



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÇİMENTO ESASLI LİFLİ KOMPOZİTLERDE YÜKSEK
SICAKLIK VE SÜLFAT ETKİSİ**

Selman ÇELİK

**Ağustos-2025
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ÇİMENTO ESASLI LİFLİ KOMPOZİTLERDE YÜKSEK
SICAKLIK VE SÜLFAT ETKİSİ**

Selman ÇELİK

**Danışman
Doç. Dr. Serhat DEMİRHAN**

Diğer Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Ersin AYHAN

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep ÜNSAL ASLAN

**Ağustos-2025
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Selman ÇELİK tarafından hazırlanan “Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerde Yüksek Sıcaklık ve Sülfat Etkisi” adlı tez çalışması 07/08/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Ersin AYHAN

.....

Danışman

Doç. Dr. Serhat DEMİRHAN

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep ÜNSAL ASLAN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Selman ÇELİK
Tarih: 07/08/2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇİMENTO ESASLI LİFLİ KOMPOZİTLERDE YÜKSEK SICAKLIK VE SÜLFAT ETKİSİ

Selman ÇELİK

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Serhat DEMİRHAN

2025, 98 Sayfa

Bu tez çalışmasında, çimento esaslı lifli kompozitlerin 600 °C'ye kadar çıkan yüksek sıcaklık ve sülfat etkisi altındaki mekanik ve mikroyapısal davranışları kapsamlı biçimde incelenmiştir. Deneysel süreçte, farklı lif türleri (çelik ve polipropilen), liflerin narinlik oranları, mineral katkı olarak silis dumanı kullanımı ile üç farklı kür rejimi (standart su, sodyum sülfat ve potasyum sülfat çözeltileri) dikkate alınmıştır. Kompozit numuneler, yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra 7, 28 ve 90 günlük kür yaşlarında test edilerek performansları değerlendirilmiştir. Basınç dayanımı testleri, özellikle yüksek narinlik oranına sahip 16 mikron çapındaki BF16 kodlu ÇELK kullanıldığı karışımlarda, yüksek sıcaklık sonrası en iyi mekanik dayanımın sağlandığını ortaya koymuştur. Buna karşılık, PP lif katkılı karışımlar, düşük ergime sıcaklıkları nedeniyle yüksek sıcaklık altında yapısal bütünlüklerini koruyamamış ve bu da dayanım kayıplarına yol açmıştır. Silis dumanı katkısının ise, hem puzolanik reaksiyonları teşvik etmesi hem de gözenekliliği azaltarak daha yoğun bir yapı kazandırması sayesinde tüm çevresel koşullarda dayanımı artırıcı etki gösterdiği tespit edilmiştir. Özellikle potasyum sülfat çözeltisinde kürlenmiş numunelerde, sülfatlı ortamlara kıyasla daha olumlu mekanik performans elde edilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri, sülfatlı ortamlarda, özellikle Na₂SO₄ çözeltisinde, iğnemi etrenjit oluşumlarının ve mikro çatlak gelişimlerinin daha belirgin olduğunu göstermiştir. Silis dumanı katkısının, portlandit miktarını azaltarak sülfat iyonlarının zararlı reaksiyonlara girmesini sınırladığı ve bu sayede mikroyapısal bozulmaları önemli ölçüde engellediği gözlemlenmiştir. BF16-SF ve PP30-SF gibi silis dumanı katkılı karışımlarda, daha homojen C-S-H matrisleri ve sınırlı çatlak oluşumu tespit edilmiştir. Ultrases geçiş hızı (UPV) ölçümleri, malzemenin içyapısal özelliklerinin zamanla ve çevresel faktörlere bağlı olarak değiştiğini ortaya koymuştur. PP lif katkılı karışımlarda, yüksek sıcaklık etkisiyle liflerin erimesinden kaynaklanan boşluk oluşumu, UPV değişimlerinin en yüksek düzeyde gerçekleşmesine neden olmuştur. Öte yandan, silis dumanı katkılı sistemlerde zamanla gelişen yoğun mikroyapı, puzolanik reaksiyonların da etkisiyle UPV değişimini olumlu yönde etkilemiştir. Sülfatlı kür koşullarında ise ikincil ürün oluşumu bu değişimi daha da artırmıştır. Elde edilen veriler, yangın ve kimyasal saldırı gibi zorlayıcı çevresel etkiler altında performansını koruyabilen, dayanıklı ve optimize edilmiş çimento esaslı sistemlerin geliştirilmesi açısından önemli bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çimento esaslı lifli kompozitler, yüksek sıcaklık, sülfat direnci, UPV

ABSTRACT

MASTER THESIS

EFFECT OF HIGH TEMPERATURE AND SULFATE ATTACK ON CEMENT-BASED FIBER-REINFORCED COMPOSITES

Selman ÇELİK

Batman University Graduate Education Institute

Civil Engineering Department of Science

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Serhat DEMİRHAN

2025, 98 Pages

In this thesis, the mechanical and microstructural behavior of fiber-reinforced cement-based composites exposed to elevated temperatures up to 600 °C and sulfate attack was comprehensively investigated. The experimental study considered various fiber types (steel and polypropylene), fiber slenderness ratios, the use of silica fume as a mineral admixture, and three different curing regimes (standard water, sodium sulfate, and potassium sulfate solutions). After being subjected to high temperature, the composite specimens were tested at 7, 28, and 90 days of curing to evaluate their performance. Compressive strength tests revealed that mixtures incorporating steel fibers, particularly those with high slenderness and 16-micron diameter (BF16), demonstrated the best mechanical performance after high-temperature exposure. In contrast, polypropylene fiber-reinforced composites showed significant strength loss due to their low melting point, which led to degradation under thermal stress. Silica fume contributed positively to strength development under all environmental conditions by enhancing pozzolanic activity and reducing porosity, thus promoting a denser microstructure. Notably, specimens cured in potassium sulfate solution exhibited better mechanical performance compared to those in other sulfate environments. Scanning electron microscopy (SEM) analyses showed that in sulfate-rich conditions, especially in Na₂SO₄ solution, needle-like ettringite formations and microcrack development were more prominent. The presence of silica fume was found to mitigate these effects by reducing portlandite content, thereby limiting harmful reactions with sulfate ions and preserving microstructural integrity. In silica fume-modified mixtures such as BF16-SF and PP30-SF, a more uniform C-S-H matrix and fewer cracks were observed. Ultrasonic pulse velocity (UPV) measurements indicated that internal structural characteristics of the material evolved over time and were influenced by environmental factors. In composites with polypropylene fibers, the melting of fibers under high temperature led to void formation, resulting in the highest levels of UPV variation. Conversely, in mixtures containing silica fume, the densifying effect of ongoing pozzolanic reactions improved UPV outcomes over time. Sulfate curing conditions also enhanced UPV changes due to the formation of secondary hydration products. Overall, the findings of this study provide valuable insights for the development of durable and high-performance cement-based systems capable of maintaining structural integrity under combined exposure to fire and chemical attack.

Keywords: Cement-based fiber-reinforced composites, high temperature, sulfate resistance. UPV

ÖN SÖZ

Yüksek lisans tez konumun en evvel fikirsel altyapısını ve tez konusu belirlendikten sonra da hem editoryal hem de teknik olarak tezimin her aşamasında desteğini esirgemeyen ve her aşamada yol gösterici önerileriyle bilgi ve tecrübelerini aktararak her zaman desteğini aldığım tez danışmanım, sayın Doç. Dr. Serhat DEMİRHAN en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tezin daha da olgunlaşması ve literatüre hedeflenen katkıların sunulması adına çok kıymetli vakitlerini ayırarak sabırla tezimi okuyup değerlendiren ve teze çok önemli yorumlar düşen tez jüri üyeleri Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ersin AYHAN ve Sayın Dr. Öğr. Üyesi Zeynep ÜNSAL ASLAN'a teşekkürü borç bilirim.

Bu çalışmanın ilk gününden hatta ders aşamasından bu yana tezin her aşamasının şekillenmesinde beraber omuz omuza verdiğimiz, akademik bilgi ve fikir paylaşımıyla katkı sağlayan değerli arkadaşım ve meslektaşım Yüksek İnşaat Mühendisi Muhammet Cüneyt ALĞAN'a da ayrıca teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, Teknik Bilimler MYO'nun inşaat laboratuvarının imkânlarını yükek sıcaklık etkisinin incelendiği süreçte bizlere sunan Sayın Öğr. Gör. Necim KAYA'ya ve ayrıca akademik destek ve yönlendirmesinden dolayı Yüksek İnşaat Mühendisi Sayın Mem ÇİFTÇİ'ye, teknik imkânlarından yararlandığımız Batman Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi (BÜMER) Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'na teşekkürü borç bilirim.

Bu yüksek lisans tez çalışmasının her aşamasında, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman yanımda olan kıymetli babam Ali ÇELİK'e ve fedakârlıkları, duaları ve sonsuz sevgileriyle bana güç veren sevgili annem Adle ÇELİK'e en derin şükranlarımı sunarım. Hayatım boyunca örnek aldığım, bilgi ve tecrübeleriyle her zaman yolumu aydınlatan değerli abim Öğr. Gör. Murat ÇELİK'e, aynı zamanda bu süreçte moral ve motivasyon kaynağım olan diğer kardeşlerim Fatma ÇELİK, Osman ÇELİK ve Meryem ÇELİK'e gönülden teşekkür ederim. Desteğiyle bu sürecin daha anlamlı ve verimli geçmesini sağlayan, çalışmamın her aşamasında bana desteğini esirgemeyen başta değerli eşim Evin ÇELİK olmak üzere tüm sevdiklerime teşekkür eder, bu tez çalışmasının bilimsel katkı sağlamasını temenni ederim.

Selman ÇELİK
BATMAN-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	viii
ABSTRACT.....	ix
ÖN SÖZ	x
İÇİNDEKİLER	xi
SİMGELER ve KISALTMALAR.....	xiii
TABLolar	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Genel Özellikleri	3
2.2. Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Yapısı ve Kullanım Alanları	8
2.3. Lif Türleri ve Özellikleri.....	11
2.4. Farklı Lif Türlerinin Etkileri.....	15
2.4.1. Farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip lif türlerinin lifli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine etkileri	15
2.4.3. Farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip lif türlerinin lifli kompozitlerin dayanıklılık özellikleri üzerine etkileri	18
2.5. Silis Dumanı	21
2.5.1. Silis dumanının yapı malzemelerinde kullanımı	26
2.5.2. Silis dumanının çimento ile ikamesinin etkileri	30
2.5.3. Çimento esaslı lifli kompozitlerde yüksek sıcaklık etkisi	31
2.5.4. Yüksek sıcaklık uygulamasının çimento esaslı lifli kompozitlerin dayanıklılığı üzerine etkileri	33
2.5.5. Çimento esaslı lifli kompozitlerde sülfat hücumu	35
2.5.6. Farklı sülfat türlerinin çimento esaslı lifli kompozitlerin dayanıklılığına etkileri	38
2.6. İkili Dayanıklılık Problemleri.....	40
2.6.1. Yüksek sıcaklık ve sülfat hücumunun ikili etkisi ve lifli kompozitlerin davranışı.....	42
3. YÖNTEM ve YÖNTEM.....	45
3.1. Materyal	45
3.1.1. Çimento.....	45
3.1.2. Silis dumanı	46
3.1.3. Agrega.....	46
3.1.4. Çelik lif	47
3.1.5. Polipropilen lif	48
3.1.6. Kimyasal katkı	50
3.1.7. Su	50

3.1.8. Sülfat.....	51
3.1.8.1. Sodyum sülfat	51
3.1.8.2. Potasyum sülfat.....	52
3.2. Deneysel Çalışma	53
3.2.1. Numunelerin hazırlanması.....	53
3.2.2. Numunelere uygulanan test yöntemleri	59
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	62
4.1. Basınç Dayanımı.....	62
4.2. SEM Görüntüsü	67
4.3. Ultrases Dalgası Geçiş Hızı (UPV)	81
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	84
5.1. Sonuçlar	84
5.2. Öneriler	84
KAYNAKLAR	87

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler

CH : Kalsiyum Hidroksit
CaO: Kalsiyum Oksit
Al₂O₃: Alüminyum Oksit
SiO₂ : Silisyum Dioksit
C-S-H : Kalsiyum silikat hidrat
C₃A: Trikalsiyum alüminat
Na₂SO₄ : Sodyum Sülfat
K₂SO₄: Potasyum Sülfat
MgSO₄ : Magnezyum sülfat
CEM I: Portland Çimentosu
K⁺ : Potasyum iyonu
Na⁺ : Sodyum iyonu

Kısaltmalar

ÇELK : Çimento esaslı lifli kompozitler
ECC : Tasarlanmış çimento esaslı kompozitler
W/C : su / çimento oranı
RCC : Silindirle sıkıştırılmış beton
SIFCON : Bulamaç infiltrasyonlu lif beton
UPV : Ultrases dalga geçiş hızı
BF16 : 16 mikron çaplı çelik lif
BF30 : 30 mikron çaplı çelik lif
BF35 : 35 mikron çaplı çelik lif
PP : Polipropilen lif
N : CEM 1 42,5 N Normal Portland Çimento
SEM: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SF/SD : Silis dumanı

