31	3,06	4,2
15Z600	5,05	-3,46	6,57
30Z600	5,86	2,65	-0,86
15Z800	4,64	2,18	6,45
30Z800	6,27	-3,34	0,92

Şekil 4.24'de görüldüğü gibi görünür porozite ve ağırlık değişimi arasında 0,63 değerine sahip bir R^2 elde edilmiştir. Karışımların görünür porozite değerleri arttıkça ağırlık kayıpları da artmaktadır. 600 ºC'de kalsine edilen zeolitin %30 oranında ve cam lifinin de %3 oranında kullanılması halinde numunelerin ağırlığı yaklaşık %1 artarken %4,6 gibi oldukça yüksek bir porozite değeri elde edilmiştir. Hızlandırılmış eskitme sürecinde yüksek poroziteye sahip karışımların mikroyapısı iyileşerek ağırlık kayıplarının azaldığı tahmin edilmektedir.



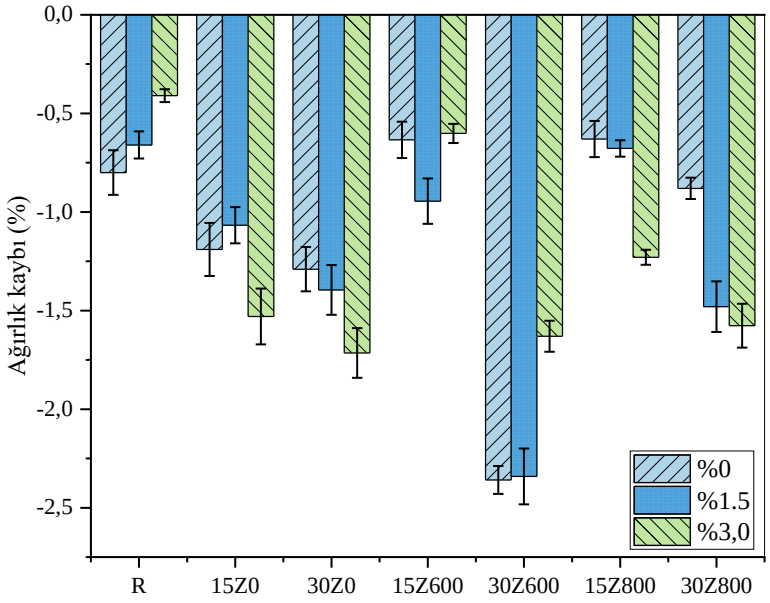
Şekil 4.24 Cam lifi içerikli çimento esaslı kompozitlerin ağırlık değişimi ile porozite arasındaki ilişkisi

Cam lifi takviyeli çimento esaslı kompozitlerde olumsuz hava şartlarını da temsil edecek şekilde birçok eskitme süreci önerilmiştir (Enfedaque vd. 2012). Bu kapsamda en yaygın kullanılan yöntem Arrhenius eşitliğine dayanan sıcak su yöntemi ile yapılan eskitme sürecidir (Purnell vd. 2000; Purnell ve Beddows, 2005; Cuypers vd. 2006). Sıcak suda hızlandırılmış eskitme süreci kompozitlerle gerçekleştirilmiş ve sonuçları, çeşitli iklimlerde doğal hava koşullarına maruz kalan malzemedeki dayanım değişiklikleri ile karşılaştırılmıştır. Sıcak iklimlerde 5-6 yıl boyunca olumsuz şartlara maruz kalan GRC malzemelerinin dayanımı, daha önce gerçek hava koşullarına karşı hızlandırılmış eskitme testlerinden tahmin edilenlerle aynı olmuştur (Cheng vd. 2019). Litherland vd. (1981) yaptıkları çalışmada hızlandırılmış eskitme testlerinin gerçek koşulları yansıtabileceğini belirtmişlerdir. Eskitme süreci lifin yüzeyine hasar vererek matris ile aderansını azaltır. Bunun sonucunda kompozitin dayanım ve tokluğu azalır (Genoves vd. 2015). Cheng vd. (2019) tarafından yapılan çalışmada hızlandırılmış eskitme testi sonunda mineral katkısız karışımlarda dayanım kayıpları oluşmuştur.

4.7 Cam Lifli Çimento Esaslı Kompozitlerin Donma-Çözülme Dayanıklılığı

Şekil 4.25'de 60 donma-çözülme döngüsü sonrasındaki ağırlık kayıpları verilmiştir. Çimento esaslı kompozitlerin ağırlık kayıpları %0,41 ile 2,35 arasında değişmektedir. Referans karışımda cam lifi içeriği arttıkça ağırlık kayıpları azalmıştır. %3 oranında cam lifi kullanılması durumunda ağırlık kaybı %0,5 değerinin altına düşmüştür. Doğal zeolitten üretilen çimento esaslı kompozitlerde lif içeriği arttıkça ağırlık kaybı artmaktadır. Çimento esaslı kompozitlerde en fazla ağırlık kaybı 600 ºC'de kalsine edilen zeolitin %30 oranında kullanılması halinde elde edilmiştir. Ancak bu karışımlarda cam lifi %3 oranında kullanıldığında ağırlık kaybı %1,63 olarak belirlenmiştir. 800 ºC'de kalsine edilen zeolitli karışımlarda cam lifinin artması ağırlık kaybını arttırmaktadır. Özellikle zeolit oranının %30, cam lifinin %3 olması durumunda ağırlık kaybı %1,5 değerini geçmektedir. Cam lifinin %1,5 olması durumunda ise ağırlık kaybı referans karışıma göre %124,2 oranında artmıştır. Cam lifinin artması genellikle işlenebilirliği azaltmış ve porozite artış göstermiştir. Porozitenin artması ile birlikte donma-çözülme etkisi ile daha fazla ağırlık kaybı oluşmuştur. 800 ºC'de kalsine edilen zeolitli karışımların işlenebilirliği

ve basınç dayanımı nispeten daha yüksektir. Bu karışımların kapiler boşluk çaplarının daha düşük olduğu düşünülürse donma esnasında oluşan hidrostatik basınç hasar derecesini arttırmıştır.

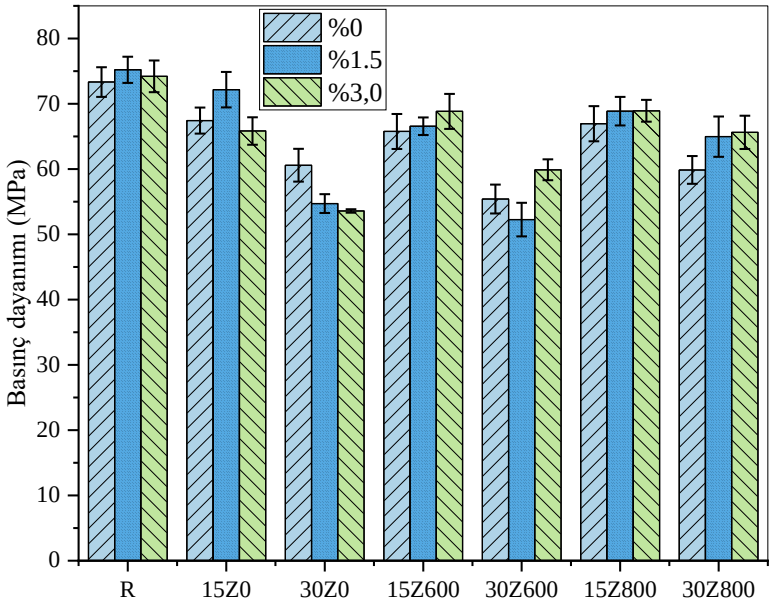


Şekil 4.25 60 döngü donma-çözülme etkisine maruz çimento esaslı kompozitlerde oluşan ağırlık kayıpları

Şekil 4.26'da 60 döngü donma-çözülmeye maruz kompozitlerin basınç dayanımları verilmiştir. Çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımları 52,3-74,2 MPa arasında değişmektedir. 60 döngü donma-çözülme etkisinden sonra da karışımların basınç dayanımlarının oldukça yüksek olduğu görülmektedir. %30 doğal zeolitli karışımlarda cam lifi kullanılması durumunda donma-çözülme sonrasında basınç dayanımları 60 MPa'nın altına düşmektedir. Karışımlarda kullanılan cam lifi genellikle basınç dayanımlarında artış sağlamıştır.

Tablo 4.2'de 60 donma-çözülme döngüsü sonrasında oluşan basınç dayanımı kayıpları (91. güne göre) verilmektedir. Tabloda görüldüğü gibi en fazla basınç dayanımı kaybı %7,75 değeri, %15 doğal zeolitli ve %1,5 cam lifli karışımda gözlenmiştir. Ancak çimento esaslı kompozitlerde 60 döngü donma-çözülme sonrasında genellikle dayanım artışı gözlenmiştir. Özellikle kalsine edilen zeolitlerden üretilen karışımlarda daha fazla dayanım kazanımı elde edilmiştir. Bu durum düşük donma-çözülme döngülerinde puzolanik aktivitenin devam etmesi ile

açıklanabilmektedir. Ayrıca karışımların s/b oranı düşük olduğu için kür açısından ihtiyaç duyulan su harç bünyesine tam girememektedir. Donma-çözülme etkisi ile oluşan mikroçatlaklardan içeriye sızan su hidrate olamayan tanelerin reaktif olmasını sağlamaktadır. Bunun sonucunda da basınç dayanımında artışlar elde edilebilmektedir.



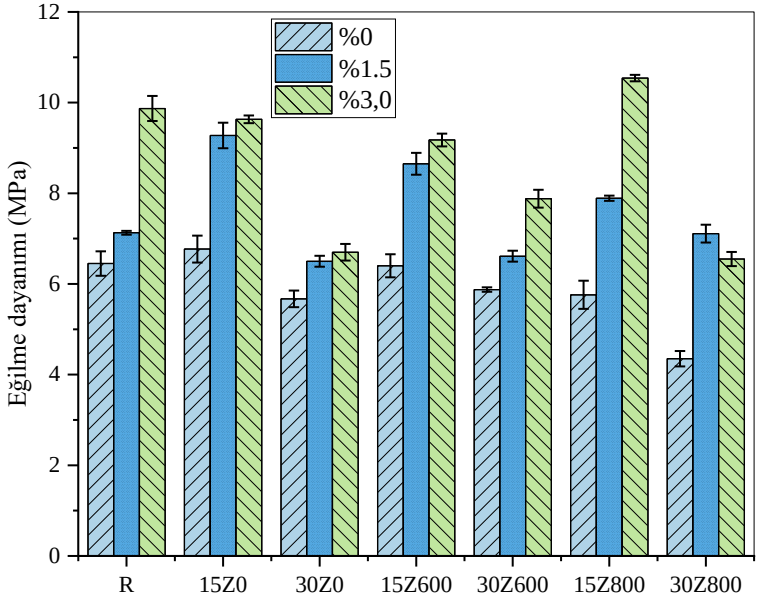
Şekil 4.26 60 döngü donma-çözülme etkisine maruz çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımları

Tablo 4.2 60 donma-çözülme döngüsü sonrası oluşan basınç dayanımı kayıpları

Mix No.	**Cam lifi (%)**		
	0	**1,5**	**3**
R	-0,48	-2,36	0,16
15Z0	0,44	-7,75	-2,29
30Z0	4,73	3,95	6,22
15Z600	7,2	-2,93	-2,05
30Z600	8,25	2,28	2,2
15Z800	8,03	7,16	5,41
30Z800	6,81	2,18	-3,09