TABLÖLAR

Çizelge 2.1. Farklı lif türlerine ait fiziksel özellikler

Çizelge 3.1. Normal portland çimentosu ve silis dumanı fiziksel özellikleri ve kimyasal kompozisyonları

Çizelge 3.2. Kum elek analizi sonuçları

Çizelge 3.3. Propilen lifin özellikleri

Çizelge 3.4. Deneyde kullanılan yeni nesil hiper akışkanlaştırıcı ait teknik özellikler

Çizelge 3.5. Şebeke suyuna ait özellikler

Çizelge 3.6. Deneyde kullanılan sodyum sülfata ait teknik özellikler

Çizelge 3.7. Deneyde kullanılan potasyum sülfata ait teknik özellikler

Çizelge 3.8. Karışım oranları

Çizelge 3.9. UPV değer aralığı



1. GİRİŞ

Günümüzde inşaat sektöründe en çok kullanılan yapı malzemelerinden biri olan beton, bazı önemli dezavantajlara sahiptir. Özellikle düşük çekme mukavemeti ve kırılğan yapısı nedeniyle çatlamaya meyillidir, bu da yapısal zayıflıklara yol açabilir. Bu sınırlamaları gidermek amacıyla lif takviyeli çimento esaslı kompozitler geliştirilmiştir. Çelik veya polimer liflerin betona eklenmesiyle oluşan bu kompozitler, yüksek dayanım, süneklik ve tokluk özellikleriyle öne çıkmaktadır. Çimento esaslı lifli kompozitler (ÇELK), dayanıklılık, hafiflik ve kolay şekillendirilebilirlik gibi avantajları sayesinde betonarme ve çelik yapılara alternatif olabilecek bir malzeme grubu haline gelmiştir. Ancak bu malzemelerin yangın (yüksek sıcaklık) ve sülfat saldırısı gibi agresif çevresel etkilere maruz kalması durumunda performanslarında ciddi bozulmalar gözlenebilmektedir. Özellikle enerji santralleri, tüneller, atık yakma tesisleri, kimyasal fabrikalar veya deniz yapıları gibi zorlu ortamlarda kullanılan betonarme elemanlar için yangın ve sülfat kaynaklı hasarlar kritik bir sorun teşkil etmektedir. Bu nedenle, betonarme yapıların bu tür ekstrem koşullara karşı dayanımının artırılması büyük önem taşımaktadır.

1.1. Amaç ve Kapsam

Çimento esaslı lif takviyeli kompozitlerin yüksek sıcaklık (yangın) ve agresif sülfat ortamına maruz kalmaları durumunda dayanım ve dayanıklılık davranışlarını deneysel olarak incelemek bu çalışmanın temel amacıdır. Özellikle farklı lif tipleri (çelik ve polipropilen lifler) ile silis dumanı mineral katkısının, yüksek sıcaklık ve sülfat etkisine karşı malzeme performansına etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Böylece yangın ve kimyasal saldırıların bir arada etkilediği koşullarda kompozit malzemelerin davranışını anlamak ve etkili malzeme tasarım kriterleri geliştirmek hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında çeşitli karışım parametrelerine sahip lifli beton numuneleri hazırlanmış ve planlı bir deney programı uygulanmıştır. Beton karışımlarında %1 hacim oranında çelik lif (farklı boyutlarda: ör. 16 mikron ve 35 mikron çaplarında olup tüm lifler 6 mm uzunluğundadır) ve %1 oranlarında polipropilen lif kullanılmış; ayrıca çimentonun bir kısmı %10 oranında silis dumanı ile ikame edilerek mineral katkı etkisi dahil edilmiştir. Taze harçlar, liflerin homojen dağılması için yeni nesil hiper akışkanlaştırıcı

katkı ilavesiyle üretilmiştir. Numuneler standart kürde 3 gün bekledikten sonra yüksek sıcaklığa maruz bırakıldı ve test edileceği kür yaşına kadar su, sodyum sülfat ve potasyum sülfatta bırakıldı. Maruziyet sürelerinin sonunda numunelerin ultrases geçiş hızı (UPV) ölçümleri yapılarak iç hasar düzeyi izlenmiş ve basınç dayanımı testleri gerçekleştirilerek mekanik performanstaki değişimler nicel olarak belirlenmiştir. Ayrıca seçilen numunelerin mikroyapı incelemeleri için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizi uygulanmış; yüksek sıcaklık ve sülfat etkisiyle oluşan mikro çatlaklar, sülfat kristalleri (etrenjit vs.) ve genel doku değişimleri görüntülenmiştir. Bu kapsamlı deneysel çalışma ile her bir değişkenin (lif türü, lif oranı, silis dumanı varlığı, sıcaklık seviyesi, sülfat türü ve maruziyet süresi) betonun performansına etkisi ayrı ayrı ve birlikte değerlendirilebilmiştir.

Bu tez çalışması, çoklu çevresel etkiler altında lif takviyeli betonların davranışını incelemesi bakımından özgün bir konuma sahiptir. Literatürde çelik ve polipropilen liflerin birlikte kullanıldığı ve silis dumanı ile takviye edilmiş çimento esaslı kompozitlerin ardışık yangın ve sülfat saldırısı koşullarındaki performansı detaylı biçimde analiz edilmiştir. Yangın sonrası betonlarda meydana gelen mikroyapısal zayıflıkların sülfat penetrasyonuna etkisi ve bunu engellemek üzere lif ve mineral katkı kullanımının getirdiği avantajlar bütüncül olarak ortaya konmuştur. Bu yönüyle çalışma, yüksek sıcaklık ve kimyasal saldırıların birleşik etkilerine karşı dayanıklı beton malzemelerin geliştirilmesi noktasında literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Elde edilen bulgular, betonarme yapıların yangın ve sülfat gibi birden fazla zararlı etkene maruz kaldığı durumlarda nasıl bir performans sergilediğine dair mühendislik literatürüne yeni bilgiler kazandırmaktadır. Özellikle yangın geçirmiş beton elemanların sülfatlı ortamlarda güvenli bir şekilde hizmet vermeye devam edip edemeyeceği sorusuna ışık tutulmuştur. Sonuçlar, yüksek sıcaklık nedeniyle zarar görmüş betonun sülfat saldırısına karşı davranışını sayısal verilerle ortaya koyarak, bu tür çoklu tehdit altındaki yapılar için malzeme seçimi, tasarımı ve bakım/onarım stratejileri geliştirilmesine bilimsel temel sağlamaktadır. Tezin çıktıları, enerji santralleri, petrokimya tesisleri, tüneller, köprüler ve deniz yapıları gibi hem yangın riski hem de kimyasal saldırı riski barındıran ortamlarda, lif takviyeli dayanıklı çimento esaslı malzeme tasarım ve uygulamalarına yönelik öneriler sunacaktır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Genel Özellikleri

Beton; çimento, su, kum ve çakıl gibi agregaların karışımından oluşan, yüksek mukavemetli yapı malzemesidir. Kürlenme süreci boyunca kimyasal reaksiyonlar sonucu sertleşir ve taşıyıcı yapı elemanları olarak işlev görür. Beton, yapı malzemeleri arasında yaygın olarak kullanılan bir komponenttir ve sunduğu dayanıklılık, maliyet etkinliği ve formabilite gibi üstün özelliklerle bilinir (Güçlüer, vd., 2017). Betonun maliyet etkinliği, düşük ham madde maliyeti ve kolay bulunabilirliği ile sağlanır. Dayanıklılığı, zorlu çevresel koşullara karşı uzun süreli direnç göstermesini sağlar, bu da onu köprüler, binalar ve diğer altyapı projeleri için ideal bir malzeme yapar. Formabilite özelliği, betonun taze haldeyken herhangi bir forma dökülebilir olmasını ifade eder, bu da karmaşık geometrilerin ve tasarımların kolaylıkla üretilmesine olanak tanır (Dedeoğlu, 2010).

Betonun çekme ve eğilme performansındaki sınırlamalar, betonun zayıf yönlerindendir. Betonun çekme mukavemeti, özellikle yüksek gerilim altında kırılğan davranış sergiler, bu da çatlamlara ve yapısal zayıflıklara yol açabilir. Eğilme performansı da sınırlıdır; uzun açıklıklı köprüler veya yüksek binalar gibi yapılar için ek destek gerektirebilir. Bu olumsuz yönler, özel beton türleri olan lifli kompozitlerin geliştirilmesini zorunlu kılar. Lifli kompozitler, tasarımlarında geleneksel betona kıyasla farklı bileşenler kullanılarak geliştirilen, çimento matrisinin içine entegre edilmiş lifler sayesinde yüksek performans sergiler (Ghafoori, 2021).

Çimentolu kompozitlerde kullanılan çeşitli lif türleri, yapısal ve fonksiyonel özellikler üzerinde önemli etkilere sahiptir. Farklı lif malzemeler, tek başlarına veya karışım halinde kullanıldıklarında, özel özelliklerle donatılmış gelişmiş kompozitlerin üretilmesinde kritik rol oynar. Bu çok yönlülük, liflerin malzeme özelliklerine ve farklı liflerin birleşiminden ortaya çıkan sinerjiye bağlı olarak, kompozitlerin çeşitli mekanik özelliklerle donatılmasını sağlar. Çelik lifler, çekme mukavemetini artırma potansiyeli nedeniyle tercih edilirken; polimerik lifler, süneklik ve çatlak direncini artırma özellikleri sayesinde öne çıkar. Liflerin bu kombinasyon kabiliyeti, sadece daha güçlü değil, aynı zamanda belirli inşaat ihtiyaçlarına uyum sağlayabilen kompozitlerin mühendisliğini mümkün kılar (Türk ve Kına, 2017).

Lifli kompozitlerde çimento matrisi, lifleri bir arada tutan temel bileşen olarak işlev görür ve kompozitin genel performansında merkezi bir role sahiptir. Matrisin önemi, lifler arasındaki gerilimi aktarabilme ve kompozit boyunca bu gerilimi dağıtabilme yeteneğinden kaynaklanır, bu da mukavemeti artırır ve çatlakların yayılmasını önler. Matris ile lifler arasındaki uyum, kompozitin süneklik, tokluk ve çatlak direnci gibi mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Matrisin mukavemeti, liflerin türü ve geometrisi ile birlikte, yük dağılımının verimliliğini ve stres transferinin etkinliğini belirler. Matris ve lifler arasındaki bu etkileşim, çeşitli yükleme koşulları altında kompozitin performansını optimize etme konusunda hayati önem taşır (Yastımoğlu ve Özkan, 2017).

Çimento bazlı lifli kompozitler ve uygulamaları, çeşitli inşaat ihtiyaçlarını karşılayabilen geniş bir özellik yelpazesi sergiler. Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (ECC) gibi materyaller, sünek davranışları ve çatlamaya karşı dirençleri ile tanınır; bu özellikler, geleneksel betona kıyasla önemli ölçüde üstündür. ECC ve benzeri kompozitlerin gelişmiş performansı, liflerin dikkatli seçimi ve çimento matrisi ile olan mekanik uyumlarına bağlıdır. Bu tür kompozitler, sismik dirençli yapılar ve yüksek gerilim koşullarına maruz kalan altyapılar gibi, yüksek süneklik ve çatlak direnci gerektiren uygulamalar için idealdir. Özel özelliklere sahip kompozitlerin geliştirilmesi, daha esnek ve dayanıklı yapıların tasarlanmasına olanak tanır ve inşaat sektöründe yeni ufuklar açar (Gödek ve ark., 2016).

Çimento bazlı lifli kompozitlerin çekme mukavemeti ve dayanıklılığı, çeşitli yapısal uygulamalarda uygulanabilirliklerini belirlemede büyük bir öneme sahiptir. Doğası gereği kırılğan olan beton gibi çimento esaslı malzemeler, çekme dayanımı eşiğine ulaşıldığında mikroyapısal çatlakların oluşumuna yol açar. Bu kırılğanlık ve sonrasında meydana gelen çatlak oluşumu, malzemelerin yapısal bileşenlerdeki dayanıklılığını ve uzun vadeli performansını önemli ölçüde etkiler. Çimento matrisi içine liflerin entegrasyonu, hem çekme mukavemetini hem de dayanıklılığı artırdığı gözlemlenmiştir. Lifler, çatlaklar arasında köprü görevi görerek stresi taşıyan bir mekanizma sağlar ve çatlakların yayılmasını engeller, böylece kompozitin genel dayanıklılığını artırır. Çekme mukavemeti ve dayanıklılıktaki bu iyileştirmeler, daha dayanıklı ve uzun ömürlü inşaat malzemelerinin geliştirilmesi açısından büyük önem taşır (Türk ve Kına, 2017).

Darbe direnci ve tokluk, dinamik yüklere veya darbe koşullarına maruz kalan yapılarda kullanılan malzemeler için kritik özelliklerdir. Çimento esaslı lifli kompozitler, geleneksel betona kıyasla gelişmiş darbe direnci ve tokluğuyla dikkat çeker. Liflerin

çimentolu matris içine dahil edilmesi, malzemenin enerjiyi emme ve dağıtma kapasitesini önemli ölçüde artırır, bu da artan tokluğa ve darbe direncine doğrudan katkı sağlar. Bu özellikler, endüstriyel zeminler, kaldırımlar ve koruyucu yapılar gibi, ani darbelere dayanma yeteneğinin gerekli olduğu uygulamalarda özellikle önemlidir. Mühendisler, kompozit içindeki lif içeriğini ve dağılımını optimize ederek, malzemenin darbe direncini ve dayanıklılığını özel gereksinimleri karşılayacak şekilde uyarlayabilir ve böylece çimento bazlı lifli kompozitlerin uygulama aralığını genişletebilirler (Albayrak ve Kaman, 2019).

Eğilme mukavemeti ve elastisite modülü, çimento esaslı lifli kompozitlerin yük altındaki davranışını etkileyen temel özelliklerdir. Eğilme mukavemeti, malzemenin bükülme kuvvetleri altında deformasyona direnme kapasitesini, elastisite modülü ise malzemenin sertliğini veya elastik deformasyona karşı direncini yansıtır. Bu özellikler, kompozitte kullanılan liflerin türü ve miktarından büyük ölçüde etkilenir. Örneğin, polimerik liflerin çimento bazlı kompozitlerin bükülme performansını artırdığı ve dört noktalı bükme testi altında çatlamaya ve sapmaya karşı direnç sağladığı bilinmektedir. Ek olarak, yüksek mukavemetli çelik lifler, yüksek akma mukavemeti ve elastisite modülü ile kompozitlerin hem eğilme mukavemetini hem de sertliğini önemli ölçüde artırabilir. Lif türlerinin ve bunların matris içindeki dağılımının dikkatli seçimi, kompozitin mekanik özelliklerini özel uygulama ihtiyaçlarına göre uyarlamayı sağlar, böylece yapısal performansını ve kullanılabilirliğini artırır (Coşkun, 2021).

Darbe direnci ve tokluk, dinamik yüklere veya darbe koşullarına maruz kalan yapılarda kullanılan malzemeler için kritik özelliklerdir. Çimento esaslı lifli kompozitlere katılan liflerin türü ve içeriği, bu malzemelerin mekanik özelliklerini ve performansını belirgin bir şekilde etkiler. Araştırmalar, çeşitli lif türlerinin bir araya getirildiği karışık lif kompozitlerin, tek tip lif içerenlere kıyasla daha üstün özellikler sergileme eğiliminde olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, kompozitin genel mukavemetini, sünekliğini ve çatlamaya karşı direncini artıran farklı lif türlerinin sinerjik etkilerinden kaynaklanır (Köse ve Ekici, 2019). Geliştirilmiş özellikler şu temel faktörlerle sağlanır (Yalçın ve Ergene, 2018):

- Farklı lif türleri, gerilimleri kompozit malzeme boyunca daha eşit bir şekilde emebilir ve dağıtabilir.
- Birden fazla lif tipinin varlığı, çatlakları etkili bir şekilde kapatabilir, yayılmalarını sınırlar ve malzemenin dayanıklılığını artırabilir.

- Farklı geometrilere ve özelliklere sahip liflerin kombinasyonu, lifler ve çimento matrisi arasındaki bağı optimize eder, bu da kompozitin yapısal bütünlüğünü artırır.

Bu bulgular, çimento bazlı lifli kompozitlerin performansını en üst düzeye çıkarmak için lif türlerinin ve içeriklerinin dikkatli bir şekilde seçilmesinin önemini vurgular.

Çimento bazlı lifli kompozitlerin özelliklerini etkileyen bir diğer kritik faktör, su/çimento (W/C) oranı ve kimyasal katkı maddelerinin eklenmesidir. Araştırmalar, bu unsurların malzemenin bükülme performansı ve çoklu çatlak oluşumuna karşı direncinin belirlenmesinde önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Özellikle, W/C oranı kompozitin gözenekliliği ve yoğunluğu üzerinde doğrudan etkiler yaratır ve bu da kompozitin sağlamlığını ve dayanıklılığını etkiler (Gödek ve ark., 2016). Mineral katkılar gibi kimyasal katkı maddeleri ise bu özellikleri aşağıdaki yollarla geliştirir:

- Kimyasal katkı maddeleri, kompozitin gözenekliliğinin azaltılmasına yardımcı olarak daha yoğun ve güçlü bir malzeme elde edilmesini sağlar.
- Bazı katkı maddeleri, karışımın işlenebilirliğini geliştirerek lifin daha iyi dağılmasını ve hizalanmasını kolaylaştırır.
- Katkı maddeleri, çimento matrisindeki hidrasyon reaksiyonlarını hızlandırabilir veya değiştirebilir, böylece kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirir.

Bu nedenle, su/çimento oranının optimize edilmesi ve kimyasal katkı maddelerinin dikkatli bir şekilde seçilmesi, yüksek performanslı çimento bazlı lifli kompozitlerin tasarlanmasında çok önemli adımlardır (Pekmezci ve Atahan, 2014).

Çimento esaslı lifli kompozitlere uygulanan kürleme koşulları ve işleme yöntemleri de nihai özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır.

Sıcaklık, nem ve zamanı içeren kür ortamı, mukavemet ve dayanıklılığın geliştirilmesi için gerekli olan çimento matrisi içindeki hidrasyon reaksiyonlarını doğrudan etkiler. Ayrıca, işleme yöntemlerinin seçimi, kompozit içindeki liflerin dağılımını ve yönünü etkileyerek kompozitin mekanik davranışını daha da etkileyebilir (Ekşi, 2013). Bu kompozitlerin kürlenmesi ve işlenmesinde dikkate alınması gereken önemli noktalar şunlardır:

- Kürleme sırasında optimum sıcaklık ve nem seviyelerinin korunması, malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırabilir.

- K rle me için yeterli s renin tanınması, istenen g   ve dayanıklılığa ulaşmak için çok önemli olan hidrasyon reaksiyonlarının tamamlanmasını sa lar.
- Vakum destekli işleme veya mekanik sıkıştırma gibi teknikler, optimum performans için çok önemli olan tekdüze lif dağıtımı ve hizalamanın elde edilmesine yardımcı olabilir.

Bu faktörler,  imento bazlı lifli kompozitlerin üretilmesinin karma ıklılı ını ve arzu edilen özelliklere ve performansa sahip malzemeler elde etmek için kontrollü k rleme ve işleme yöntemlerinin gerekliliğini vurgulamaktadır (Kahvecio lu, 2016).

Çimento bazlı kompozitlere çeşitli lif türlerinin eklenmesi, bu malzemelerin mekanik ve yapısal özelliklerini önemli ölçüde artırır. En yaygın kullanılan lif türleri arasında  elik, cam, polipropilen, sisal ve j t gibi doğal lifler bulunur. Her lif türü, kompozit malzemeye farklı avantajlar sa lar. Örneğin,  elik lifler çekme mukavemetini ve çatlama direncini artırırken, polipropilen lifler malzemenin s nekli ini ve plastik büzülme çatlaklarına karşı direncini artırır. Doğal lifler ise sürdürülebilirlik açısından fayda sa lar ve kompozitin karbon ayak izini azaltmaya katkıda bulunur. Lif seçimi, sa amlık, dayanıklılık, çevresel etki ve maliyet gibi inşaat projesinin özel gereksinimlerine bağlıdır ( lhan ve Feyzullaho lu, 2019).

Lifler,  imento bazlı kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirerek bükülme mukavemetine ve tokluğuna önemli katkılar sa lar. Bu gelişimin arkasındaki temel mekanizma, liflerin kompozit malzeme içinde oluşan çatlakları köprüleme ve çatlakların genişlemesini ve yayılmasını  nleme yeteneğine dayanır. Bu  zellik, özellikle kirişler ve döşemeler gibi bükülme gerilimlerine maruz kalan uygulamalarda önemlidir. Lif eklenmiş  imento bazlı kompozitler, yük altında gerinim sertleşmesi davranışı sergileyerek enerji emme kapasitesini ve yıkıcı hasara karşı direnci artırır. Bu nedenle,  imento bazlı kompozitlerde lif takviyesi, geli mi  mekanik performans ve yapısal esneklik elde etmek için önemli bir stratejidir ( avdar ve Bingöl, 2016).

Çimento bazlı lifli kompozitlerin bileşimi, dayanıklılı ları ve performans özellikleri üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. Kullanılan lif türü ve miktarı, W/C oranı ve ek katkı maddelerinin varlığı gibi faktörler, kompozitin nihai özelliklerini etkiler. Örneğin,  zel mikroliflerle tasarlanan Tasarlanmış  imentolu Kompozitler yüksek süneklik ve çatlama direnci gösterir ve bu da onları çekme yükleme altında üstün performans gerektiren uygulamalar için ideal kılar. Ayrıca, kompozit bileşenlerin dikkatli seçimi, malzemenin nem, sıcaklık değişimleri ve kimyasal saldırılar gibi çevresel faktörlere karşı direncini artırarak hizmet ömrünü uzatır ve bakım maliyetlerini azaltır.

Kompozit bileşimi ile malzeme performansı arasındaki etkileşimi anlamak, çimento bazlı lifli kompozitlerin inşaat ve mühendislik uygulamalarında kullanımını optimize etmek için esastır (Türk ve Kına, 2016).

2.2. Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Yapısı ve Kullanım Alanları

Çimento bazlı kompozitlere çeşitli lif türlerinin eklenmesi, bu malzemelerin mekanik ve yapısal özelliklerini önemli ölçüde artırır. En yaygın kullanılan lif türleri arasında çelik, cam, polipropilen, sisal ve jüt gibi doğal lifler bulunur. Her lif türü, kompozit malzemeye farklı avantajlar sağlar (Ramazanoğlu ve Kaya, 2024). Örneğin, çelik lifler çekme mukavemetini ve çatlama direncini artırırken, polipropilen lifler malzemenin sünekliğini ve plastik büzülme çatlaklarına karşı direncini artırır. Doğal lifler ise sürdürülebilirlik açısından fayda sağlar ve kompozitin karbon ayak izini azaltmaya katkıda bulunur. Lif seçimi, sağlamlık, dayanıklılık, çevresel etki ve maliyet gibi inşaat projesinin özel gereksinimlerine bağlıdır (Kurt, 2006).

Lifler, çimento bazlı kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirerek bükülme mukavemetine ve tokluğuna önemli katkılar sağlar. Bu gelişimin arkasındaki temel mekanizma, liflerin kompozit malzeme içinde oluşan çatlakları köprüleme ve çatlakların genişlemesini ve yayılmasını önleme yeteneğine dayanır. Bu özellik, özellikle kirişler ve döşemeler gibi bükülme gerilimlerine maruz kalan uygulamalarda önemlidir (Yılmaz Akyürek, 2022). Lif eklenmiş çimento bazlı kompozitler, yük altında gerinim sertleşmesi davranışı sergileyerek enerji emme kapasitesini ve yıkıcı hasara karşı direnci artırır. Bu nedenle, çimento bazlı kompozitlerde lif takviyesi, gelişmiş mekanik performans ve yapısal esneklik elde etmek için önemli bir stratejidir (Öz ve Güneş, 2023).

Lif takviyeli kompozitlerin üretim süreci, nihai ürünün özelliklerini önemli ölçüde etkileyen karmaşık karıştırma ve döküm tekniklerini içerir. Lifleri çimento matrisine dahil ederek kompozitin mukavemet ve dayanıklılık gibi mekanik özelliklerini geliştirmek mümkündür. Karıştırma işlemi, çimento karışımına eklenen liflerin miktarı ve türü üzerinde hassas kontrol gerektirir. Özel gereksinimleri karşılamak için cam, karbon ve doğal lifler tek başına veya kombinasyon halinde kullanılabilir. Döküm tekniği ayrıca kompozitin uygulama alanlarındaki performansı açısından kritik olan yoğunluğunu ve homojenliğini de belirler. Bu adım, liflerin çimento matrisi boyunca eşit şekilde dağılmasını sağlamak ve kompozit yapıyı zayıflatabilecek topaklanmaları önlemek için titizlikle yönetilmelidir (Betgül, 2022).

Çimento bazlı lifli kompozitlerin üretildiği işleme koşulları, bunların kalitesinin ve çeşitli uygulamalara uygunluğunun tanımlanmasında çok önemli bir rol oynar. W/C oranı ve kullanılan mineral katkıların türü gibi faktörler, kompozitin bükülme performansını ve dayanıklılığını önemli ölçüde etkileyebilir. Örneğin, W/C oranının ayarlanmasının kompozitin bükülme mukavemetini etkilediği ve bunu üretim süreci sırasında çok önemli bir parametre haline getirdiği gösterilmiştir (Kalaycıoğlu, Yel ve Çavdar, 2012). Ayrıca mineral katkı maddelerinin eklenmesi, kompozitin çevresel bozulmaya karşı direnci gibi spesifik özelliklerini geliştirebilir. Deneysel çalışmalar, üstün mekanik özelliklere ve uzun ömre sahip kompozitler üretmek için bu işlem koşullarının optimize edilmesi gerektiğini göstermiş ve bunların üretim sürecindeki önemi vurgulanmıştır (Ramazanoğlu ve Kaya, 2024).