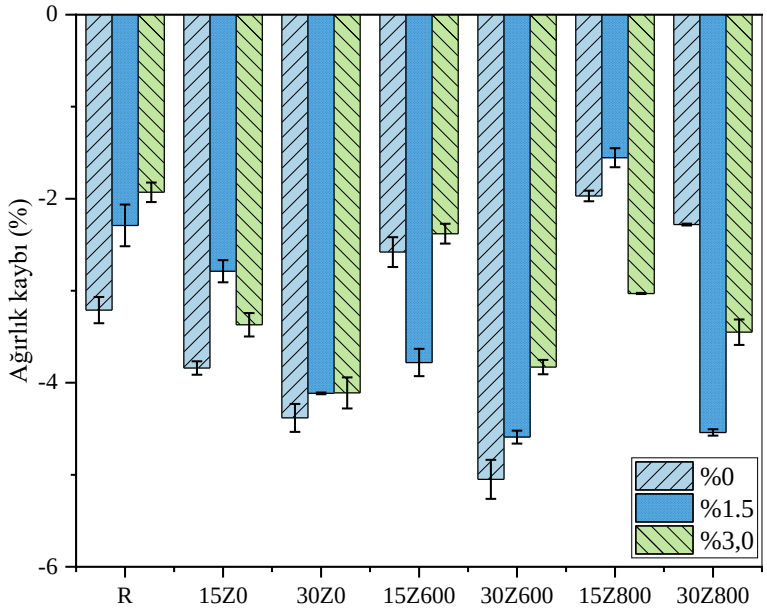
Şekil 4.27'de görüldüğü gibi 60 donma-çözülme döngüsü sonrasındaki eğilme dayanımları 10,4-4,4 MPa arasında değişmektedir. Cam lifindeki artış donma-

çözülme sonrasındaki eğilme dayanımlarının artmasını sağlamıştır. Özellikle 800 ºC'de kalsine edilen zeolitli karışımlarda cam lifinin %3 olması eğilme dayanımının 10 MPa'dan fazla olmasını sağlamıştır. Zeolit ikame oranının %30 olması eğilme dayanımlarını nispeten azaltmıştır. %30 800 ºC'de kalsine edilen zeolitli karışımın eğilme dayanımı %3 cam lifli referans karışıma göre 2,3 kat azalmıştır. Ancak basınç dayanımında olduğu gibi eğilme dayanımında da 91. güne göre artışlar elde edilmiştir.



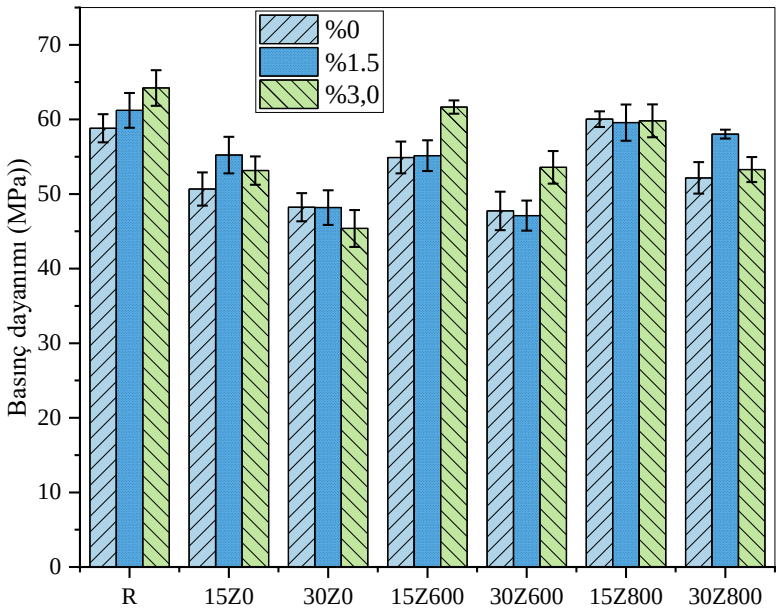
Şekil 4.27 60 döngü donma-çözülme etkisine maruz çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımları

Şekil 4.28'de görüldüğü gibi 120 donma-çözülme döngüsü sonrasında ağırlık kayıplarında belirgin artışlar gözlenmiştir. Ağırlık kayıplarının %1,93-4,54 arasında değiştiği görülmektedir. Referans karışımda cam lifi kullanımının ağırlık kayıplarını azalttığı, özellikle %3 cam lifi kullanımı ile ağırlık kaybı %2'nin altına düşmüştür. Benzer sonuçlar %15 ve 30 oranında doğal zeolit kullanılan karışımlarda da gözlenmiştir. 600 ºC'de kalsine edilen zeolitlerin kullanıldığı karışımlarda %3 oranında cam lifi kullanılması daha uygun olmaktadır. 800 ºC'de kalsine edilen zeolitlerin kullanıldığı karışımlarda cam lifi oranındaki artış lifsiz karışımlara göre daha fazla ağırlık kaybına yol açmıştır. %30 zeolit kullanılan karışımlarda cam lifinin %1,5 olması durumunda ağırlık kaybı %4,0 değerini geçmektedir. Yüksek zeolit oranına sahip karışımlarda cam lifinin %3 oranında kullanılması ağırlık kayıplarını %1,5 lif oranına göre nispeten azaltmaktadır.



Şekil 4.28 120 döngü donma-çözülme etkisine maruz çimento esaslı kompozitlerde oluşan ağırlık kayıpları

120 döngü donma-çözülmeye maruz çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımları Şekil 4.29'da verilmiştir. Referans karışımlarda cam lifinin %3 olması durumunda basınç dayanımı lifsiz karışıma göre %8,5 oranında artmıştır. Doğal zeolitli karışımlarda ise basınç dayanımları kalsine zeolitli karışımlara göre nispeten daha düşüktür. %15 oranında 800 ºC'de kalsine edilen zeolitlerin kullanıldığı karışımlarda cam lifindeki değişim basınç dayanımlarını etkilememiştir.



Şekil 4.29 120 döngü donma-çözülme etkisine maruz çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımları

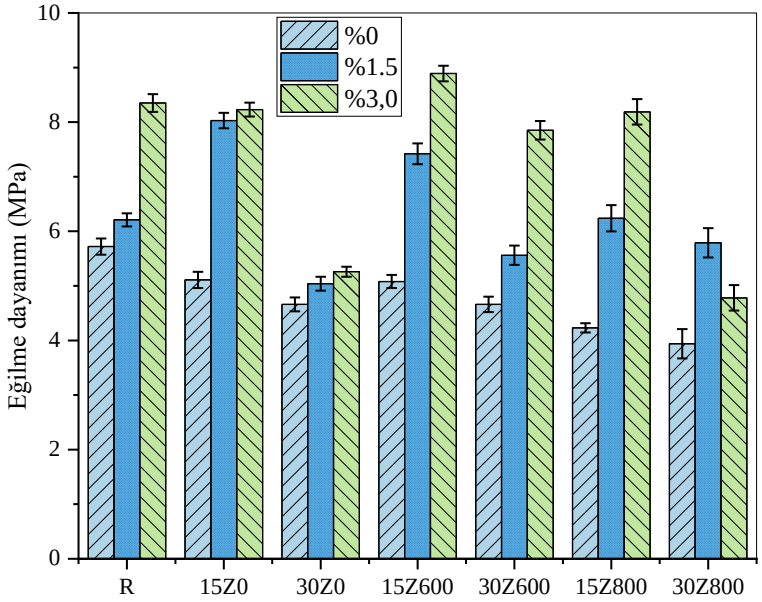
Tablo 4.3'de 120 donma-çözülme döngüsüne maruz kalan karışımların 91. güne göre basınç dayanımlarındaki kayıpların ısı haritası verilmiştir. Çimento esaslı kompzoitlerde donma-çözülme sonrasında oluşan dayanım kayıplarının %9,37-33,67 arasında olduğu görülmektedir. Karışımlarda kullanılan cam lifi donma-çözülme sonrasındaki hasarı azaltmıştır. Referans ve doğal zeolit ile üretilen karışımlarda daha fazla basınç dayanımı kaybı oluşurken kalsine edilen zeolitli karışımlarda nispeten daha az dayanım kayıpları meydana gelmiştir. %30 zeolit kullanılan karışımlarda cam lifinin %1,5 olması daha uygun olmaktadır. %15 zeolit kullanılan karışımlarda ise cam lifinin %3 olması uygun olabilmektedir. İşlenebilirlik ve porozite arasındaki ilişkinin çimento esaslı kompozitlerin donma-çözülme direnci üzerinde etkili olabileceği görülmüştür. Yüksek zeolit ya da cam lifi oranı işlenebilirliği azaltarak poroziteyi arttırmaktadır. Bunun sonucunda da donma-çözülme sonrasındaki hasar derecesi artabilmektedir.

Tablo 4.3 120 donma-çözülme döngüsü sonrası oluşan basınç dayanımı kayıpları

Mix No.	**Cam lifi (%)**		
	0	**1,5**	**3**
R	-24,07	-19,97	-15,75
15Z0	-33,67	-20,53	-21,03
30Z0	-31,56	-18,03	-25,39
15Z600	-28,41	-17,18	-9,37
30Z600	-25,65	-13,49	-14,25
15Z800	-20,47	-23,9	-21,46
30Z800	-22,58	-14,41	-19,34

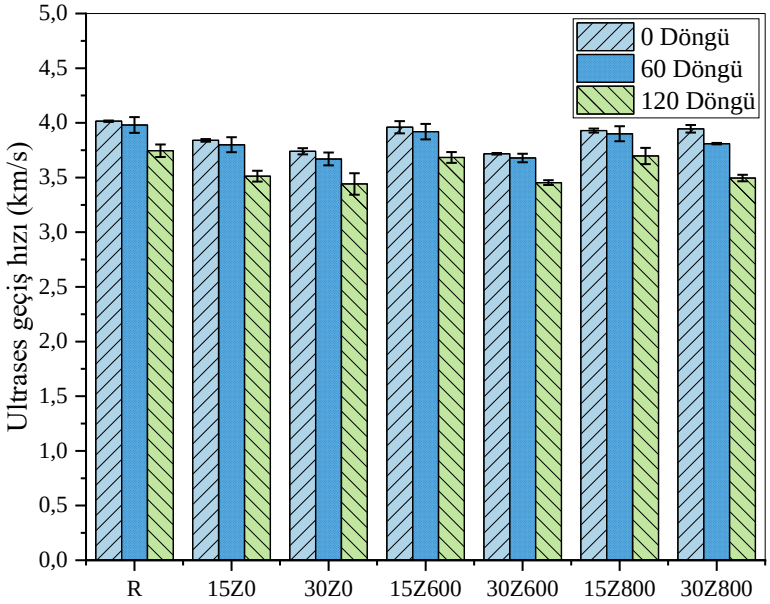
Şekil 4.30'da görüldüğü gibi 120 donma-çözülme döngüsü sonrası eğilme dayanımları 9 MPa değerinin altına düşmüştür. Cam lifindeki artış eğilme dayanımlarını arttırmaktadır. Özellikle kalsine edilen zeolitlerle %3 oranında cam lifi kullanılması durumunda eğilme dayanımı 8 MPa değerini geçmektedir. Ancak %15 oranında 800 ºC'de kalsine edilen zeolitli karışımlarda %3 oranında cam lifi kullanılmasına rağmen eğilme dayanımı 91 güne göre %42,3 oranında azalmıştır. Benzer bir durum %3 cam lifli ve %15 doğal zeolitli karışımlarda da gözlenmiş ve

dayanım kaybı %34,9 olarak ölçülmüştür. Lifsiz referans karışımın donma-çözülme sonrasındaki eğilme dayanımı ise %50,8 oranında azalmıştır.