Çimento bazlı lifli kompozitlerin üretimindeki yenilikler, sürdürülebilirliğin ve çevresel performansın artırılmasına yöneliktir. Bu tür yeniliklerden biri, karışımlardaki çimento içeriğinin azaltılmasını içerir; bu, yalnızca çimento üretimiyle ilişkili karbon ayak izini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda kompozitlerin dayanıklılığını ve hidrasyon oranını da artırır. Bu gelişmeler, modern inşaat uygulamalarının taleplerini karşılayan sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesi için çok önemlidir. Ayrıca yenilenebilir ve geri dönüştürülmüş liflerin kompozitlere dahil edilmesi üretim sürecinin sürdürülebilirliğine katkıda bulunur. Üreticiler, bu yenilikçi uygulamalara odaklanarak, inşaat malzemelerinde sürdürülebilirliğe yönelik küresel baskıya uygun olarak yalnızca kaliteli değil aynı zamanda çevre dostu olan çimento bazlı lifli kompozitler üretebilirler (Arslan ve Yıldız, 2019).

Çimento esaslı lifli kompozitler, yüksek eğilme performansı ve deformasyon kapasitesi ile öne çıkar. Bu malzemeler, çimento matrisine çeşitli türlerde liflerin eklenmesiyle üretilir ve bu eklemeler, malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini önemli ölçüde iyileştirir. Liflerin çimento matrisindeki varlığı, mikro çatlakların oluşumunu ve yayılmasını sınırlayarak, malzemenin bükülme dayanımını ve enerji emme kapasitesini artırır (Demirhan, 2023).

Mikroyapısal seviyede, liflerin çimento matrisine dahil edilmesi kritik bağlantılar oluşturur. Lifler, çimento matrisinde oluşan çatlakların ilerlemesini ve genişlemesini önler, bu da malzemenin genel dayanıklılığını artırır. Lif-matris bağlantısı, çatlak köprüleme etkisiyle çatlak genişlemesini sınırlar ve böylece malzemenin süneklik ve enerji yutma kapasitesi artar (Kozak, 2013).

Çelik lifler, yüksek çekme mukavemeti ve çatlak direnci sağlar. Çelik liflerin çimento matrisine homojen dağılımı, çekme altında gerinim sertleşmesi davranışını geliştirir ve çatlakların daha etkin bir şekilde kontrol edilmesini sağlar. Bu özellikler, özellikle uçak pistleri ve güvenlik bölgeleri gibi yüksek mukavemet ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda çelik lifli kompozitlerin tercih edilmesini sağlar (Yıldırım ve ark., 2019).

Polipropilen lifler, malzemenin sünekliğini ve plastik büzülme çatlaklarına karşı direncini artırır. Düşük yoğunlukları ve yüksek esneklikleri ile bilinen polipropilen lifler, kompozit malzemenin daha hafif ve dayanıklı olmasını sağlar. Ayrıca, kimyasal direnci artırarak kompozitlerin çevresel etkilere karşı dayanıklılığını güçlendirir (Kızıllıgın, 2009).

Cam ve karbon lifler, çimento esaslı kompozitlerin bükülme mukavemeti ve sertliğini artırır. Cam lifler, alkali direnci ve uzun ömürlü performansları ile bilinirken, karbon lifler yüksek mukavemet ve hafiflik kombinasyonunu sunar. Bu lifler, özellikle yüksek performans gerektiren yapısal uygulamalarda kullanılır (Şahin, 2007).

Sisal ve jüt gibi doğal lifler, sürdürülebilirlik ve düşük maliyet avantajları sunar. Bu lifler, kompozit malzemelerin karbon ayak izini azaltmaya katkıda bulunur ve biyobozunur özellikleri ile çevre dostu bir alternatif oluşturur. Ayrıca, doğal liflerin çimento matrisine eklenmesi, malzemenin mekanik performansını artırırken çevresel etkilerini de minimize eder (Taşdemir ve Baramov, 2010).

Çimento esaslı lifli kompozitlerin yüksek dayanım ve enerji yutma kapasitesi, onları uçak pistleri ve güvenlik bölgeleri gibi kritik alanlarda tercih edilen bir malzeme haline getirir. Bu üstün özellikler, malzemelerin performans ve güvenlik gereksinimlerini karşılamada önemli avantajlar sunar. (Türk ve Kına, 2016)

Uçak pistlerinde, çimento esaslı lifli kompozitler yüksek bükülme dayanımı ve çatlak kontrolü sağlar. Uçak iniş ve kalkışları sırasında oluşan ağır yüklere ve dinamik etkilere karşı dayanıklılık, bu malzemelerin kritik bir avantajıdır. Lifli kompozitler, iniş sırasında meydana gelen yoğun enerji birikimini emer ve bu sayede pistin yüzeyinde oluşabilecek hasarları minimize eder. Bu malzemeler, özellikle yoğun trafik ve ağır yük taşıyan havaalanlarında bakım ve onarım ihtiyacını azaltarak operasyonel sürekliliği artırır (Pan vd., 2020).

Güvenlik bölgelerinde, özellikle askeri veya polis kontrol noktaları ve karakol/kalekol gibi yapılar, yüksek mukavemet ve dayanıklılık gerektirir. Çimento esaslı lifli kompozitler, bu tür yapılarda darbe dayanımı ve enerji emme kapasitesi ile öne çıkar.

Askeri bölgelerdeki yapılar, patlama ve ateşli saldırılar gibi yüksek enerji iletimine maruz kalabilir. Lifli kompozitler, bu enerjiyi emerek yapıların bütünlüğünü korur ve personelin güvenliğini artırır. Bu malzemelerin deformasyon kapasitesi, yapısal bütünlüğün korunmasına katkıda bulunarak can ve mal güvenliğini sağlar (Kurt, 2006).

Polis kontrol noktaları ve karakollarda da benzer şekilde, çimento esaslı lifli kompozitlerin yüksek dayanım ve enerji yutma özellikleri, güvenlik tehditlerine karşı etkili bir koruma sağlar. Bu yapılar, çeşitli saldırılara ve vandalizme karşı dayanıklı olmalıdır. Lifli kompozitlerin çatlak köprüleme ve bükülme mukavemeti, bu tür saldırılara karşı etkili bir savunma mekanizması sunar (Nicolaidis vd., 2015).

Çimento esaslı lifli kompozitlerin, bu tür uygulamalardaki enerji yutma kapasiteleri, darbe ve yük altındaki deformasyonları kontrol altında tutarak yapıların performansını optimize eder. Bu özellikler, malzemenin kullanım ömrünü uzatır ve bakım maliyetlerini düşürür. Ayrıca, lifli kompozitlerin çevresel dayanıklılığı, bu tür yapıları zorlu hava koşullarına ve kimyasal saldırılara karşı da korur (Yu vd., 2016).

Sonuç olarak, çimento esaslı lifli kompozitlerin yüksek dayanım, enerji yutma kapasitesi ve deformasyon yetenekleri, uçak pistleri ve güvenlik bölgeleri gibi kritik alanlarda büyük avantajlar sunar. Bu malzemeler, operasyonel verimliliği artırırken, güvenlik ve dayanıklılığı da maksimize eder (Solmaz, 2016).

2.3. Lif Türleri ve Özellikleri

Çimento esaslı lifli kompozitlerde kullanılan lifler, betonun veya harcın mekanik özelliklerini iyileştirmek için veya yapısal performansı arttırmak amacıyla eklenir. Bu lifler; betonun çekme dayanımı, eğilme dayanımı, çatlak oluşumu ve ilerlemesine karşı direnç gibi kritik özelliklerini olumlu yönde etkiler. Ayrıca kompozitin sürekliliğini de sağlayarak deformasyona izin verir. Bu durum da lifli kompozitlerin daha esnek bir yapı kazanmasını sağlar (Alcharchafche, 2022).

Liflerin inşaat bazındaki malzemelere kattığı birçok fayda bulunmaktadır ancak bunlardan bazılarını temel olarak sıralayabiliriz (Güngör, 2013):

1. **Dayanım Artışı:** Lifler, malzemenin hem çekme hem de eğilme dayanımını artırarak çatlak oluşumuna ve bu çatlakların ilerlemesine karşı direnç kazandırır.
2. **Esneklik:** Lifler, kompozitlerin kırılmaya uğramadan deformasyon yeteneği kazanmasını sağlar. Deformasyon yeteneğiyle orantılı olarak da malzeme yapısı daha esnek bir form kazanmış olur.

3. Çatlak Direnci: Malzemeleri piyasada en çok tutan özelliklerinde biri olan uzun servis ömrünü arttıran bir özelliktir çatlak direnci. Liflerin varlığı, beton veya harçta oluşan mikro ve makro çatlakların ilerlemesini engelleyerek malzemenin servis ömrünü uzatır.
4. Şok ve Darbe Direnci: Bu özellik sayesinde lifler üzerinde oluşan ani yükler veya darbeler sonucunda liflerin daha dayanıklı olması sağlanır.
5. Sünek Davranış: Kompozitlerin liften yapılmış olanları lifsiz betonlara kıyasla daha fazla enerji verebilir ve daha esnek davranış sergilerler.

Lifler, kompozitlerin yapısal özelliklerini bu şekilde iyileştirirken kullanılan lif türleri bu performansa önemli ölçüde etki eder. Lif türleri ise genel anlamda iki ana kategoriye ayrılmaktadır: Doğal lifler ve sentetik lifler.

Doğal Lifler :

Doğal lifler, adından da anlaşılacağı üzere bitkisel, hayvansal veya mineral kökenli malzemelerden elde edilir. Çevre dostu olması ve yenilenebilir enerji kaynaklardan elde edilmesi gibi büyük avantajları bulunmaktadır. Çimento esaslı lifli kompozitlerde kullanılan başlıca doğal lifler şunlardır (Sarı, 2013):

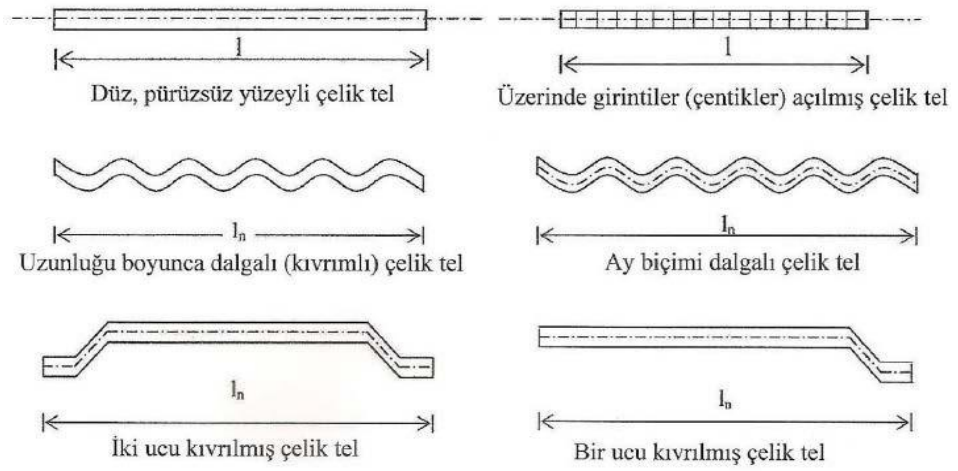
- Kenevir Lifleri: Kenevir lifleri, yüksek çekme dayanımı ile bilinir. Düşük yoğunluğun verdiği avantaj ile kompozit malzemelerin ağırlığını azaltıp aynı zamanda çatlak direncini de artırır. Ayrıca biyolojik olarak parçalanabilir olmaları, çevresel sürdürülebilirlik açısından bir başka avantaj sağlar
- Jüt Lifleri: Bu lifler düşük maliyetli doğal liflerdir. En önemli özelliklerinden biri olan yüksek su emme kapasitesi sayesinde betonda çatlak öncesi deformasyonun artırılmasına olanak sağlar. Bununla birlikte, jüt liflerinin biyolojik olarak bozulma eğiliminde olması da kompozitin sürekli dayanıklılığı açısından dikkat edilmesi gereken bir gerçektir.
- Bambu Lifleri: Bambu liflerinin öne çıkan özellikleri yüksek mukavemet ve dayanıklılıktır. Hafif olması ve sürdürülebilir doğası sayesinde çevre dostu inşaat projelerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Bu lifler, betonun eğilme dayanımını artırmada etkili olup, kompozitin daha hafif ve esnek olmasını sağlar.

Yukarıdaki bilgilere bakılarak doğal liflerin küçük bir analizini yapabiliriz. Doğal lifler, düşük maliyet, çevre dostu ve yenilenebilir olması açısından oldukça avantajlıdır. Ancak su emme kapasiteleri ve biyolojik dayanıklılıkları gibi bazı dezavantajlara da sahip olmaktadır.

Sentetik Lifler :

Sentetik lifler, doğal liflerin aksine kimyasal işlemler sonucunda üretilen insan yapımı liflerdir. Özellikle çimento esaslı kompozitlerde geniş bir kullanım alanına sahiptirler. En büyük avantajları arasında yüksek mekanik dayanımı, kimyasal direncinin yüksek olması ve uzun ömürlü olmaları sayılabilir. Çimento esaslı lifli kompozitler bazında başlıca birkaç sentetik lif türü kullanılmaktadır. Bu başlıca sentetik lifleri şu şekilde sıralayabiliriz (Yaşar, 2011):

- Polipropilen Lifleri: Hafif olmalarının yanı sıra yüksek çekme dayanımına sahip bu lifler, betonun darbe dayanımını artırmada önemli rol oynamaktadır. Ayrıca agresif çevre koşullarına karşı, yüksek kimyasal dayanıklılıklarına sahip kompozitlerdir. Polipropilen lifler, beton içerisindeki su geçirgenliğini azaltarak malzemenin dayanıklılığını artırır.
- Cam Lifleri: Cam lifleri ve polipropilen lifleri gibi yüksek çekme dayanımına sahiptir ancak bunun yanında düşük uzamana özelliğine sahiptir. Çimento esaslı kompozitlerde kullanıldığı zaman malzemenin mukavemetini ve çatlama direncini artırmaktadır. Özellikle deniz duyu ve asitli ortamlara maruz kalan koşullarda cam lifleri kullanılır çünkü korozyona karşı dirençleri diğer kompozitlere kıyasla oldukça güçlüdür.
- Çelik Lifler: Özellikle ağır yük taşıyan yapılar için tercih edilen çelik lifler, yüksek çekme dayanımı ve eğilme mukavemetinin verdiği avantajlar ile çimento esaslı kompozitlerde önemli bir güç artışı sağlamaktadır. Çelik lifler, çatlak genişliğini kontrol altında tutarak yapıların genel güvenliğini ve servis ömrünü de uzatır. Ancak cam liflerin aksine çelik lifler korozyon dirençleri düşük olan liflerdir.



Şekil 2.1. Çelik liflerin şekilleri (TS 10513,1992)

- **Karbon Lifleri:** Karbon lifleri, hafif ve son derece yüksek çekme dayanımına sahip liflerdir. Bu dayanımlar hem yüksek mekanik dayanım hem de kimyasal ve termal direnç dayanımını kapsamaktadır. Bu sebeple karbon lifler, özellikler yüksek performans gerektiren yapılarda tercih edilir. Çimento esaslı kompozitlere sağladığı en büyük avantajlardan biri de bu kompozitlere elektriksel iletkenlik kazandırabilmesidir.

Çizelge 2.1. Farklı lif türlerine ait fiziksel özellikler (Biber, 2001)

Lif Cinsi	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)	Maksimum Uzunlaşma (%)	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)
Akrilik	207-414	2,1	25-45	1,1
Asbestler	552-966	83-138	0,6	3,2
Pamuk	414-690	4,8	3-10	1,5
Cam	1035-3795	69	1,5-3,5	2,5
Naylon	759-828	4,1	16-20	1,1
Polyester	724-863	8,3	11-13	1,4
Polietilen	690	0,14-0,4	10	0,95
Polipropilen	552-759	3,5	25	0,9
Pamuk-Yün	414-621	6,9	10-25	1,5
Mineral Yünü	483-759	69-117	0,6	2,7
Çelik	276-2760	200	0,5-3,5	7,8

Lif türleri ve bu liflerin özellikleri, çimento bazlı lifli kompozitlerin performansını doğrudan etkilemektedir. Genel olarak bu başlığı değerlendirecek olursak doğal lifler çevre dostu ve sürdürülebilir olmaları ile öne çıkmaktadır. Sentetik lifler ise yüksek dayanım, kimyasal direnç ve uzun ömür sunar. Liflerin sahip olduğu boyut, uzunluk, yüzey özellikleri ve yüzeyin kompozit içerisindeki dağılımları gibi özellikler kompozitlerin performanslarının değişmesini sağlayan faktörlerdir. Ayrıca liflerin yüzeye

olan bağlanma özellikleri, çatlak oluşumu ve ilerlemesine karşı direnci artıran önemli faktördür (Gödek, 2016).

Lifli kompozitlerde, lifin türü kadar malzemeye uyumu ve bağlanma kapasitesi de önemlidir. Doğal liflerin zamanla biyolojik olarak parçalanma riski bulunurken sentetik liflerin çevresel etkiler karşısında daha uzun süre dayanması beklenmektedir. Bu ve benzeri nedenlerle, lif türü seçimi yaparken; kompozitin kullanılacağı yapının işlevi, çevresel koşulları ve uzun vadeli performans beklentileri dikkate alınmalıdır (Keskinates, 2022).

2.4. Farklı Lif Türlerinin Etkileri

2.4.1. Farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip lif türlerinin lifli kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine etkileri

Liflerin çekme mukavemeti, lifli kompozitlerin genel mukavemetinin belirlenmesinde büyük rol oynar. Çalışmalar, kompozit malzemelerin çekme mukavemeti de dahil olmak üzere mekanik özelliklerinin, kompozitte kullanılan liflerin türüne bağlı olarak önemli ölçüde değişebileceğini göstermiştir. Çekme mukavemetindeki bu değişiklikler, kompozitin dış kuvvetlere kırılmadan dayanma yeteneğini doğrudan etkiler. Bir lifin çekme mukavemeti, kopmadan önce dayanabileceği maksimum çekme gerilimi miktarını ifade eder. Lifle güçlendirilmiş kompozit malzemelerde liflerin hizalanması, uzunluğu ve yerleştirilmesi, kompozitin gerilme mukavemetinin artırılmasına katkıda bulunan önemli faktörlerdir. Bu nedenle, üstün mekanik özellikler ve dayanıklılık sergileyen kompozitlerin üretilmesi için yüksek çekme mukavemetine sahip liflerin seçilmesi esastır (Aral, 2006).

Çimento esaslı lifli kompozitlerde, liflerin çekme mukavemeti, kompozitin dayanıklılığı ve mukavemetine doğrudan etki eder. Bu tür kompozitlerde kullanılan liflerin yüksek çekme mukavemetine sahip olması, kompozit malzemenin genel mukavemetini artırır ve çatlama riskini azaltır. Çimento matrisli kompozitlerde liflerin hizalanması ve dağılımı, malzemenin çekme mukavemetini optimize eder (Lee vd., 2015).

Liflerin elastik modülü olarak da bilinen elastisite modülü, kompozit malzemelerin esnekliğini ve sertliğini önemli ölçüde etkiler. Bir lifin elastik modülü, onun stres altında deforme olma yeteneğinin bir ölçüsüdür ve bu da kompozitin deforme

olduktan sonra orijinal şekline dönme kapasitesini etkiler. Bu özellik, malzemenin kalıcı deformasyon olmadan tekrarlanan yüklemelere dayanmasının beklendiği uygulamalarda özellikle önemlidir. Örneğin, lifle güçlendirilmiş polimerlerde, kullanılan liflerin türü ve oranı, malzemenin elastik modülünü büyük ölçüde değiştirebilir ve daha sonra sertliğini ve esnekliğini etkileyebilir. Mühendisler, uygun elastik modüle sahip lifleri dikkatli bir şekilde seçerek kompozitlerin mekanik davranışını özel uygulama ihtiyaçlarına uyacak şekilde uyarlayabilir ve malzemelerin doğru sertlik ve süneklik dengesini sergilemesini sağlayabilirler (Kurt, 2006).

Çimento esaslı lifli kompozitlerde kullanılan liflerin elastik modülü, kompozitin esneklik ve dayanıklılığını etkiler. Yüksek elastik modüle sahip lifler, çimento esaslı kompozitlerin deformasyona karşı direncini artırır ve malzemenin uzun ömürlü olmasını sağlar (Çakır ve Berberoğlu, 2018).

Lif tokluğu veya kırılma tokluğu, kompozit malzemelerin dayanıklılığını ve darbe direncini etkileyen kritik bir özelliktir. Bir lifin dayanıklılığı, onun enerjiyi absorbe etme ve kırılmadan plastik olarak deforme olma yeteneğini gösterir; bu da kompozitin ani darbelere veya stres konsantrasyonlarına bozulmadan dayanma yeteneğinde çok önemli bir rol oynar. Araştırmalar, yüksek kırılma dayanıklılığına sahip liflerin kompozitlere dahil edilmesinin, kompozitlerin genel dayanıklılığını ve çatlamaya karşı direncini önemli ölçüde artırabileceğini göstermiştir. Bu durum özellikle çelik lifle güçlendirilmiş beton kirişlerin gelişmiş tokluk ve enerji emme yetenekleri sergilediği ve yük altında çatlamaya ve bozulmaya karşı daha dirençli yapılara yol açtığının gösterildiği inşaat sektörü için geçerlidir. Bu nedenle, lif kırılma tokluğunun kompozit dayanıklılığı üzerindeki etkisini anlamak, daha esnek ve uzun ömürlü malzemeler tasarlamak için çok önemlidir (Balcıoğlu ve Gün, 2022).

Çimento esaslı lifli kompozitlerde lif tokluğu, darbe direncini ve genel dayanıklılığı artırır. Yüksek tokluğa sahip lifler, çimento matrisli kompozitlerin çatlamasını önler ve ani darbelere karşı direncini artırır. Bu özellik, özellikle yapı malzemelerinde uzun ömür ve güvenilirlik sağlar (Kozak, 2013).

Lif hizalamanın kompozitlerin yön mukavemeti üzerindeki etkisi, kompozitlerin mekanik performansını belirleyen kritik bir husustur. Çalışmalar, kompozit bir malzeme içindeki liflerin hizalanmasının, kompozitin belirli yönlerde mukavemetini artırmada önemli bir rol oynadığını göstermiştir. Bu fenomen, liflerin uygulanan yükü kompozit yapı boyunca dağıtma şekline atfedilir. Hizalanmış lifler, yönelimlerine paralel olarak uygulanan kuvvetlere karşı daha yüksek direnç sunma eğilimindedir ve böylece

kompozitin genel çekme mukavemeti o yönde artar. Bu prensip, malzemelerin önceden belirlenmiş yönlerde yüksek yüklere dayanmasının gerekli olduğu havacılık ve otomotiv endüstrileri gibi yön mukavemetinin çok önemli olduğu uygulamalar için kompozitlerin tasarlanmasında çok önemlidir (Lee vd., 2015).

Bir kompozit içindeki lif oryantasyonu ile stres dağılımı arasındaki ilişki, bu malzemelerin yükleri nasıl taşıdığını anlamak için temeldir. Lif oryantasyonu, kompozit malzeme içindeki gerilim dağılımını önemli ölçüde etkileyerek dayanıklılığını ve yük altındaki performansını etkiler. Lifler, uygulanan gerilim yönünde yönlendirildiğinde, yükü kompozit boyunca etkili bir şekilde aktarır ve malzeme arızasına yol açabilecek gerilim konsantrasyonlarını en aza indirirler. Stresin bu optimal dağılımı, kompozitlerin gelişmiş mekanik özelliklerine katkıda bulunarak onları çeşitli yapısal uygulamalar için daha dayanıklı ve güvenilir hale getirir. Ek olarak, liflerin oryantasyonu, kompozitlerin anizotropik doğasını tanımlamada çok önemli bir rol oynar; burada malzeme, farklı lif oryantasyonundan dolayı farklı yönlerde farklı mekanik özellikler sergiler (Xie vd., 2019).

Çimento esaslı kompozitlerde lif hizalaması, kompozitin belirli yönlerdeki mukavemetini artırır ve yapı boyunca gerilimlerin eşit dağılımını sağlar. Bu, özellikle çimento esaslı yapı elemanlarının uzun ömürlü ve dayanıklı olmasını sağlar (Özdem Baş, 2023).

Rastgele ve hizalı lif oryantasyonunun kompozitlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi, performansta önemli farklılıklar ortaya koymaktadır. Kompozit bir malzemedeki rastgele yönlendirilmiş lifler genellikle izotropik özellikler sağlar, bu da malzemenin tüm yönlerde tekdüze mekanik özelliklere sahip olduğu anlamına gelir. Bu izotropik davranış, yük yönünün tahmin edilemediği uygulamalar için faydalıdır. Buna karşılık, hizalanmış lifler, verimli yük aktarımı ve azaltılmış stres konsantrasyonları nedeniyle kompozitlerin mekanik özelliklerini lifler yönünde geliştirir. Bu yönlü takviye, liflerin hizalanması boyunca gelişmiş mukavemet, sertlik ve dayanıklılık sunan, belirli yük taşıma uygulamaları için özel olarak tasarlanmış malzemelerin oluşturulmasında özellikle avantajlıdır. Rastgele ve hizalı lif oryantasyonu arasındaki seçim, izotropik esneklik ve anizotropik mukavemet arasındaki dengeyi sağlayarak, amaçlanan uygulamanın spesifik mekanik gereklilikleri tarafından belirlenir (Balcan, 2023).

2.4.3. Farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip lif türlerinin lifli kompozitlerin dayanıklılık özellikleri üzerine etkileri

Liflerin gerilme mukavemeti ile kompozit malzemelerin genel dayanıklılığı arasındaki ilişki, malzeme biliminin karmaşık ve önemli bir yönüdür. Farklı çekme mukavemetine sahip lifler, kompozitlerin mekanik sağlamlığına çeşitli şekillerde katkıda bulunur. Yüksek çekme mukavemetine sahip lifler, arızalanmadan önce daha büyük yükleri taşıyabilir ve bu da kompozitin dış kuvvetlere dayanma kabiliyetini artırır. Bu durum, özellikle lif ile matris arasındaki bağın bütünlüğünün malzemenin mukavemet özelliklerinde önemli rol oynadığı mekanik olarak bağlanmış kompozitlerde belirgindir. Doğal kökenlerden sentetik kökenlere kadar uzanan lif malzemelerin çeşitliliği, geniş bir çekme mukavemeti yelpazesi sunarak kompozitlerin belirli mukavemet gereksinimlerini karşılayacak şekilde özelleştirilmesine olanak tanır. Bu çeşitlilik, kompozit malzemelerin çok yönlülüğüne katkıda bulunmakla kalmaz, çeşitli uygulamalar için hedeflenen mukavemet özelliklerine sahip kompozitlerin mühendisliğini de mümkün kılar (Orman, 2019).