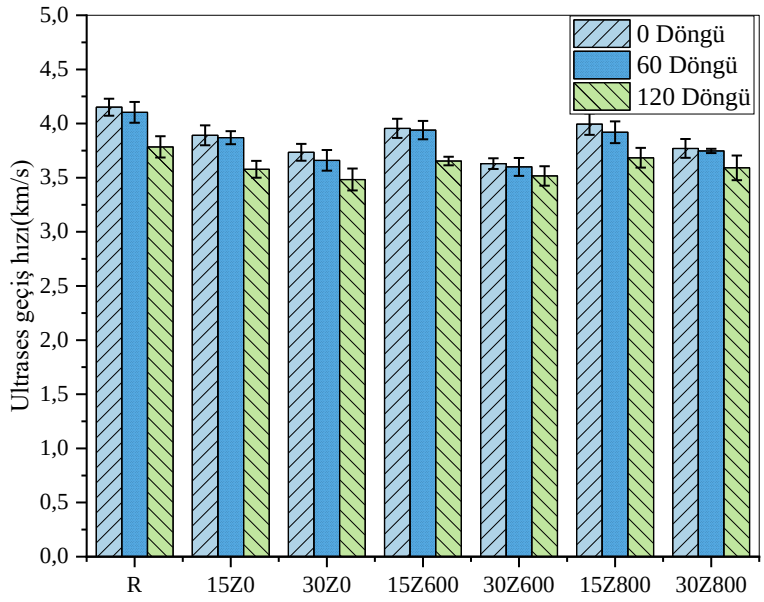
Şekil 4.30 120 döngü donma-çözülme etkisine maruz çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımları

Şekil 4.31'de cam lifi içermeyen karışımların 60 ve 120 donma-çözülme döngüsü sonrasındaki ultrases geçiş hızları verilmiştir. Karışımlarda 60 donma-çözülme döngüsü sonrasında ultrases geçiş hızlarının çok değişmediği görülmektedir. 60 donma-çözülme döngüsü sonrasında ultrases geçiz hızı en fazla 800 ºC'de kalsine edilen zeolitli karışımlarda %3,8 değeri ile gözlenmiştir. Aynı karışımın 120 donma-çözülme döngüsü sonrasındaki ultrases geçiş hızındaki kayıp %11,4 olarak ölçülmüştür. 120 donma-çözülme döngüsü sonrasındaki ultrases geçiş hızları 3,44-3,74 km/s arasında değişmektedir. Zeolit içeriğindeki artış ile birlikte ultrases geçiş hızları daha fazla azalmaktadır. %15 oranında 800 ºC'de kalsine edilen zeolitli karışımlarda ultrases geçiş hızı %5,9 oranında azalmıştır.



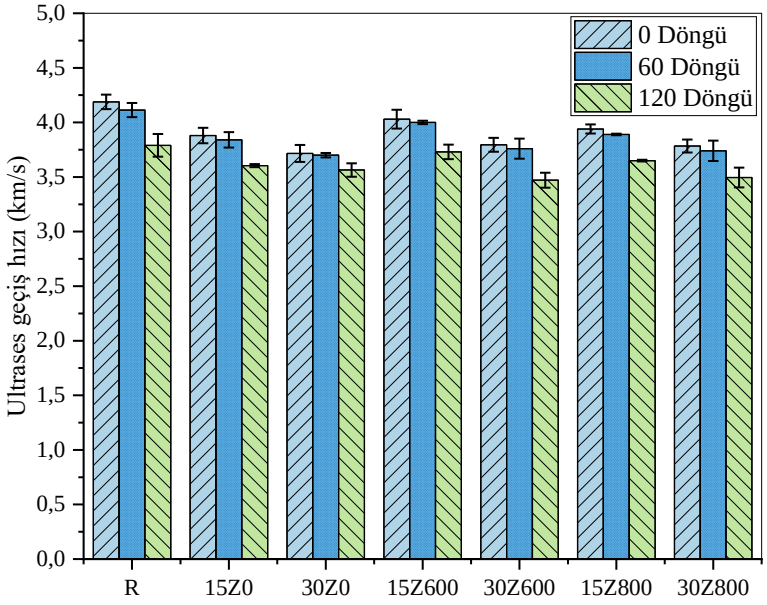
Şekil 4.31 Cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozitlerin ultrases geçiş hızındaki değişimler

Şekil 4.32'de %1,5 oranında cam lifi kullanılan karışımların 60 ve 120 donma-çözülme döngüsü sonrasındaki ultrases geçiş hızları verilmiştir. 60 donma-çözülme döngüsü sonrasındaki ultrases geçiş hızları 3,60-4,11 km/s, 120 donma-çözülme döngüsü sonrasındaki ultrases geçiş hızları ise 3,48-3,78 km/s arasında değişmektedir. %30 oranında 600 ºC'de kalsine edilen zeolitli karışımların ultrases geçiş hızlarında çok belirgin farklar gözlenmezken geçiş hızında en fazla kayıp %9,9 oranı ile referans karışımda elde edilmiştir.



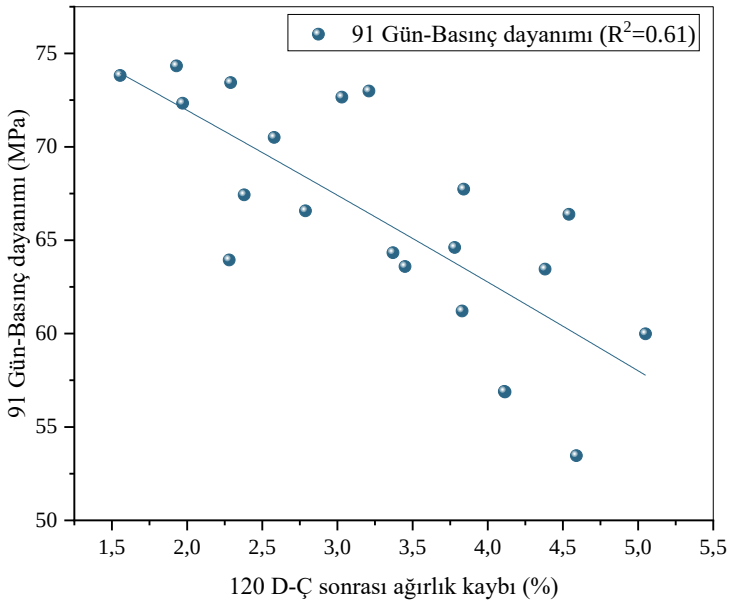
Şekil 4.32 %1,5 cam lifli çimento esaslı kompozitlerin ultrases geçiş hızındaki değişimler

Şekil 4.33'de %3 cam lifi kullanılan çimento esaslı kompozitlerin 60 ve 120 döngü sonrasındaki ultrases geçiş hızları verilmiştir. Diğer karışımlarda olduğu gibi 60 donma-çözülme döngüsü ultrases geçiş hızlarını çok etkilememiştir. Ancak 120 donma-çözülme döngüsü ultrases geçiş hızlarını büyük ölçüde azaltmıştır. 120 donma-çözülme döngüsü ultrases geçiş hızları 3,47-3,79 km/s arasında değişmektedir. Ultrases geçiş hızlarındaki azalma oranı %4,1-9,5 arasında değişmektedir. Ultrases geçiş hızındaki en fazla azalma referans karışımda, en az ise %30 doğal zeolit ile üretilen karışımlarda elde edilmiştir.



Şekil 4.33 %3 cam lifli çimento esaslı kompozitlerin ultrases geçiş hızındaki değişimler

Şekil 4.34'de 120 döngü donma-çözülme sonrasında oluşan ağırlık kaybının 91 günlük basınç dayanımı ile ilişkisi gösterilmiştir. 91 günlük basınç dayanımı arttıkça karışımların 120 donma-çözülme döngüsü sonrasındaki ağırlık kayıpları azalmaktadır. Bu durum donma-çözülme öncesi çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımının önemini göstermektedir. Yüksek basınç dayanımına tabi olan karışımların daha geçirimsiz olmasına bağlı olarak daha az hasar almaktadır. Özellikle %2'den daha az ağırlık kaybına uğrayan karışımların 70 MPa'dan daha fazla basınç dayanımına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.34 120 döngü donma-çözülme sonrasında oluşan ağırlık kaybının 91 günlük basınç dayanımı ile ilişkisi

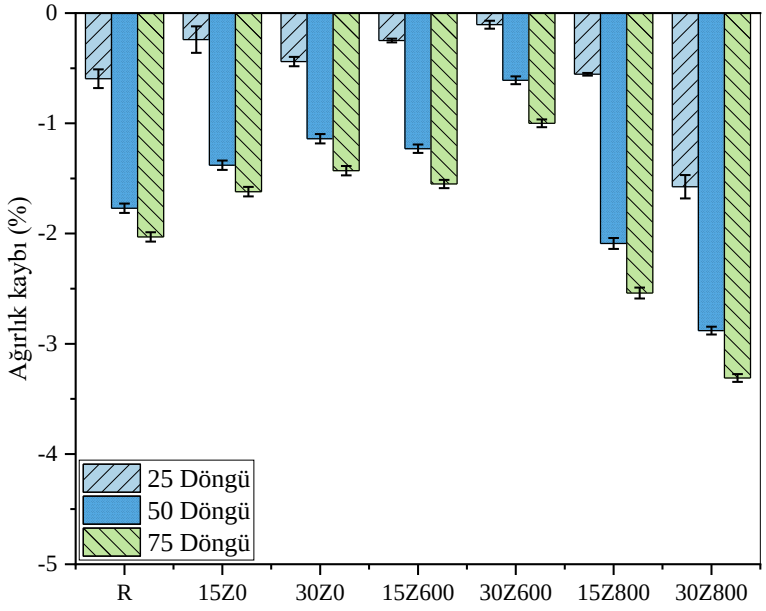
Keleştemur vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada cam lifi kullanılması durumunda karışımların donma çözülme dayanıklılığı iyileşmiştir. Liflerin betona eklenmesiyle oluşturulan hava boşluğu sistemine ek olarak, lifler çevreleyen betona göre düşük elastisite modülüne ve düşük yoğunluğa sahiptir. Beton donma-çözülme döngüsüne maruz kaldığında, lifler betondan önce hidrostatik basınç altında akma gösterecek ve böylece daha fazla gerilme sönümleyebilecektir. Bu etki sayesinde cam lifi betonu donma çözülme etkisine karşı korumaktadır (Richardson vd. 2012).

Zheng vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada zeolit katkılı betonlarda 150 donma-çözülme döngüsünden sonra daha iyi performans elde edilmiştir. Benzer sonuçlar Nagrockiene ve Girskas (2016) tarafından da elde edilmiş ve donma çözülme direnci için optimum zeolit oranı olarak %10'u önermişlerdir. Markiv vd. (2016) de yaptıkları çalışmada doğal zeolitin kullanılması durumunda %10 oranında tercih edilmesini belirtmişlerdir.

4.8 Cam Lifli Çimento Esaslı Kompozitlerin Islanma-Kuruma Dayanıklılığı

Şekil 4.35'de görüldüğü gibi ıslanma-kuruma döngüsü arttıkça karışımların ağırlık kayıpları artmaktadır. 600 ºC'de kalsine edilen zeolitlerden üretilen kompozitlerin ağırlık kayıpları nispeten daha azdır ancak 800 ºC'de kalsine edilen zeolitlerden

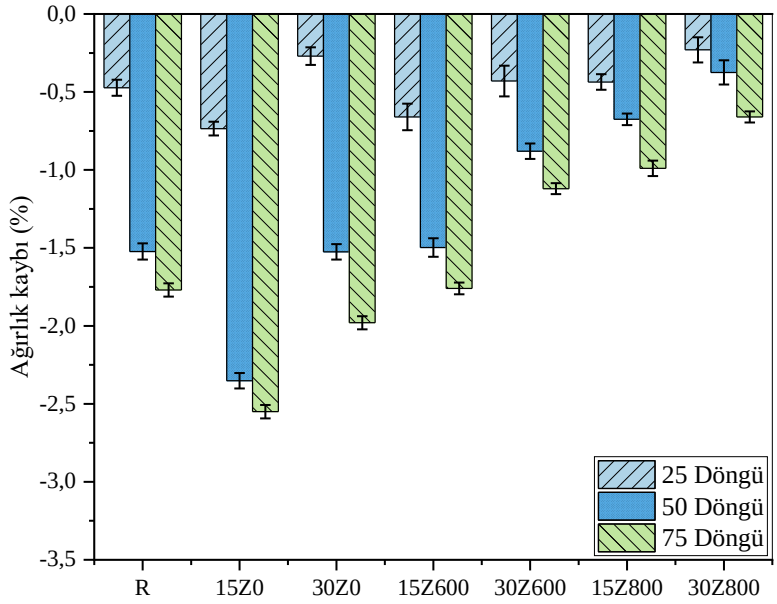
üretilen karışımlarda daha fazla ağırlık kayıpları meydana gelmiştir. 25 ıslanma kuruma döngüsünde ağırlık kayıpları %0,1-1,6 arasında değişmektedir. 25 ıslanma kuruma döngüsü karışımlarda belirgin bir ağırlık kaybı oluşturmamıştır. Ancak 50 ıslanma kuruma döngüsü sonrasında karışımlarda %0,6-2,9 oranında ağırlık kaybı oluşmuştur. %30 oranında 800 ºC'de kalsine edilen zeolitlerden üretilen karışımların ağırlık kaybı referans karışıma göre %89,5 artmıştır. 75 ıslanma kuruma döngüsü uygulanan karışımların ağırlık kayıpları ise %1 ile 3,3 arasında değişmektedir. Doğal ve 600 ºC'de kalsine edilen zeolitlerden üretilen karışımlarda ikame oranı arttıkça ağırlık kayıpları azalırken 800 ºC'de kalsine edilen zeolitlerde ikame oranı arttıkça ağırlık kaybı artış göstermiştir. Ayrıca basınç dayanımı yüksek olan karışımların daha fazla ağırlık kaybına uğradığı da tespit edilmiştir.



Şekil 4.35 Cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozitlerin ıslanma-kuruma etkisi sonucundaki ağırlık kayıpları

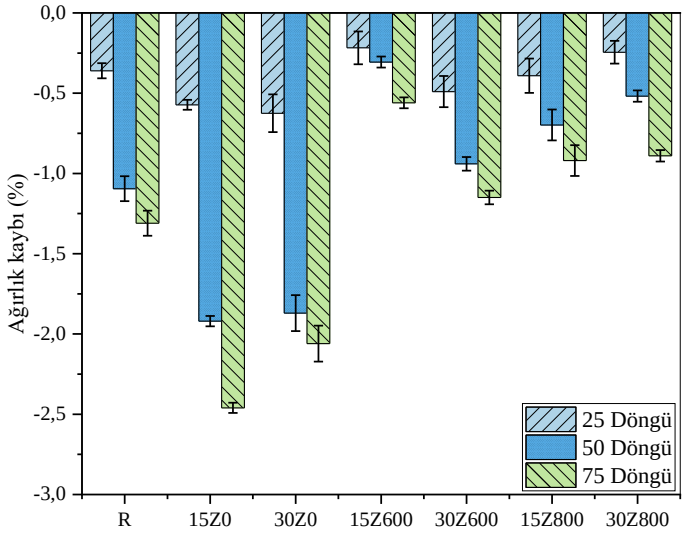
Şekil 4.36'da %1,5 cam lifi kullanılan çimento esaslı kompozitlerin farklı ıslanma-kuruma döngülerindeki ağırlık kayıpları verilmiştir. %1,5 cam lifi kullanılan karışımlarda lifsiz karışımlara göre oldukça farklı bir davranış gözlenmiştir. Tüm zeolitli karışımlarda ikame oranı arttıkça ağırlık kayıplarının azaldığı görülmektedir. 50 ve 75 ıslanma-kuruma döngüsünde doğal zeolit ile üretilen karışımlarda daha fazla ağırlık kayıpları meydana gelmiştir. Özellikle doğal zeolitten üretilen karışımlarda 75 ıslanma-kuruma döngüsünden sonra %2'den daha fazla ağırlık kaybı

oluşmuştur. Kalsine zeolitler ile üretilen karışımlarda kullanılan cam lifi ağırlık kayıplarının azalmasını sağlamıştır.



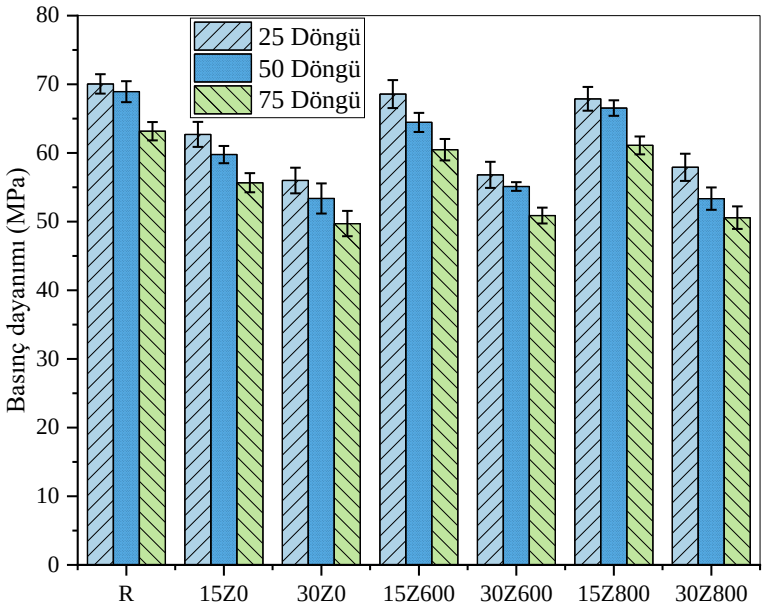
Şekil 4.36 %1,5 cam lifi içerikli çimento esaslı kompozitlerin ıslanma-kuruma etkisi sonucundaki ağırlık kayıpları

Şekil 4.37'de %3 cam lifi takviyeli karışımların 25, 50 ve 75 ıslanma kuruma döngüsü sonrasındaki ağırlık kayıpları verilmiştir. 25 ıslanma kuruma döngüsüne maruz karışımların ağırlık kayıpları %0,6 değerini geçmemiştir. Ancak ıslanma kuruma döngüsü arttıkça ağırlık kayıpları belirgin bir şekilde artmıştır. 50 ıslanma-kuruma döngüsündeki ağırlık kayıpları %0,3-1,9 arasında değişmektedir. 75 ıslanma kuruma döngüsünde ise bu oran %0,5-2,5 arasındadır. %15 doğal zeolitin kullanılması halinde 75 ıslanma kuruma çevrimi sonrasında ağırlık kaybı referans karışıma göre 1,9 kat artmıştır. 600 ºC'de kalsine edilen zeolitten üretilen karışımlarda ikame oranı arttıkça ağırlık kaybı artış göstermiştir. Ancak genel olarak cam lifi katkılı karışımlarda zeolit içeriğindeki artış ağırlık kayıplarını engellemektedir. Bu durum çimentoya göre daha ince olan zeolitin lif-matris arasındaki arayüzeyi iyileştirmesinden kaynaklanmaktadır.



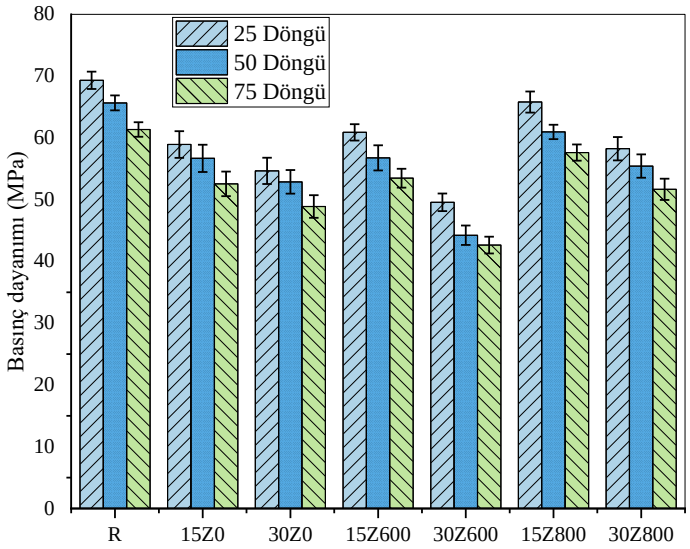
Şekil 4.37 %3 cam lifi içerikli çimento esaslı kompozitlerin ıslanma-kuruma etkisi sonucundaki ağırlık kayıpları

Farklı ıslanma-kuruma döngüsüne maruz lifsiz çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımları Şekil 4.38'de verilmiştir. Döngü sayısı arttıkça karışımların basınç dayanımları azalmaktadır. 25 ıslanma kuruma döngüsünde basınç dayanımında belirgin azalmalar gözlenmemiştir. Referans karışımın basınç dayanımı 91. güne göre %2,8 oranında azalmıştır. 50 ıslanma-kuruma döngüsüne maruz çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımları 53,3-68,9 MPa arasında değişmektedir. 50 ıslanma kuruma döngüsü sonucunda en fazla basınç dayanımı kaybı %16,6 değeri ile 800 ºC'de kalsine edilen zeolitli karışımlarda oluşmuştur. 75 ıslanma kuruma döngüsü uygulanan karışımların basınç dayanımları 50 MPa'nın üzerindedir. Basınç dayanımlarındaki kayıp ise %13,1-21,4 arasında değişmektedir. 75 ıslanma kuruma döngüsü daha çok doğal zeolit ile üretilen karışımlara hasar vermiştir.



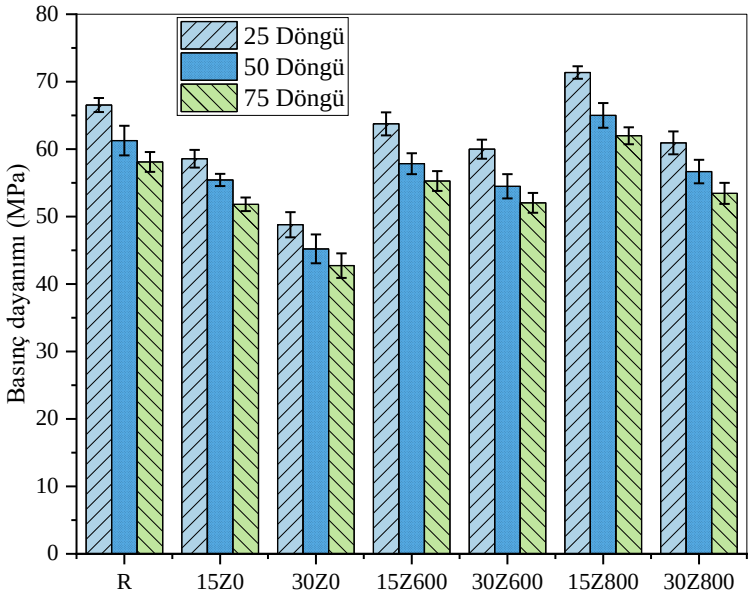
Şekil 4.38 Cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozitlerin ıslanma-kuruma etkisi sonucundaki basınç dayanımları

Farklı ıslanma-kuruma döngüsüne maruz %1,5 cam lifi içerikli çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımları Şekil 4.39'da verilmiştir. %1,5 cam lifi katkılı çimento esaslı kompozitlerde zeolit içeriği arttıkça basınç dayanımları azalmıştır. 25 ıslanma kuruma döngüsünde en fazla basınç dayanımı kaybı 800 ºC'de kalsine edilen zeolitli karışımlarda gözlenmiştir. %30 zeolit içerikli karışımlarda 91. güne göre %12,2 oranında dayanım kaybı oluşmuştur. 50 ıslanma-kuruma çevrimine maruz karışımların basınç dayanımları 44,2-65,6 MPa arasında değişmektedir. %15 doğal zeolitli karışımların basınç dayanımı 91. güne göre %14,8 oranında azalmıştır. Bu oran 75 ıslanma kuruma döngüsünde %21,1 olarak belirlenmiştir. Kalsine edilmiş zeolitli karışımlarda zeolit oranı arttıkça 75 ıslanma kuruma döngüsü sonrasında daha fazla dayanım kaybı oluşmuştur.