Liflerin gerilme mukavemeti, kompozit malzemenin termal, kimyasal ve mekanik stresler gibi çevresel stres faktörlerine direnme yeteneğini doğrudan etkiler. Liflerin doğal gücü, kompozitin omurgası görevi görür ve malzemenin bozulmadan olumsuz koşullara ne kadar iyi dayanabileceğini belirler. Örneğin, denizcilik endüstrisinde yaygın olarak kullanılan cam lif takviyeli kompozitler, zorlu deniz ortamlarına karşı dayanıklılık sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu özellikler arasında korozyona, neme ve sıcaklık değişimlerine karşı yüksek direnç yer alır ve bunlar doğrudan gömülü cam liflerin gerilme mukavemetine bağlıdır. Yüksek çekme mukavemetine sahip liflerin kullanılması, çevresel stres faktörlerinin etkilerini azaltarak kompozit malzemenin ömrünü uzatır ve yapısal bütünlüğünü korur. Bu ilişki, şiddetli stres faktörlerine maruz kalan ortamlarda kullanılacak kompozitler için uygun çekme mukavemetine sahip liflerin seçilmesinin önemini vurgular (Kahveci, 2016).

Yüksek gerilme mukavemetli liflerin kompozitlerin ömrünü uzatma üzerindeki etkisini vurgulayan vaka çalışmaları, bunların faydalarına dair somut kanıtlar sunmaktadır. Havacılıktan inşaat sektörüne kadar çeşitli uygulamalarda, yüksek mukavemetli liflerin kompozitlere stratejik entegrasyonu, dayanıklılığın ve performansın artmasına neden olmuştur. Örneğin, üstün mekanik özellikleri nedeniyle karbon lif

takviyeli çimento kompozitlerinin, karbon liflerin dahil edilmesiyle çatlamaya karşı artan direnç ve gelişmiş yük taşıma kapasitesi sağladığı gösterilmiştir. Ayrıca, olağanüstü dayanıklılık ve sertlik gerektiren malzemeler için yüksek gerilme mukavemetli liflerin uçak endüstrisinde kullanılması, bu liflerin değerini daha da vurgulamaktadır. Bu liflerin kompozit malzemelerde kullanılması, bileşenlerin ömrünü uzatmakla kalmaz, aynı zamanda kritik uygulamalarda güvenlik ve güvenilirliğe de katkıda bulunur (Okçuer, 2021).

Liflerin esnekliği, kompozit malzemelerin bükülmesini ve elastikiyetini etkilemede önemli bir rol oynar. Bu durum, kompozitlerde kullanılan liflerin, üretildikleri malzemelere göre değişen doğal özelliklerine bağlıdır. Yüksek esnekliğe sahip lifler, farklı tipte lifler kullanıldığında betonda artan süneklik ve enerji emilimi gösteren çalışmalarla doğrulanmıştır. Lif esnekliği ile kompozit elastikiyeti arasındaki bu ilişki, kompozit performansında istenen sonuçları elde etmek için fiziksel ve mekanik özelliklerine uygun lif türlerinin seçilmesinin gerekliliğine dikkat çekmektedir (Xie vd., 2019).

Bir kompozit içindeki stresi dağıtma, çatlakları önleme ve arızaları engelleme konusunda lif esnekliğinin rolü göz ardı edilemez. Yüksek mekanik ve fiziksel özelliklere sahip lif türleri, polimer kompozit malzemelerin güçlendirilmesinde etkilidir, bu da strese karşı dirençlerini artırır. Yük altında kompozitlerin bütünlüğünün korunmasında gerilimin dağılımı kritik öneme sahiptir ve liflerin elastikiyeti, kompozite uygulanan kuvvetleri emerek ve dağıtarak bu sürece önemli ölçüde katkıda bulunur. Sonuç olarak, sağlam ve dayanıklı, hasara karşı direnç gösterebilen ve zaman içinde yapısal bütünlüğünü koruyabilen mühendislik kompozitlerinde lif türlerinin elastikliklerine göre seçimi esastır (Khanna ve Kotousov, 2014).

Yüksek elastikiyete sahip liflerden yapılan kompozitler ile sert liflerden üretilen kompozitler arasındaki karşılaştırmalı analiz, özellikle dinamik uygulamalarda performansta önemli farklılıklar gösterir. Yüksek elastikiyete sahip lifler, stres altında deforme olma ve orijinal şekillerine dönebilme yetenekleri sayesinde, kompozitlere gelişmiş esneklik ve şok emme yetenekleri kazandırır. Öte yandan, sert liflerle güçlendirilmiş kompozitler, üstün mukavemet ve sertlik sergileyerek yapısal sertliğin çok önemli olduğu uygulamalar için idealdir. Bu ikilik, ister gelişmiş esneklik ve enerji emilimi, ister artırılmış mukavemet ve sertlik olsun, uygulamanın özel gereksinimlerine göre lif türlerinin dikkatle seçilmesinin önemini vurgular. Kullanılan liflerin tipi ve oranını değiştirerek kompozitlerin özelliklerini uyarlama yeteneği, çok çeşitli endüstriyel

ve teknolojik uygulamalara uygun ileri kompozit malzemelerin geliştirilmesi için büyük bir potansiyel sunar (Türk ve Kına, 2016).

Lif-matris bağ mukavemetinin artırılmasında lif yüzey işlemlerinin rolü büyük önem taşır. Lifli kompozitlerin fiziksel ve mekanik özellikleri, lif-matris ara yüzeyindeki etkileşimlerden büyük ölçüde etkilenir. Yüzey işlemleri, kompozitin genel mukavemetini ve dayanıklılığını belirleyen yapışmayı iyileştirmek amacıyla tasarlanmıştır. Örneğin, bu işlemler lifin yüzey kimyasını veya topografyasını değiştirerek matris malzemesiyle olan bağlanma kabiliyetini artırabilir. Lif ile matris arasındaki bağın gücü, matristen life yük aktarım verimliliğini belirler ve böylece kompozitin mekanik özelliklerini doğrudan etkiler (Karaduman, 2018).

Farklı yüzey işlemleri ve bunların kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirme üzerindeki etkileri geniş çapta araştırılmıştır. Yüzey işleme yöntemleri ile kompozitin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi arasında doğrudan bir ilişki bulunmaktadır. Yüzey işlemleri basit kimyasal dağlamadan, plazma işlemleri veya haşıl maddelerinin uygulanmasına kadar çeşitlilik gösterir. Her bir yöntemin kendine özgü etki mekanizması ve potansiyel faydaları vardır (Bingöl ve Çavdar, 2016):

- Kimyasal işlemler genellikle lif yüzeyini asit veya bazlarla temizlemeyi içerir, bu da lifin pürüzlülüğünü artırabilir ve matrisle daha iyi bağlanmayı sağlayan fonksiyonel grupları tanıtabilir.
- Plazma işlemleri, lifin yüzey enerjisini değiştirerek ıslanabilirliği ve matrisle yapışmayı iyileştirir.
- Haşıl maddeleri, lif ile matris arasında bir köprü görevi görerek arayüzey bağlanmasını güçlendirir.

Bu işlemler, lif-matris arayüzü boyunca daha güçlü ve daha düzgün bir stres dağılımı sağlayarak kompozitin çekme mukavemetini, bükülme mukavemetini ve darbe direncini önemli ölçüde artırabilir. Lifli kompozitlerin mukavemetini ve performansını arttırmada spesifik yüzey işlemlerinin etkinliği, çeşitli vaka çalışmaları aracılığıyla vurgulanmıştır. Örneğin, cam lif takviyeli polimerlere odaklanan bir çalışma, cam liflere uygulanan spesifik kimyasal işlemlerin, kompozitin çekme ve darbe mukavemetlerinde gözle görülür bir iyileşme sağladığını göstermiştir. Doğal lif kompozitlerini içeren başka bir vaka çalışması, liflerin alkali işleminin, polimer matris içinde daha iyi bir dağılıma ve çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklerde artışa yol açtığını vurgulamıştır. Bu çalışmalar, lifli kompozitlerin performans özelliklerinin optimize edilmesinde özel yüzey işlemlerinin kritik rolünü göstermektedir. Üreticiler, uygun yüzey işlemi seçimi ile belirli

performans kriterlerini karşılayan kompozitler üretebilir ve inşaattan havacılığa, uzay uygulamalarına kadar geniş bir yelpazede ilerleme kaydedebilir (Tiwari vd., 2013).

2.5. Silis Dumanı

Silikon ve ferrosilikon alaşımı üretiminin bir yan ürünü olan silis dumanı, betonla etkileşimini önemli ölçüde etkileyen benzersiz bileşimi ve yapısıyla öne çıkmaktadır. Esas olarak silikon dioksitten (SiO_2) oluşan bu parçacıklar, ortalama çimento parçacıklarından yaklaşık 100 kat daha küçük bir çapa sahiptir. Bu ince yapısı, silis dumanının kalsiyum hidroksit ile birleşerek ek kalsiyum silikat hidrat üretmesini sağlayan pozolanik aktivitesine katkıda bulunur. Silis dumanı parçacıklarının yüksek yüzey alanı bu reaksiyonu güçlendirerek onu beton karışımlarında değerli bir bileşen haline getirir (Osmançelebioğlu, 2022).

Silis dumanının çimento bileşenleriyle reaktivitesi, beton uygulamalarındaki değerinin temel unsurudur. Portland çimentosu ile karıştırıldığında, silis dumanı pozolanik reaksiyonlara girer ve çimento hidratasyonu sırasında açığa çıkan kalsiyum hidroksit ile tepkimeye girerek ek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) fazları oluşturur. Bu süreç, beton matrisinin yoğunlaşmasına ve betonun basınç dayanımı ile dayanıklılık gibi mekanik özelliklerinin önemli ölçüde artmasına katkıda bulunur. Silis dumanının yüksek silika içeriği, onu etkili bir pozolan haline getirir ve çeşitli çevresel faktörlere karşı direncini artırarak beton yapıların genel performansını iyileştirir (Uzbaş ve Aydın, 2018).

Silis dumanının betondaki faydaları şunlardır (Keklik, 2020):

- Deniz ortamlarına maruz kalan veya buz çözücü tuzların kullanıldığı yapılarda çelik donatı korozyonu riskini azaltır.
- Sülfat bakımından zengin ortamlardaki beton yapılar, silis dumanının sülfatın neden olduğu reaksiyonların neden olduğu bozulmayı azaltma kapasitesinden yararlanır.
- Silis dumanı, betonun geçirgenliğini azaltarak genel dayanıklılığına katkıda bulunur ve betonu hava koşullarına, kimyasal saldırılara ve aşınmaya karşı daha dirençli hale getirir.

Beton geçirgenliği ve dayanıklılığındaki bu gelişmeler, özellikle zorlu çevre koşullarına maruz kalan veya yüksek düzeyde strese maruz kalan beton yapıların ömrünü uzatmak için gereklidir.

Silis dumanının betona eklenmesi, inşaat sektöründe çok önemli bir faktör olan basınç dayanımını önemli ölçüde artırır. Silikon ve ferrosilikon alaşımı üretiminin bir yan ürünü olan silis dumanı, betondaki kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek ek kalsiyum silikat hidrat oluşturan yüksek oranda silikon dioksit içerir. Bu reaksiyon, yalnızca betonun yapısında zayıf bir halka olan kalsiyum hidroksiti tüketmekle kalmaz, aynı zamanda daha yoğun ve kompakt bir matris oluşmasına da yol açar. Çalışmalar, silis dumanının eklenmesinin, geleneksel beton karışımlarına kıyasla basınç dayanımını %30'a kadar artırdığını göstermiştir. Bu, betonun mikro yapısını güçlendiren ve onu basınç kuvvetlerine karşı daha dayanıklı hale getiren silis dumanının pozolanik reaksiyonuna atfedilir (Kavozoğlu, 2021).

Artan basınç dayanımını etkileyen temel faktörler şunlardır (Erol, 2023) :

- Yüksek silikon dioksit içeriği
- Silis dumanı ve kalsiyum hidroksit arasındaki pozolanik reaksiyon
- İlave kalsiyum silikat hidrat oluşumu
- Daha yoğun ve kompakt beton matrisi ortaya çıkar

Basınç dayanımındaki iyileşme, yalnızca binaların ve altyapının yapısal bütünlüğü için faydalı olmakla kalmaz, aynı zamanda ekonomik ve çevresel avantajlar sunan daha ince, malzeme açısından daha verimli yapıların tasarlanmasına da olanak tanır.