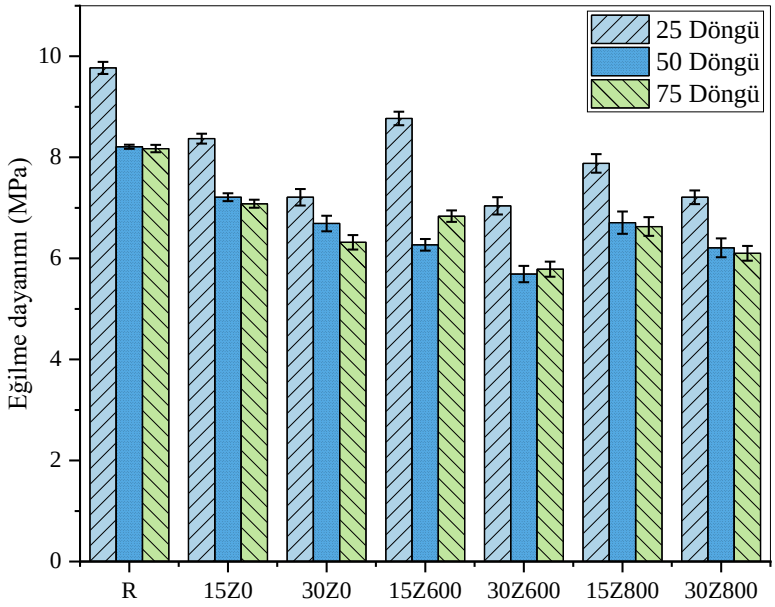
Şekil 4.39 %1,5 cam lifi içeren çimento esaslı kompozitlerin ıslanma-kuruma etkisi sonucundaki basınç dayanımları

Şekil 4.40'da %3 cam lifi içerikli karışımların 25, 50 ve 75 ıslanma kuruma döngüsü sonrasındaki basınç dayanımları görülmektedir. Döngü sayısındaki artış basınç dayanımlarını azaltmaktadır. 25 döngüye maruz karışımlarda doğal zeolitin %30 olması durumunda basınç dayanımı %14,3 azalmıştır. Ancak %15 oranında 800 ºC'de kalsine edilmiş zeolitli karışımlarda basınç dayanımında %1,5 oranında azalma gerçekleşmiştir. 50 ıslanma kuruma döngüsüne maruz karışımların basınç dayanımları 45,2-65,0 MPa arasında değişmektedir. Basınç dayanımlarında %10,8-20,2 arasında azalmalar meydana gelmiştir. En fazla dayanım kaybı %30 doğal zeolit ile üretilen karışımlarda oluşmuştur. 75 ıslanma kuruma döngüsüne maruz karışımlarda ise basınç dayanımının 45 MPa'nın altına kadar düştüğü gözlenmektedir. 75 ıslanma kuruma döngüsü sonrasında basınç dayanımında %14,7-21,9 arasında azalmalar oluşmuştur. Karışımların porozite değeri arttıkça genellikle dayanım kayıpları da artış göstermiştir. Bu durum özellikle zeolit içeriğinin artması ile oluşmaktadır. Lifsiz ve %30 doğal zeolit ile elde edilen karışımın 75 ıslanma kuruma döngüsünden sonraki basınç dayanımı 50,1 MPa iken, %3 cam lifi kullanıldığı basınç dayanımı 44,9 MPa olarak ölçülmüştür. Cam lifindeki artış işlenebilirliği azaltarak poroziteyi arttırdığı için ıslanma-kuruma döngülerinde oluşan hasarı da arttırmaktadır.



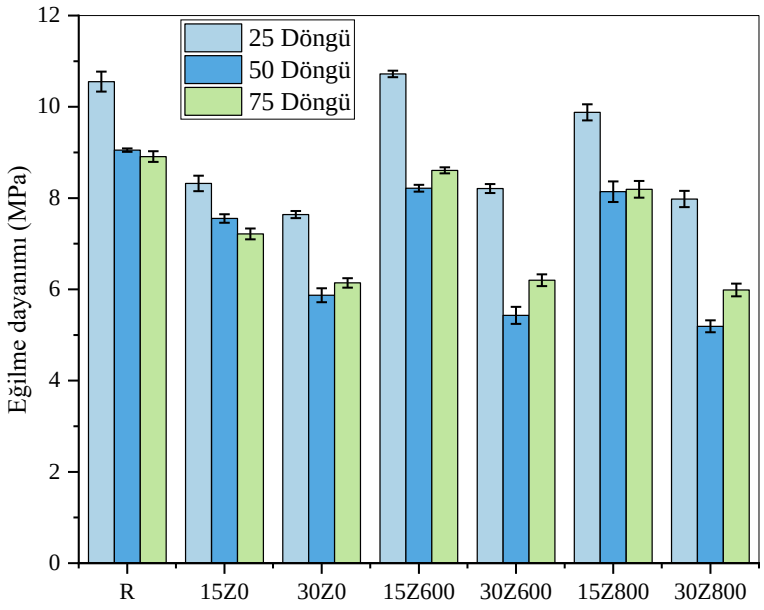
Şekil 4.40 %3 cam lifi içeren çimento esaslı kompozitlerin ıslanma-kuruma etkisi sonucundaki basınç dayanımları

Şekil 4.41'de cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozitlerin 25, 50 ve 75 ıslanma kuruma döngüsü sonrasındaki eğilme dayanımları görülmektedir. 25 ıslanma-kuruma döngüsüne maruz kalan kompzoitlerin eğileme dayanımları 10 MPa değerinin altındadır. Ayrıca döngü sayısı arttıkça eğilme dayanımları düşmektedir. 25 ıslanma kuruma döngüsüne maruz kompozitlerin 91. güne göre eğilme dayanımları %16,0-31,9 oranında azalmıştır. 50 ıslanma-kuruma döngüsüne maruz kompozitlerin eğilme dayanımı ise 5,7-8,2 MPa arasında değişmektedir. Zeolit içeriğindeki artış genellikle eğilme dayanımlarını azaltmaktadır. %30 oranında 600 ºC'de kalsine edilen zeolit ile üretilen karışımların eğilme dayanımı 91. güne göre %41,8 oranında azalmıştır. 75 ıslanma kuruma döngüsüne maruz karışımların eğilme dayanımı %29,7-40,8 oranında azalmaktadır. Eğilme dayanımı en az %29,7 değeri ile referans karışımda azalmıştır. Zeolit katkılı karışımlarda eğilme dayanımında oluşan azalmalar %35,5'den fazladır.



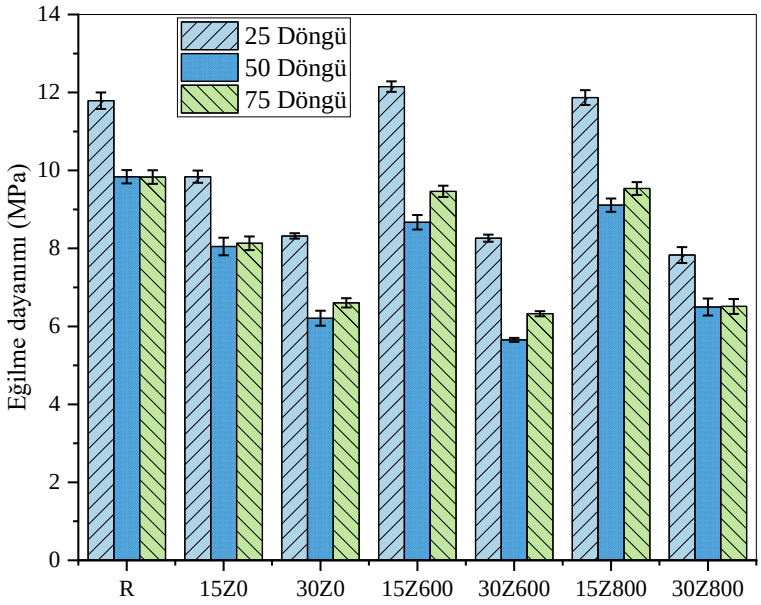
Şekil 4.41 Cam lifi içermeyen çimento esaslı kompozitlerin ıslanma-kuruma etkisi sonucundaki eğilme dayanımları

Farklı ıslanma-kuruma döngüsüne maruz %1,5 cam lifi içerikli çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımları Şekil 4.42'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi zeolit içeriğindeki artış eğilme dayanımlarını azaltmaktadır. 25 ıslanma kuruma döngüsüne maruz karışımların eğilme dayanımı 91. güne göre %13,6-30,9 oranında azalmıştır. En fazla dayanım kaybı %30 doğal zeolit ile üretilen karışımlarda meydana gelmiştir. 50 ıslanma-kuruma döngüsüne maruz karışımların eğilme dayanımı 5,2-9,1 MPa arasında değişmektedir. Kalsine edilen zeolitlerden üretilen karışımlarda ikame oranının %15 olması durumunda eğilme dayanımı 8 MPa'dan fazla olmaktadır. 75 ıslanma kuruma döngüsüne maruz karışımlarda ise eğilme dayanımları genellikle 8 MPa değerinin altına düşmüştür. Karışımların eğilme dayanımları 91. güne göre %28,6 ile 44,5 arasında azalmıştır.



Şekil 4.42 %1,5 cam lifi içeren çimento esaslı kompozitlerin ıslanma-kuruma etkisi sonucundaki eğilme dayanımları

Şekil 4.43'de %3 cam lifi içeren çimento esaslı kompozitlerin 25, 50 ve 75 ıslanma kuruma döngüsü sonrasındaki eğilme dayanımları görülmektedir. Lif içeriğindeki artış ıslanma kuruma sonrasındaki eğilme dayanımlarını nispeten arttırmıştır. Kalsine edilen zeolitli ve referans karışımın 25 döngü sonrasında yaklaşık 12 MPa eğilme dayanımına sahip olduğu görülmektedir. Dayanım kayıpları daha çok 50 ıslanma-kuruma döngüsü ile başlamaktadır. 50 ıslanma kuruma döngüsüne maruz çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımları 5,7-9,8 MPa arasında değişmektedir. %30 zeolit kullanılan karışımlarda oluşan eğilme dayanımı kaybı %38,8 ile 47,6 arasında değişmektedir. 75 ıslanma kuruma döngüsüne maruz kompozitlerin eğilme dayanımları 10 MPa değerinin altına düşmüştür. Çimento esaslı kompozitlerde oluşan eğilme dayanımı kayıpları %29,6-41,3 arasında değişmektir. 50 ve 75 ıslanma kuruma döngüsü arasında çok belirgin farklar gözlenmemiştir. Hatta 75 ıslanma kuruma döngüsüne maruz bazı karışımların eğilme dayanımlarında artışlar gözlenmiştir. Bu etki ıslanma-kuruma etkisi ile kendiliğinden iyileşme mekanizması ile açıklanabilmektedir. Lif-matris arasındaki arayüzeyde oluşan iyileşme eğilme dayanımlarını nispeten (50 ıslanma-kuruma döngüsüne göre) arttırmıştır. Islanma kuruma döngüsüne maruz karışımlar için kalsine zeolitlerin %15 oranında kullanılması daha uygun olabilmektedir. Cam lifi içeriğinin de %1,5 olması optimum oran olarak belirlenmiştir. Karışımların işlenebilirleğe bağlı olan porozite değerlerinin ıslanma kuruma döngüleri açısından da önemli olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.43 %3 cam lifi içeren çimento esaslı kompozitlerin ıslanma-kuruma etkisi sonucundaki eğilme dayanımları

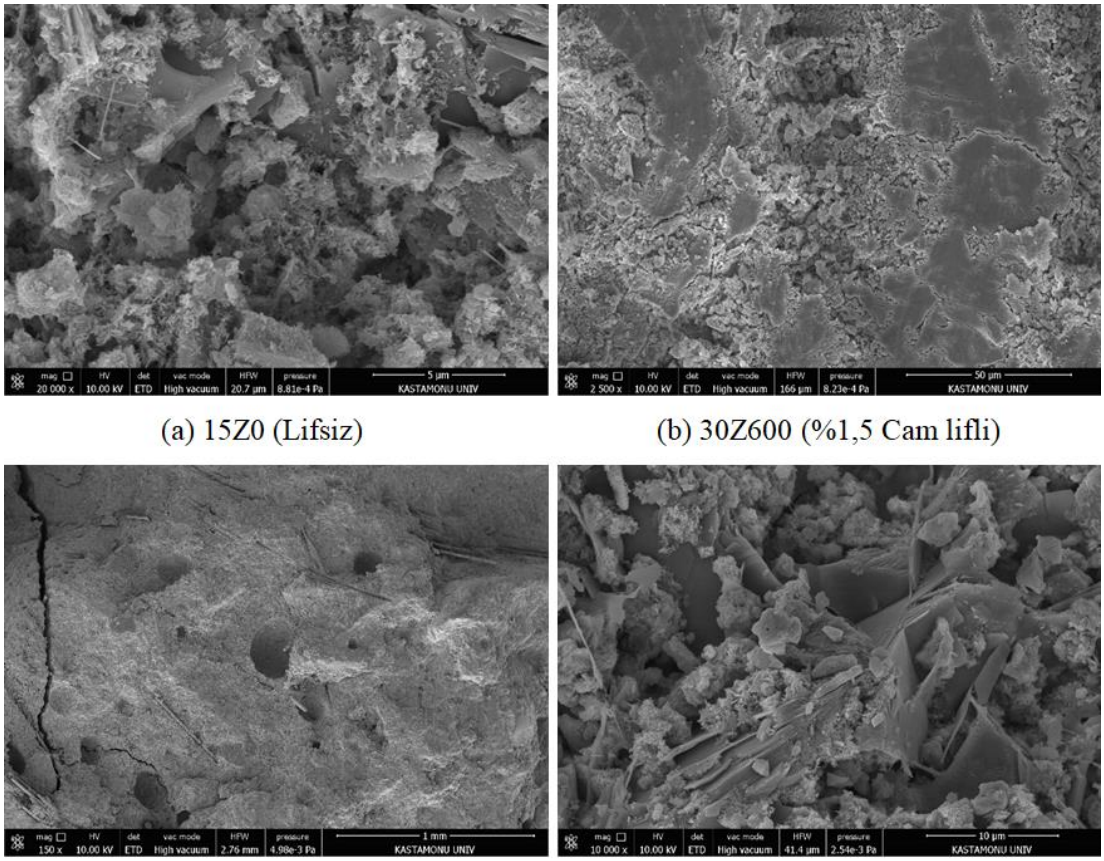
Beton gevrek bir malzeme olduğundan, döngüsel ıslanma ve kuruma nedeniyle oluşan büzülme ve genleşme gerilmeleri beton bünyesinde mikro çatlaklara neden olmaktadır. Bu gibi durumlarda, dış yüklere veya çevresel etkilere maruz kalmadan dahi betonun mikroyapısında gerilme yoğunlaşma bölgeleri oluşmaktadır (Soroushian ve Elzafraney, 2004). Islanma kuruma döngüleri, yapı malzemelerinde sıcak havalarda suyun buharlaşması sonucu kuruma rötresi ve ani iklim değişikliğine bağlı olarak çatlakların oluşması ile birlikte dayanımın azalmasına veya malzemenin bozulmasına neden olmaktadır (Kampala vd. 2014). Bunun nedenlerinden bir tanesi çimento esaslı kompozitlerde kullanılan malzemelerin farklı termal genleşme katsayılarına sahip olmasıdır (Banthia ve Gupta, 2006). Kwan vd. (2018) tarafından yapılan çalışmada, cam lifleri geçirimliliği azalttığı için ıslanma-kuruma çevrimlerinde betonun daha az hasar aldığını belirtmişlerdir. Durgun (2020) tarafından yapılan alçı harçlarında mikro fil ile ıslanma kuruma sonrası oluşan parçalanmalar oldukça azaltılmıştır.

Kalsine zeolit ile üretilen çimento esaslı kompozitlerde ıslanma kuruma etkisine ait literatürde çalışma bulunmamaktadır. Ancak mineral katkıların geçirimsizliği sağlaması nedeniyle ıslanma-kuruma etkisine karşı çimento esaslı kompozitlerin direncini arttırmaktadır. Bu etki, mineral katkıların gözenek yapısını iyileştiren ve mikro yapıyı daha yoğun hale getiren dolgu etkisi ile açıklanmaktadır. Uçucu kül ve

yüksek fırın cürufunun puzolanik reaksiyonu, daha düşük geçirgenlik sağladığı için ıslanma kuruma hasarı azalmaktadır (Qi vd. 2018).

4.9 Çimento Esaslı Kompozitlerin Mikroyapıları

Şekil 4.44a'da görüldüğü gibi, çimento esaslı kompozitlerde C-S-H jellerinin oluştuğu gözlemlenmiştir. CSH jelleri nano ölçekli ve iğnemsi bir yapıya sahiptir. Ayrıca puzolanik aktivite nedeniyle daha yoğun bir mikro yapı elde edilmiştir. Şekil 4.44b'de görüldüğü gibi mikro çatlakların en çok hamur veya matriste oluştuğu belirlenmiştir. Benzer mikro çatlaklar Şekil 4.44c'de de görülmektedir. Ayrıca x250 büyütmeli SEM görüntülerinde kompozitlerde kullanılan cam elyaflar da belirlenmiştir. Ksenomorf plaka biçimli portlanditlerin de boşlukların içinde ve gözenek yüzeylerine dik olarak yer aldığı bulunmuştur (Şekil 4.44d).

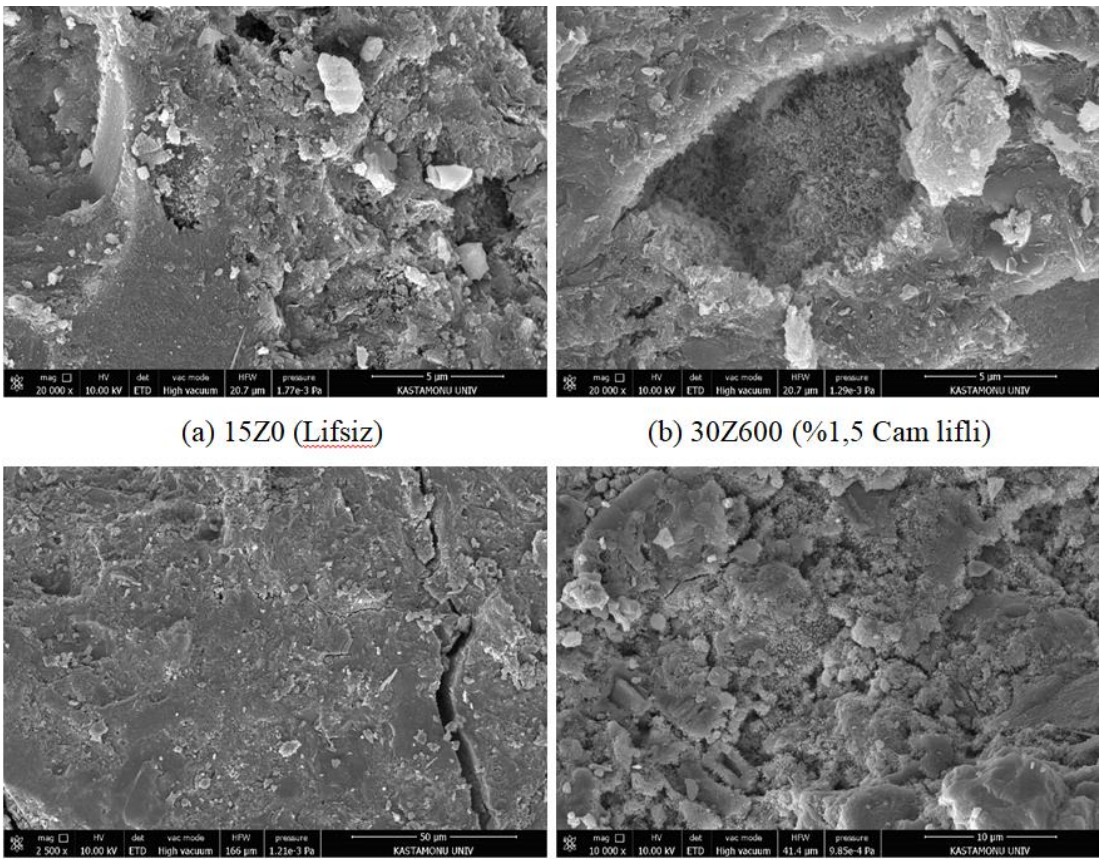


(a) 15Z0 (Lifsiz) (b) 30Z600 (%1,5 Cam lifli)

(c) 15Z800 (%3 Cam lifli) (d) Referans (Lifsiz)

Şekil 4.44 91 gün su kürüne tabi tutulmuş numunelerin mikroyapı görüntüleri

Şekil 4.45'de 101 gün 50 ºC'de hızlandırılmış eskitme süreci uygulanan karışımların mikroyapıları verilmiştir. Çimento esaslı kompozitlerin mikroyapı görüntülerinde CSH jellerinin varlığı gözlemlenmiştir. Ancak bazı karışımlarda CSH jellerinin süngerimsi bir yapıya sahip olduğu tespit edilmiştir. CSH jelindeki bu dönüşümün dayanım kaybına yol açtığı düşünülmektedir. CSH jellerinin süngerimsi bir yapıya dönüşmesi, lif ve matris arasındaki aderansı azaltmıştır. Pasta içerisinde mikro çatlakların da oluştuğu görülmektedir. Ayrıca pasta yüzeyinde beyaz lekelerin varlığı da görülmektedir. Bu lekelere eskitme sürecinde Na ve K tuzlarının neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.45 Eskitme sürecine tabi tutulmuş numunelerin mikroyapı görüntüleri

5. SONUÇLAR

Karışımlarda kullanılan zeolit içeriği arttıkça yayılma çapları azalmaktadır. Zeolitlerin kalsine edilmesi yayılma çaplarını arttırmaktadır. Ani kalsinasyon işlemi zeolit bünyesindeki boşlukları azaltarak zeolitin su tutma özelliğini azaltmaktadır. Cam lifi içeriğindeki artış beklenildiği gibi karışımların yayılma çapını azaltmaktadır. Özellikle %30 zeolitli karışımlarda cam lifinin %3 olması durumunda yayılma çapı 8 cm değerinin altına düşebilmektedir.

Zeolit içeriğindeki artış karışımların kuru birim hacim ağırlığını azaltmaktadır. Bu durum çimentoya göre özgül ağırlığı daha düşük olan zeolitin ikame oranı ile açıklanabilmektedir. Ancak cam lifinin artması durumunda bazı karışımların kuru birim hacim ağırlıkları artmaktadır. Cam lifi bağlayıcı miktarına göre katıldığı için hacimdeki cam lifi artışı birim hacim ağırlıkları arttırmıştır. Zeolit içeriğindeki artış karışımların su emme ve porozitelerini arttırmıştır. Su emme ve porozite değerlerinin genellikle işlenebilirlikten etkilendiği gözlenmiştir. Ayrıca cam lifi katkılı bazı karışımlarda su emme ve porozite değerleri azalmıştır. Bu durum cam lifinin mikro filler etkisi ile açıklanmıştır.

Cam lifinin artması sonucunda karışımların basınç ve eğilme dayanımları artmıştır. Cam lifi daha çok eğilme dayanımı üzerinde etkili olmuştur. Cam lifi kullanılan karışımların 91 günlük eğilme dayanımları yaklaşık 10-15 MPa arasında değişirken basınç dayanımları 50-75 MPa arasında değişmektedir. Zeolit içeriğindeki artış genellikle basınç dayanımlarını azaltmıştır. Ancak kalsine edilen zeolit ile üretilen karışımların basınç dayanımları doğal zeolitli karışımlara göre daha yüksek olmaktadır.