Silis dumanı, basınç dayanımını artırmanın yanı sıra, betonun bükülme dayanımının da iyileştirilmesinde önemli bir rol oynar. Eğilme mukavemeti, yapıların çeşitli yüklere ve gerilimlere arıza olmadan dayanabilmesi için gereklidir. Silis dumanının betona dahil edilmesi daha yoğun bir mikro yapıya yol açar, bu da eğilme gerilmeleri altında çatlama ve deformasyona karşı daha iyi bir direnç anlamına gelir. Silis dumanının ince parçacıkları, daha büyük çimento parçacıkları ve agregalar arasındaki boşlukları doldurarak betonun gözenekliliğini azaltır ve böylece bükülme mukavemetini artırır. Araştırmalar, silika dumanı ilavesinin, silis dumanı içermeyen karışımlarla karşılaştırıldığında %20'ye kadar bükülme mukavemetinde artışa yol açabileceğini göstermektedir (Okoye vd., 2016).

Eğilme mukavemetinin artmasına katkıda bulunan faktörler:

- Daha yoğun beton mikro yapısı
- Beton matrisinde gözeneklilik azalır ve yapışma artar
- Çatlama ve deformasyona karşı geliştirilmiş direnç

Eğilme mukavemetindeki bu artış, kirişler, döşemeler ve köprüler gibi beton elemanların bükülme veya eğilme yüklerine maruz kaldığı uygulamalarda özellikle faydalıdır ve daha dayanıklı ve uzun ömürlü bir yapı sağlar (Açıkel, 2017).

Silis dumanının betondaki büzülme ve sünme davranışı üzerindeki etkileri dikkat çekicidir ve betonun genel performansına ve dayanıklılığına katkıda bulunur. Büzülme, zamanla betonun hacminde meydana gelen azalmadır ve bu durum çatlamaya ve yapısal zayıflığa neden olabilir. Sünme ise betonun sürekli yük altında deforme olma eğilimidir. Silika dumanı, ince parçacık boyutu ve puzolanik aktivitesi nedeniyle bu davranışları hafifletebilir. Silis dumanı, beton matrisindeki mikro boşlukları doldurarak ve daha fazla kalsiyum silikat hidrat oluşumunu kolaylaştırarak, daha yoğun ve daha stabil, büzülme ve sünme eğilimli ve zamanla daha az sünme sergileyen bir yapıya yol açar. Silis dumanının yüksek su talebi sayesinde beton karışımındaki serbest suyun azalması aynı zamanda daha düşük büzülme oranlarına da katkıda bulunur. Çalışmalar, silis dumanı içeren beton karışımlarının, geleneksel beton karışımlarına kıyasla %50'ye kadar daha az büzülme ve daha iyi sünme direnci sergilediğini göstermiştir (Shen vd., 2020).

Silis dumanının büzülme ve sünme üzerindeki temel etkileri şunlardır:

- Beton hacim büzülmesinde azalma
- Sürekli yük altında azaltılmış sürünme deformasyonu
- Daha yoğun ve stabil bir beton matrisi

Bu özellikler, silika dumanı ile zenginleştirilmiş betonu, büzülme ve sünme etkilerinin yapısal bütünlüğü ve uzun ömürlülüğü tehlikeye atabileceği büyük ölçekli altyapı projeleri ve yüksek binalar için ideal bir seçim haline getirmektedir (Sümer ve Sarıbyık, 2013).

Lif takviyeli betonda lifler ve matris arasındaki arayüzey bağları, mekanik özelliklerini ve genel performansını optimize etmek için çok önemlidir. Araştırmalar, arayüzey bağ mukavemeti gibi parametrelerin, lif takviyeli betonun etkinliğinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Silis dumanı beton karışımına eklendiğinde fiziksel ve kimyasal etkileşimleri yoluyla bu arayüzey bağlarını güçlendirir. Bu gelişme, silis dumanının boşlukları doldurma ve daha yoğun bir matris oluşturma becerisine atfedilir, bu da lifler ile matris arasında daha güçlü bir bağ oluşmasına yol açar. Sonuç olarak, artan bağ mukavemeti betonun genel dayanıklılığına ve yapısal bütünlüğüne katkıda bulunur (Khan vd., 2021).

Lif takviyeli betona silis dumanının eklenmesi, reolojik özelliklerini önemli ölçüde değiştirerek daha yapışkan ve işlenebilir bir karışıma yol açar. Silis dumanı, ince

tanecikleri ve puzolanik davranışı nedeniyle çimento tanecikleri arasındaki boşlukları doldurarak su ihtiyacını azaltır, segregasyon ve kanamayı önler. Bunun sonuçları şunlardır (Wu vd., 2019):

- Artan viskozite ve stabilite
- Geliştirilmiş işlenebilirlik, taşınmasını ve yerleştirilmesini kolaylaştırır
- Bileşenlerin ayrılmasına gerek kalmadan karışımın tekdüzeliğini koruma yeteneği

Bu iyileştirmeler sadece betonun çeşitli inşaat senaryolarında uygulanmasını kolaylaştırmakla kalmaz, aynı zamanda daha kaliteli bir yüzey ve yapısal performans elde edilmesine de katkıda bulunur.

Silis dumanının lif takviyeli betona katılmasının en dikkate değer etkilerinden biri, çatlama direnci ve tokluğu üzerindedir. Çalışmalar, silis dumanının betonun mekanik özelliklerini, çatlama karşı direnci ve genel tokluğu arttırdığını göstermiştir. Bu gelişme, silis dumanının aşağıdaki yeteneklerine bağlanabilir (Nazarimofrad vd., 2017):

- Betonun geçirgenliğini azaltarak betonu zayıflatabilecek zararlı maddelerin girişini sınırlandırır
- Beton matrisin mukavemetini ve dayanıklılığını arttırarak strese ve gerilmeye karşı daha dayanıklı hale getirir
- Lifler ve matris arasındaki bağ iyileştirerek yükleri daha eşit bir şekilde dağıtır ve çatlak oluşumu olasılığını azaltır

Bu faydalar, silis dumanını, özellikle dayanıklılık ve uzun ömürlülüğün kritik olduğu uygulamalarda, lif takviyeli beton üretiminde paha biçilmez bir bileşen haline getirmektedir.

Lif takviyeli betonda lifler ve matris arasındaki arayüzey bağları, mekanik özelliklerini ve genel performansını optimize etmek için önemlidir. Araştırmalar, arayüzey bağ mukavemeti gibi parametrelerin, lif takviyeli betonun etkinliğinde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Silis dumanı beton karışımına eklendiğinde fiziksel ve kimyasal etkileşimleri yoluyla bu arayüzey bağlarını güçlendirir. Bu gelişme, silis dumanının boşlukları doldurma ve daha yoğun bir matris oluşturma becerisine atfedilir, bu da lifler ile matris arasında daha güçlü bir bağ oluşmasına yol açar. Sonuç olarak, artan bağ mukavemeti betonun genel dayanıklılığına ve yapısal bütünlüğüne katkıda bulunur (Dündar vd., 2020).

Lif takviyeli betona silika dumanının eklenmesi, reolojik özelliklerini önemli ölçüde değiştirerek daha yapışkan ve işlenebilir bir karışıma yol açar. Silis dumanı ince

tanecikleri ve puzolanik davranışı nedeniyle çimento tanecikleri arasındaki boşlukları doldurarak su ihtiyacını azaltır, segregasyon ve kanamayı önler. Bunun sonuçları şunlardır:

- Beton karışımının artan viskozitesi ve stabilitesi.
- Geliştirilmiş işlenebilirlik, taşınmasını ve yerleştirilmesini kolaylaştırır.
- Bileşenlerin ayrılmasına gerek kalmadan karışımın tekdüzeliğini koruma yeteneği geliştirildi.

Bu iyileştirmeler sadece betonun çeşitli inşaat senaryolarında uygulanmasını kolaylaştırmakla kalmıyor, aynı zamanda daha kaliteli bir yüzey ve yapısal performans elde edilmesine de katkıda bulunuyor (Şimşek, 2020).

Silis dumanının lif takviyeli betona katılmasının en dikkate değer etkilerinden biri, çatlama direnci ve tokluğu üzerindedir. Çalışmalar, silis dumanının betonun mekanik özelliklerini, çatlamaya karşı direnci ve genel tokluğu artırdığını göstermiştir. Bu gelişme, silis dumanının aşağıdaki yeteneklerine bağlanabilir:

- Betonun geçirgenliğini azaltarak betonu zayıflatabilecek zararlı maddelerin girişini sınırlandırır.
- Beton matrisin mukavemetini ve dayanıklılığını artırır, onu strese ve gerilmeye karşı daha dayanıklı hale getirir.
- Lifler ve matris arasındaki bağı iyileştirir, yükleri daha eşit bir şekilde dağıtır ve çatlak oluşumu olasılığını azaltır.

Bu faydalar, silis dumanını, özellikle dayanıklılık ve uzun ömürlülüğün kritik olduğu uygulamalarda, lif takviyeli beton üretiminde değerli bir bileşen haline getirmektedir (Nazarimofrad vd., 2017).

Silis dumanının beton üretimine dahil edilmesi, CO₂ emisyonlarının azaltılmasına yönelik önemli bir strateji olarak tanımlanmıştır. Bu azalma öncelikle silis dumanının betonun mekanik özelliklerini geliştirme kabiliyetine, dolayısıyla istenen dayanım seviyelerine ulaşmak için daha az çimentoya ihtiyaç duyulmasına atfedilir. Silis dumanının kimyasal yapısı, betondaki kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek betonun dayanımından sorumlu olan ilave kalsiyum silikat hidrat oluşturarak bu sürece katkıda bulunur. Bu sadece betonun dayanıklılığını ve mukavemetini arttırmakla kalmaz, aynı zamanda çimento kullanımında da azalmaya yol açar ki bu da CO₂ emisyonunun azalmasıyla doğru orantılıdır. Bu nedenle silis dumanı, beton üretimiyle ilişkili karbon

ayak izini en aza indirerek inşaat malzemelerinin çevre dostu olarak geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Sümer, 2012).

Silis dumanı gibi endüstriyel yan ürünlerin beton uygulamalarında kullanılması, atık yönetimine sürdürülebilir bir yaklaşım sunmaktadır. Endüstriyel bir yan ürün olan silis dumanı, artan basınç dayanımı ve gelişmiş dayanıklılık da dahil olmak üzere betonun mekanik özellikleri üzerindeki olumlu etkileri nedeniyle kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu sadece atık malzemelerin verimli kullanımına katkıda bulunmakla kalmaz, aynı zamanda işlenmemiş ham maddelere olan talebi azaltarak önemli çevresel ve ekonomik faydalar sağlar. Silis dumanının betona uygulanması, bir endüstriden gelen atıkların bir başkası için kaynak haline geldiği ve böylece daha sürdürülebilir bir inşaat endüstrisine katkıda bulunulduğu döngüsel ekonomi ilkelerinin pragmatik bir örneğini ortaya koyuyor (Keklik, 2020).

İnşaat projelerinde silis dumanının kullanımına yönelik fayda-maliyet analizi yapılması, teknik faydalarının yanı sıra önemli ekonomik avantajları da ortaya koymaktadır. Silis dumanını betona dahil etmenin ilk maliyeti, geleneksel betona kıyasla daha yüksek olabilir; ancak silis dumanı ile güçlendirilmiş betonun dayanıklılığının artması ve bakım gereksinimlerinin azalması nedeniyle uzun vadeli tasarruflar dikkate değerdir. Beton yapıların bu uzatılmış ömrü, daha düşük yaşam döngüsü maliyetleri anlamına gelir ve silis dumanını inşaat projeleri için ekonomik açıdan uygun bir katkı maddesi haline getirir. Ayrıca silis dumanının kullanılması, çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir adım olarak görülmektedir. Sonuç olarak, silis dumanı kullanımı, sadece betonun teknik ve ekonomik faydalarını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda çevre dostu bir yaklaşım sunarak inşaat sektöründe önemli bir rol oynamaktadır (Kızıllıgın, 2009).

2.5.1. Silis dumanının yapı malzemelerinde kullanımı

Silika dumanının inşaat malzemesi karışımlarına, özellikle de betona dahil edilmesinin, betonun basınç dayanımını önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir. Bu iyileşme, kür koşullarının tutarlı kalması koşuluyla, betonun çeşitli yaşlarında belirgindir. Özturan ve ark. silis dumanı içeren betonun, standart betona göre belirgin şekilde daha yüksek bir basınç dayanımı sergilediğini göstermiştir. Bu durum özellikle yüksek dozda silis dumanı içeren karışımlarda belirgindir. Bu tür bulgular, silika dumanının betonun doğal yapısal özelliklerini güçlendirmedeki etkinliğini vurguluyor ve bu da onu inşaat

projelerinde dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü artırmak için hayati bir bileşen haline getiriyor (Li, 2015).

Silis dumanının beton karışımlarına eklenmesi, basınç dayanımını artırmanın ötesinde, çevresel etkilere karşı dayanıklılığı da önemli ölçüde artırır. Ponza gibi diğer malzemelerin yanı sıra silis dumanının kullanımı, silindirle sıkıştırılmış beton (RCC) karışımlarının işlenebilirlik, basınç dayanımı ve özellikle donma direnci dahil olmak üzere çeşitli özellikleri üzerindeki etkileri nedeniyle incelenmiştir. Çevresel dayanıklılıktaki bu artış, silika dumanını, özellikle şiddetli hava koşullarına yatkın bölgelerde veya malzemelerin agresif çevresel etkenlere maruz kaldığı bölgelerde inşaat malzemeleri için kritik bir bileşen haline getiriyor. Silis dumanı, betonun bu gibi etkenlere karşı direncini artırarak yapıların uzun ömürlülüğüne ve sürdürülebilirliğine katkıda bulunur (Tohumcu ve Bingöl, 2013).