Zeolit içeriğindeki artış karışımların kuruma büzülmesi değerlerini arttırmıştır. Bu durum artan pasta içeriği ve azalan basınç dayanımı ile açıklanmıştır. Ani kalsinasyon ile elde edilen zeolitlerin karışımlarda kullanılması kuruma büzülmelerini nispeten azaltmıştır. Karışımlardaki cam lifinin artması durumunda ise kuruma büzülmeleri azalmıştır.

Karışımlardaki zeolit içeriği arttıkça karışımların genellikle su işleme derinliği artmıştır. Bu süreçte zeolitlerin bünyesel boşlukları da etkili olmuştur. Ancak bazı karışımlarda kullanılan cam lifleri su işleme derinliğini azaltmıştır. Cam lifleri kapiler boşluklar arasındaki bağlantıyı keserek su işleme derinliklerini azaltmıştır.

Eskitme süreci sonunda karışımlarda genellikle ağırlık kaybı oluşmuştur. Zeolit içeriğindeki artış genellikle ağırlık kaybını arttırmıştır. Karışımlarda kullanılan cam lifi ise genellikle ağırlık kayıplarını azaltmaktadır. Kalsine edilmiş zeolitli karışımlarda ikame oranı %15 olduğu takdirde ağırlık kayıpları oldukça azalmaktadır. Benzer durum basınç ve eğilme dayanımlarında da gözlenmiştir.

Karışımlarda zeolit içeriği arttıkça donma-çözülme sonrasındaki basınç ve eğilme dayanımları azalmaktadır. Ancak 91 günlük mekanik dayanımlarıyla kıyas yapıldığında kalsine edilen zeolitlerin %15 oranında olması durumunda dayanım kayıpları azalmaktadır. Çimento esaslı kompozitlerde cam lifinin %1,5 olması durumunda dayanım kayıpları daha az oluşmaktadır. İşlenebilirlik açısından %30 zeolit ve %3 cam lifi kullanımı donma-çözülme dayanıklılığını olumsuz etkileyebilmektedir. Ayrıca cam lifindeki artış genellikle donma-çözülme sonrasındaki ağırlık kayıplarını azaltmaktadır.

Islanma-kuruma etkisine maruz çimento esaslı kompozitlerde cam lifi ve zeolit içeriği arttıkça eğilme ve basınç dayanımları azalmaktadır. Ancak 75 ıslanma kuruma çevrimine maruz kompozitlerde 50 MPa ve üzeri basınç dayanımları elde edilmiştir. Özellikle kalsine edilmiş zeolitle üretilen karışımlarda ikame oranının %15 olması durumunda 55 MPa ve üzeri basınç dayanımları elde edilmiştir. Doğal zeolit ile üretilen karışımlarda daha fazla ağırlık kayıpları oluşmuştur.

Sonuç olarak; ani kalsinasyon işlemi ile elde edilen zeolitlerin doğal zeolitlere göre daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle 800 ºC'de kalsine edilen zeolitler çimento esaslı kompozitler için daha uygun olmaktadır. Yapılan çalışmada optimum zeolit oranının %15, cam lifi oranının %1,5 olduğu gözlenmiştir. Kalsine edilen zeolit ile çimento esaslı kompozitlerin durabilite özellikleri iyileştirilecektir. Ayrıca 1350-1450 ºC gibi yüksek sıcaklıkta pişirilen çimento yerine daha düşük

sıcaklıkta kalsine edilen zeolitin kullanılması CO_2 emisyonlarını da azaltacaktır. Kalsine edilmiş zeolit ile daha sürdürülebilir çimento esaslı kompozitlerin elde edilebileceği gösterilmiştir.

İleriki çalışmalarda kalsine zeolitlerin silis dumanı ve uçucu kül ile birlikte üçlü ve dörtlü karışımların hazırlanarak durabilite özellikleri incelenebilir. Daha düşük sıcaklıklarda uzun kalsinasyon işleminin zeolit yapısına etkisi analitik yöntemler ile incelenebilir. Kalsine zeolitlerin geopolimer üretiminde kullanım olanağı araştırılabilinir. Hafif beton yada blok üretiminde kalsine zeolitlerin sağladığı avantajlar belirlenebilir.

KAYNAKLAR

Abdollahnejad, Z., Mastali, M., Mastali, M., & Dalvand A. (2017). Comparative Study on the Effects of Recycled Glass–Fiber on Drying Shrinkage Rate and Mechanical Properties of the Self-Compacting Mortar and Fly Ash–Slag Geopolymer Mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering, 29*(8). doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001918.

Ahmad, S., Umar, A., & Masood A. (2017). Properties of Normal Concrete, Self-compacting Concrete and Glass Fibre-reinforced Self-compacting Concrete: An Experimental Study. *Procedia Engineering, 173*, 807-813. doi:10.1016/j.proeng.2016.12.106.

ASTM C150 / C150M - 20, (2020). Standard Specification for Portland Cement. ASTM, Pennsylvania. doi:10.1520/C0150_C0150M-20.

ASTM C348 - 21, (2021). Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars. ASTM, Pennsylvania. doi:10.1520/C0348-21.

ASTM C349 - 18, (2018). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure). ASTM, Pennsylvania. doi:10.1520/C0349-18.

ASTM C596 - 18, (2018). Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement. ASTM, Pennsylvania. doi:10.1520/C0596-18.

ASTM C642 - 13, (2013). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. ASTM, Pennsylvania. doi:10.1520/C0642-13.

ASTM C666 / C666M - 03, (2003). Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. ASTM, Pennsylvania. doi:10.1520/C0666_C0666M-03.

ASTM C1437 - 20, (2020). Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. ASTM, Pennsylvania. doi:10.1520/C1437-20.

ASTM C1585 - 20, (2020). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. ASTM, Pennsylvania. doi:10.1520/C1585-20.

Ateş, A., & Hardacre, C. (2012). The effect of various treatment conditions on natural zeolites: Ion exchange, acidic, thermal and steam treatments. *Journal of Colloid and Interface Science, 372*(1), 130-140. doi:10.1016/j.jcis.2012.01.017.

Ateş, A. (2016). Mechanical properties of sandy soils reinforced with cement and randomly distributed glass fibers (GRC). *Composites Part B: Engineering, 96,* 295-304. doi:10.1016/j.compositesb.2016.04.049.

Banthia, N., & Gupta, R. (2006). Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete. *Cement and Concrete Research, 36*(7), 1263-1267. doi: 10.1016/j.cemconres.2006.01.010.

Bilgin, Ö., & Kantarcı, S. (2018). Bigadiç (Balıkesir, Türkiye) civarında gözlenen höylandit/klinoptilolit zeolit oluşumlarının teknolojik özelliklerinin incelenmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 20*(1), 589-601. doi:10.25092/baunfbed.429367.

Bobde, S. P., Gandhe, G. R., & Tupe D. H. (2018). Performance of glass Fiber Reinforced Concrete. *International Journal Of Advance Research, Ideas And Innovations In Technology*, *4*(3), 984-988.

Caputo, D., Liguori, B., & Colella, C. (2008). Some Advance In Understanding The Puzzolanic Activity Of Zeolites: The Effect Of Zeolite Structure. *Cement & Concrete Composites*, (30), 455-462.

Cevahir, A. (2017). Glass Fibers. M. Ö. Seydibeyoğlu, A. K. Mohanty & M. Misra (Eds.), *Fiber Technology for Fiber-Reinforced Composites* (pp. 99-121). United Kingdom: Woodhead Publishing.

Chawla, K. K. (2001). Glass Fibers. K. H. J. Buschow, R. Cahn & P. Veyssiere (Eds.), *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* (pp. 3541-3545). United Kingdom: Pergamon.

Chawla, K. K. (2016). Glass Fibers. *Reference Module in Materials Scince and Materials Engineering.* doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.02325-0.

Cheng, C., He, J., Zhang, J., & Yang Y. (2019). Study on the time-dependent mechanical properties of glass fiber reinforced cement (GRC) with fly ash or slag. *Construction and Building Materials, 217,* 128-136. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.05.063.

Chinchillas-Chinchillas, M. J., Orozco-Carmona, V. M., Gaxiola, A., Alvarado-Beltrán, C. G., Pellegrini-Cervantes, M. J., Baldenebro-López, F. J., & Castro-Beltrán A. (2019). Evaluation of the mechanical properties, durability and drying shrinkage of the mortar reinforced with polyacrylonitrile microfibers. *Construction and Building Materials, 210,* 32-39. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.178.

Cuypers, H., Wastiels, J., Van Itterbeeck, P., De Bolster, E., Orlowsky, J., & Raupach M. (2006). Durability of glass fibre reinforced composites experimental methods and results. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 37*(2), 207-215. doi:10.1016/j.compositesa.2005.03.027.

Dawood, E. T., & Hamad, A. J. (2013). Effect of glass fibers on mechanical properties of structural lightweight foamed concrete(SLFC). *Thi-Qar University Journal for Engineering Sciences, 4*(3), 111-129.

Derradji, M., Wang, J., & Liu, W. (2018). *Phthalonitrile Resins and composites*. United States: William Andrew.

Dumlu, A. (2013). Cam Lifi Ve Atık Lastik Katkılı Alçı Kompozitlerin Mekanik Ve Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Samsun.

Durgun, M. Y. (2020). Effect of wetting-drying cycles on gypsum plasters containing ground basaltic pumice and polypropylene fibers. *Journal of Building Engineering, 32.* doi: 10.1016/j.jobe.2020.101801.

Ekincioğlu, Ö. (2003). Karma Lif İçeren Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı – Bir Optimum Tasarım. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.

Enfedaque, A., Paradela, L. S., & Sanchez-Galvez V. (2012). An alternative methodology to predict aging effects on the mechanical properties of glass fiber reinforced cements (GRC). *Construction and Building Materials, 27*(1), 425-431. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.025.

Eren, D. (2018). Puzolanların Puzolanik Aktivitelerinin Çimento Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*. İstanbul.

Ersoy, B. (2000). Klinoptilolit (Doğal Zeolit): Özellikleri, Kullanım Alanları Ve Türkiye Açısından Önemi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2*(1), 41-52.

Fenu, L., Forni, D., & Cadoni E. (2016). Dynamic behaviour of cement mortars reinforced with glass and basalt fibres. *Composites Part B: Engineering, 92,* 142-150. doi:10.1016/j.compositesb.2016.02.035.

Filho, S. L. M. R., Oliveira, P. R., Vieira, L. M. G., Panzera, T. H., Freire, R. T. S., & Scarpa F. (2018). Hybrid bio-composites reinforced with sisal-glass fibres and Portland cement particles: A statistical approach. *Composites Part B: Engineering, 149*, 58-65.

doi:10.1016/j.compositesb.2018.05.019.

Geçer, Ş. (2020). Kendiliğinden Yerleşen Harç Ve Betonlarda Çimento İkame Malzemesi Olarak Zeolitin Kullanılabilirliği. Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kocaeli.

Genoves, V., Riestra, C., Borrachero, M. V., Eiras, J., Kundu, T., & Paya J. (2015). Multimodal analysis of GRC ageing process using nonlinear impact resonance acoustic spectroscopy. *Composites Part B: Engineering, 76,* 105-111.
doi:10.1016/j.compositesb.2015.02.020.

Gülen, J., Zorbay, F., & Arslan, S. (2012). Zeolitler ve Kullanım Alanları. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 2*(1), 63-68.

Güngör, E. (2013). Karma Lifli Betonların Özelliklerinin Deneysel İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Balıkesir.

Habert, G., Choupay, N., Montel, J. M., Guillaume, D., & Escadeillas G. (2008). Effects of the secondary minerals of the natural pozzolans on their pozzolanic activity. *Cement and Concrete Research, 38*(7), 963-975.
doi:10.1016/j.cemconres.2008.02.005.

Hamad, A. J. (2017). Size and shape effect of specimen on the compressive strength of HPLWFC reinforced with glass fibres. *Journal of King Saud University – Enginering Sciences, 29*(4), 373-380.
doi:10.1016/j.jksues.2015.09.003.

Hannawi, K., Bian, H., Prince-Agbodjan, W., & Raghavan B. (2016). Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes. *Composites Part B: Engineering, 86,* 214-220.
doi:10.1016/j.compositesb.2015.09.059.

Hatipoğlu, Y. S. (2014). Sönmüş Kireç Ve Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerinin Toz Haline Getirilmiş Bayburt Taşları Ve Zeolit İle İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Bayburt.

Jiao, D., Shi, C., Yuan, Q., Zhu, D., & Schutter G. D. (2019). Effects of rotational shearing on rheological behavior of fresh mortar with short glass fiber. *Construction and Building Materials, 203,* 314-321.
doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.133.

Kampala, A., Horpibulsuk, S., Prongmanee, N., & Chinkulkijniwat A. (2014). Influence of Wet-Dry Cycles on Compressive Strength of Calcium Carbide Residue–Fly Ash Stabilized Clay. *Journal of Materials in Civil Engineering, 26*(4), 633-643.
doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000853.

Karaüç, E. (2008). Uçucu Kül ve Zeolitin Kendiliğinden Yerleşen Betonlara Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.* Sakarya.

Keleştemur, O., Yıldız, S., Gökçer, B., & Arıcı E. (2014). Statistical analysis for freeze–thaw resistance of cement mortars containing marble dust and glass fiber. *Materials & Design, 60,* 548-555. doi:10.1016/j.matdes.2014.04.013.

Köktürk, U. (1995). Zeolit Madenciliği ve Çevre Sağlığına Etkileri. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 293-301, İzmir.

Kuder, K. G., Ozyurt, N., Mu, E. B., & Shah S. P. (2007). Rheology of fiber-reinforced cementitious materials. *Cement and Concrete Research, 2*(37), 191-199. doi:10.1016/j.cemconres.2006.10.015.

Küçükyıldırım, E., & Uzal, B. (2014). Characteristics of Calcined Natural Zeolites For Use in High-Performance Puzzolan Blended Cements. *Construction and Building Materials*, (30), 229-234).

Kwan, W. H., Cheah, C. B., Ramli, M., & Chang K. Y. (2018). Alkali-resistant glass fiber reinforced high strength concrete in simulated aggressive environment. *Materiales de Construccion, 68*(329), e147. doi:10.3989/mc.2018.13216.

Lawler, J. S., Zampini, D., & Shah S. P. (2002). Permeability of Cracked Hybrid Fiber-Reinforced Mortar under Load. *Materials Journal, 99*(4), 379-385. doi: 10.14359/12220.

Liang, W., Cheng, J., Hu, Y., & Luo H. (2002). Improved properties of GRC composites using commercial E-glass fibers with new coatings. *Materials Research Bulletin, 37*(4), 641-646. doi:10.1016/S0025-5408(02)00700-6.

Liebig, E., & Althaus, E. (1998). Pozzolanic Activity of Volcanic Tuff and Suevite: Effects of Calcination. *Cement and Concrete Research, 28*(4), 567-575. doi:10.1016/S0008-8846(98)00024-6.

Liguori, B., Aprea, P., Gennaro, B., Lucolano, F., Colella, A., & Caputo, D. (2019). Puzzolanic Activity of Zeolites: The Role of Si/Al Ratio. *Materials,12*(24), 4231. doi:10.3390/ma12244231.

Litherland, K. L., Oakley, D. R. & Proctor B. A. (1981). The use of accelerated ageing procedures to predict the long term strength of GRC composites. *Cement and Concrete Research, 11*(3), 455-466. doi:10.1016/0008-8846(81)90117-4.

Maraşlı, M. (2019). Cam Lifi Takviyeli Betonlarda Olgunluk İndeksi Yöntemi İle Eğilme Ve Basınç Dayanımlarının Tahmin Modelinin Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Düzce.

Markiv, T., Sobol, K., Franus, M., & Franus W. (2016). Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite. *Archives of Civil and Mechanical Engineering, 16*(4), 554-562. doi:10.1016/j.acme.2016.03.013.

Martynova, E., & Cebulla, H. (2018). Glass Fibers. B. Mahltig & Y. Kyosev (Eds.), *Inorganic and Composite Fibers* (pp. 131-163). United Kingdom: Woodhead Publishing.

Nagrockiene, D., & Girskas, G. (2016). Research into the properties of concrete modified with natural zeolite addition. *Construction and Building Materials, 113*, 964-969. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.03.133.

Narasimhulu, K., Gettu, R., & Babu K. G. (2014). Beneficiation of Natural Zeolite through Flash Calcination for Its Use as a Mineral Admixture in Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering, 26*(1), 24-33. doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000800.

Oltulu, M., & Oktan, H. (2019). Farklı Görünüm Oranlı Bazalt Liflerin Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9*(2), 870-879. doi:10.21597/jist.450272.

Otuzbir, C. (2020). Çelik Ve Cam Lifi Polimer Donatılı Ultra Yüksek Performanslı Betonların Eğilme Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İzmir.

Özdemir, D., Mecit, H. D., Seventekin, N., & Öktem, T. (2006). Cam Lifleri. *Tekstil ve Konfeksiyon, 1*, 281-287.

Özkırım, İ., & Yörükoğulları, E. (2005). Manisa-Gördes Doğal Zeolitinin (Klinoptilolit) Bet İzoterm Karakteristikleri. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,* (9), 65-70.

Perraki, Th., Kakali, G., & Kontori E. (2002). Characterization and pozzolanic activity of thermally treated zeolite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 82*, 109-113. doi:10.1007/s10973-005-0849-5.

Purnell, P., Short, N. R., Page, C. L., & Majumdar A. J. (2000). Microstructural observations in new matrix glass fibre reinforced cement. *Cement and Concrete Research,30*(11), 1747-1753. doi:10.1016/S0008-8846(00)00407-5.

Purnell, P., & Beddows, J. (2005). Durability and simulated ageing of new matrix glass fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites, 27*(9-10), 875-884. doi:10.1016/j.cemconcomp.2005.04.002.

Qi, B., Gao, J., Chen, F., & Shen D. (2018). Chloride penetration into recycled aggregate concrete subjected to wetting–drying cycles and flexural loading. *Construction and Building Materials, 174*, 130-137. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.122.

Ramezanianpour, A. A., Esmaeili, M., Ghahari, S. A., & Najafi M. H. (2013). Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers. *Construction and Building Materials, 44*, 411-418. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.02.076.

Richardson, A. E., Coventry, K. A., & Wilkinson S. (2012). Freeze/thaw durability of concrete with synthetic fibre additions. *Cold Regions Science and Technology, 83-84,* 49-56. doi:10.1016/j.coldregions.2012.06.006.

Sarı, M. (2013). Farklı Tipteki Liflerin Betonun Mekanik Davranışına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İstanbul.

Sarıkaya, H. (2006). Zeolit Katkılı Betonların Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Isparta.

Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., & Naveen J. (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites – a review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites, 33*(13), 1258-1275. doi:10.1177/0731684414530790.

Seraj, S., Ferron, R.D., & Juenger M. C. G. (2016). Calcining natural zeolites to improve their effect on cementitious mixture workability. *Cement and Concrete Research, 85,* 102-110. doi:10.1016/j.cemconres.2016.04.002.

Shioya, M., & Kikutani, T. (2014). Synthetic Textile Fibres: Non-polymer Fibres.R. Sinclair (Eds.), *Textile and Fashion* (pp. 139-155). United Kingdom: Woodhead Publishing.

Shrivastava, A. (2018). *Introduction to Plastics Engineering*. United States: William Andrew.

Soroushian, P., & Elzafraney, M. (2004). Damage effects on concrete performance and microstructure. *Cement and Concrete Composites, 26*(7), 853-859. doi:10.1016/j.cemconcomp.2003.05.001.

Soylu, M., & Gökkuş, Ö. (2017). Türkiye'deki Doğal Zeolitler ve İyon Değişimi Uygulamaları. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6*(1), 11-20.

Teja, G. S., Ravella, D. P., & Rao V. C. S. (2021). Studies on self-curing self-compacting concretes containing zeolite admixture. *Materialstoday: Proceedings, 43*(2), 2355-2360. doi:10.1016/j.matpr.2021.01.682.

Tokat, S. (2019). Gördes (Manisa) Zeolit Ocaklarının Kimyasal Bileşenlerinin XRF Spektrometrik Yöntem İle Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Kastamonu.

Topçu, İ. B., & Canbaz, M. (2007). Effect of different fibers on the mechanical properties of concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials, 21*(7), 1486-1491. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.06.026.

Turan, F. (2018). Doğal Zeolitlerin Özelliklerini Geliştirmek İçin Entegre Bir Yaklaşım. Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. İzmir.

Vımalan, P. M. A. S., & Lavanya, G. (2021). Influence of calcined zeolite on physical-mechanical propertıes of self compacting concrete containing glass powder. *Romanian Journal of Materials, 51*(1), 25-32.

Voigt, T., Bui, V. K., & Shah S. P. (2004). Drying Shrinkage of Concrete Reinforced with Fibers and Welded-Wire Fabric. *Materials Journal, 101*(3), 233-241. doi: 10.14359/13119.

Xiaochun, Q., Xiaoming, L., & Xiaopei C. (2017). The applicability of alkaline-resistant glass fiber in cement mortar of road pavement: Corrosion mechanism and performance analysis. *International Journal of Pavement Research and Technology, 10*(6), 536-544. doi:10.1016/j.ijprt.2017.06.003.

Xuan, Z., & Jun, Z. (2021). Influence of zeolite addition on mechanical performance and shrinkage of high strength Engineered Cementitious Composites. *Journal of Building Engineering, 36*(April). doi:10.1016/j.jobe.2020.102124

Xue, G., Yilmaz, E., Song, W., & Cao S. (2019). Analysis of internal structure behavior of fiber reinforced cement-tailings matrix composites through X-ray computed tomography. *Composites Part B: Engineering, 175*(107091). doi:10.1016/j.compositesb.2019.107091.

Yazıcıoğlu, Ö. F. (2016). Çimento Ve Beton Endüstrisinin Sürdürülebilir Üretimlerinde Doğal Zeolit(Analsim)'in Puzolanik Katkı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. *Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Ordu.

Yıldırım, Y. F. (2019). Cam Lifi Ve Cam Tozunun Polimer Betonların Mekanik Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*. Sakarya.

Yörükoğulları, E. (1985). Güneş Enerjisinin Doğal Zeolite Depolanması. Doktora Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*. Eskişehir.

Yuan, Z., & Jia, Y. (2021). Mechanical properties and microstructure of glass fiber and polypropylene fiber reinforced concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials, 266*, 1-13. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121048.

Zhang, J., Wang, Q., & Zhang J. (2017). Shrinkage of internal cured high strength engineered cementitious composite with pre-wetted sand-like zeolite. *Construction and Building Materials, 134*,664-672. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.182.

Zheng, X., Zhang, J., Ding, X., Chu, H., & Zhang J. (2021). Frost resistance of internal curing concrete with calcined natural zeolite particles. *Construction and Building Materials, 288.* doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123062.

URL-1. 15 Different Types of Fiberglass, https://www.homestratosphere.com/types-of-fiberglass, Erişim Tarihi: 20.02.2021.

URL-2. The Properties of Glass Fibre, https://www.pfh-university.com/blog/the-properties-of-glass-fibre.html, Erişim tarihi: 20/02/2021.

URL-3. MEC Maden, https://www.mecmaden.com, Erişim tarihi: 17.03.2021.