Silis dumanının yapı malzemelerine dahil edilmesi yalnızca betonu güçlendirmek ve korumakla kalmaz, aynı zamanda işlenebilirliğini ve yüzey kalitesini de artırır. Örneğin bina sıvalarının silis dumanı ile değiştirilmesinin, malzemenin basınç dayanımını olumlu yönde etkilediği gösterilmiştir. Karışımın bileşimindeki bu ayarlama, daha düzgün bir uygulama sürecine ve daha yüksek kalitede bir son yüzeye yol açabilir. Silis dumanının faydaları, inşaat malzemelerinin yapısal, estetik ve işlevsel yönlerinin ötesine geçerek inşaat projelerinin genel verimliliğini ve bitişini artırır. Bu çok yönlü gelişme, modern yapı malzemelerinde çok yönlü ve vazgeçilmez bir bileşen olarak silis dumanının değerini vurgulamaktadır (Paşa, 2018).

Silis dumanının yapı malzemelerine entegrasyonu, çimento kullanımını ve bununla ilişkili karbon ayak izini önemli ölçüde azaltır. Bu azalmanın temel nedeni, silis dumanının betonun fiziksel ve kimyasal özelliklerini geliştirme ve onu daha verimli ve sürdürülebilir bir yapı malzemesi haline getirme yeteneğidir. Taze harca eklendiğinde silis dumanı ayrışma olasılığını azaltır; bu sadece daha düzgün ve dayanıklı bir yapı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda karışımdaki çimento ihtiyacını da azaltır. Çimento üretiminin dünyadaki en karbon yoğun süreçlerden biri olduğu göz önüne alındığında, bu özellikle önemlidir. İnşaat sektörü, silis dumanlı çimento kullanımını optimize ederek çevresel etkilerini azaltmada önemli ilerlemeler kaydedebilir (Keklik, 2020).

Silis dumanının çimento kullanımı üzerindeki etkisine ilişkin önemli noktalar şunlardır (Pinki ve Dewangan, 2014):

- Betonun fiziksel ve kimyasal özelliklerini geliştirir.
- Taze harçta ayrışma olasılığını azaltır.

- Karışımlarda gerekli olan çimento miktarını azaltır.
- İnşaat sektörünün karbon ayak izinin azaltılmasına katkıda bulunur.

Ayrıca inşaat malzemelerinde silis dumanının kullanılması, geri dönüştürülmüş ince beton parçaları gibi geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılmasını teşvik eder. Eski betonun kırılması ve öğütülmesinin bir yan ürünü olan bu ince taneler, silis dumanı ile birleştirildiğinde yeni beton karışımlarında etkili bir şekilde kullanılabilir ve böylece inşaat sektöründe sürdürülebilirlik teşvik edilir. Bu yaklaşım, atıkların çöp sahalarından uzaklaştırılmasının yanı sıra işlenmemiş hammaddelere olan talebi de azaltarak endüstrinin çevresel etkisini daha da azaltır. Silis dumanı ve geri dönüştürülmüş malzemeler arasındaki sinerji, inşaat sektöründe atıkların en aza indirildiği ve kaynakların daha verimli kullanıldığı döngüsel bir ekonomiye örnek teşkil etmektedir (Sasanipour vd., 2019).

Silis dumanının geri dönüştürülmüş malzemelerle birleştirmenin faydaları şunlardır (Keklik, 2020):

- Geri dönüştürülmüş ince beton parçacıklarının yeni karışımlarda kullanımını kolaylaştırır.
- Atıkları çöplüklerden uzaklaştırır.
- İşlenmemiş hammaddelere olan talebi azaltır.
- İnşaat sektöründe döngüsel ekonomiyi destekler.

Silis dumanının yapı malzemelerine uygulanması, binalarda enerji verimliliğinin artırılmasında da önemli bir rol oynamaktadır. Bu gelişme büyük ölçüde silis dumanının betonun basınç dayanımını artırma kabiliyetine atfedilir; bu da daha ince fakat daha güçlü yapısal elemanların tasarlanmasına yol açabilir. Bu optimize edilmiş yapılar, ısıtma ve soğutma için daha az enerji gerektirir, böylece binaların genel enerji tüketimi azalır. Artan enerji verimliliği, yalnızca bina sahiplerinin işletme maliyetlerini düşürmekle kalmaz, aynı zamanda binanın işletimiyle ilişkili CO₂ emisyonlarının azaltılmasına da katkıda bulunur. Dolayısıyla inşaatta silis dumanının kullanılması, yalnızca binaların yapısal bütünlüğünü geliştirmekle kalmaz, aynı zamanda artan enerji verimliliği yoluyla çevresel sürdürülebilirliği de destekler (Lim vd., 2017).

Silis dumanı binanın enerji verimliliğini aşağıdaki gibi artırmaktadır (Tohumcu ve Bingöl, 2013):

- Betonun basınç dayanımını artırır.
- Daha ince, daha güçlü yapısal elemanların tasarlanmasına olanak sağlar.

- Isıtma ve soğutma için enerji tüketimini azaltır.
- Binaın işletiminden kaynaklanan CO₂ emisyonlarını azaltır.

Silis dumanının yapı malzemelerine entegrasyonu, yüksek performanslı beton üretiminde önemli bir rol oynar ve malzemenin inşaat sektörünün ilerlemesi üzerinde kayda değer bir etkiye sahiptir. Silis dumanı, ince parçacıkları ve yüksek silikon dioksit içeriği sayesinde betonun mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını önemli ölçüde artırır. Çimento parçacıkları arasındaki boşlukları doldurarak daha yoğun, daha güçlü bir matris oluşturur ve betonun geçirgenliğini azaltır. Bu özellik, yapısal gereklilikleri karşılamakla kalmayıp aynı zamanda zorlu çevre koşullarına uzun süre dayanabilen beton üretiminde çok önemlidir. Ayrıca, silika dumanının beton karışımlarına dahil edilmesi, taze harçta yaygın bir sorun olan ayrışma riskini azaltır ve betonun yapışkanlığını ve stabilitesini artırır (Gražulytė vd., 2020).

Silis dumanı, geleneksel çimentolu malzemelerin ötesinde, yenilikçi inşaat malzemelerinin geliştirilmesinde de çok önemli bir rol oynamaktadır. Uygulaması, üstün özelliklere sahip malzemelerin oluşturulmasına katkıda bulunduğu geleneksel olmayan çimento esaslı kompozitlere kadar uzanır. Silika dumanının yüksek silika içeriği ve puzolanik aktivitesi, onu bu tür malzemelerin mukavemetini ve dayanıklılığını artırmak için ideal bir katkı maddesi yapar. Örneğin, hafif betonun geliştirilmesinde mukavemetten ödün vermeyen taşıyıcı hafif beton üretmek için silis dumanı kullanılır. Bu, ağırlık azaltmanın yapısal bütünlükten ödün vermeden maliyet tasarrufuna ve verimliliğin artmasına yol açabileceği uygulamalarda özellikle önemlidir. Ayrıca, bu tür kompozitlerde silis dumanının kullanılması, performanslarını artırarak ve ömrünü uzatarak sürdürülebilir inşaat malzemelerinin geliştirilmesini teşvik eder (İnce, 2020).

3D baskı teknolojisiyle üretilen yapı bileşenlerinin potansiyeli, silika dumanı kullanımıyla önemli ölçüde artırılmıştır. Bu yenilikçi uygulama, silika dumanının hassasiyet ve malzeme özelliklerinin modern inşaat tekniklerine uyarlanabilirliğini sergiler. 3D baskı için kullanılan malzeme karışımlarına silis dumanının dahil edilmesi, yalnızca betonun basılabilirliğini geliştirmekle kalmaz, aynı zamanda kürleme sonrası yapısal özelliklerini de geliştirir. Silis dumanının ince parçacıkları beton karışımının daha düzgün akışına katkıda bulunarak daha karmaşık tasarımların yüksek doğrulukla basılmasını sağlar. Ayrıca, silika dumanının sağladığı gelişmiş mekanik özellikler ve dayanıklılık, 3D baskılı yapı bileşenlerinin uzun ömürlülüğünü ve işlevselliğini garanti eder. En son teknolojinin ileri malzeme bilimiyle entegrasyonu, kişiselleştirme ve

verimliliğin ön planda olduğu yeni nesil inşaat metodolojilerinin gelişimini teşvik eder (Uygunoğlu ve ark., 2019).

2.5.2. Silis dumanının çimento ile ikamesinin etkileri

Çimento karışımlarına silika dumanının eklenmesinin, zamanla bozulmaya yol açabilecek yaygın bir sorun olan sülfat ataklarına karşı betonun direncini önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir. Çalışmalar, betonun sülfat ataklarına karşı dayanıklılığının, malzemenin zararlı alkali-silika genleşmesini azaltma yeteneğine atfedilen silika dumanı ilavesiyle arttığını ortaya koymaktadır. Spesifik olarak, %15 silika dumanı ikame oranının, betonun sodyum sülfat saldırılarına karşı savunma mekanizmalarını güçlendirmede özellikle etkili olduğu, tüm konsantrasyon oranlarında 120 günlük bir süre boyunca dirençte %3 ila %8 oranında bir artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu bulgu, özellikle sülfata maruz kalmanın endişe verici olduğu ortamlarda, daha dayanıklı beton yapıların üretiminde bir katkı maddesi olarak silis dumanının öneminin altını çizmektedir (Akçay ve Çullu, 2022).

Çimento yerine silis dumanı kullanmanın bir diğer önemli faydası, beton geçirgenliğinde azalmadır, bu da doğrudan geçirimsizliğin iyileştirilmesi anlamına gelir. Bu iyileştirilmiş özellik, beton yapıların uzun ömürlülüğü ve dayanıklılığı açısından çok önemlidir çünkü iç hasara neden olabilecek zararlı maddelerin girişini en aza indirir. Silis dumanının çimento-su reaksiyonu üzerindeki fiziksel ve kimyasal etkileri bu gelişmiş performansa katkıda bulunur. Özellikle, silika dumanı beton matrisi içindeki boşlukları doldurur ve kalsiyum hidroksit ile tepkimeye girerek ek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) oluşturur, böylece betonun gözenekliliğini azaltır ve geçirimsizliğini artırır. Bu ikili etki yalnızca betonu güçlendirmekle kalmaz, aynı zamanda zararlı maddelerin nüfuzuna karşı sağlam bir bariyer sağlar (Adil vd., 2020).

Çimentodaki silis dumanı ikamesi, sülfat ataklarına karşı etkinliği ve geçirgenliği azaltmadaki rolünün yanı sıra, betonun asidik ortamlara karşı direncini de önemli ölçüde artırır. Asidik ortamlarda mevcut olan zorlu koşullar, betonun bozulmasını hızlandırabilir ve bu da artırılmış direnci arzu edilen bir özellik haline getirir. Silika dumanının beton karışımına dahil edilmesinin, beton matrisinin yoğunlaşmasına ve asidik maddelerin girişini sınırlayan azaltılmış geçirgenliğe atfedilen bu tür ortamlarda üstün koruma sağladığı bulunmuştur. Dayanıklılıktaki bu iyileşme, asit kaynaklı bozulma riskinin

yüksek olduğu endüstriyel atık sulara veya asidik topraklara maruz kalan yapılar için özellikle önemlidir (Rahimi, 2019).

Silis dumanının beton karışımına katılmasının zamanla betonun basınç dayanımını önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir. Çalışmalar, silis dumanı içeren beton numunelerinin, silis dumanı içermeyen kontrol numuneleriyle karşılaştırıldığında her yaşta daha yüksek basınç dayanımı sergilediğini göstermiştir. Bu gelişme, özellikle çimentonun kısmen silis dumanı ile ikame edildiği karışımlarda gözlemlenen en yüksek basınç dayanımı ile dikkate değerdir. Bu olay, silika dumanının çimento hidratasyonu sırasında salınan kalsiyum hidroksit ile puzolanik reaksiyonuna atfedilebilir ve bu da betonda dayanıma katkıda bulunan birincil faz olan ek kalsiyum silikat hidratın (C-S-H) oluşumuna yol açar. Geliştirilmiş basınç dayanımı, uzun süreli dayanıklılığın ve mukavemetin çok önemli olduğu yapısal uygulamalarda önemli avantajlar sunar (Chaudhary ve Sinha, 2020).

Silis dumanı, mekanik özellikleri geliştirmenin yanı sıra, beton ve takviye malzemeleri arasındaki bağ mukavemetini de artırır. Bu gelişme, beton matrisi ile takviye çeliği arasındaki güçlü bağın yapısal bütünlük ve dayanıklılık açısından hayati önem taşıdığı betonarme yapılarda özellikle faydalıdır. Silika dumanının puzolanik reaksiyonu sadece daha yoğun bir beton matrisine yol açmakla kalmaz, aynı zamanda beton ve donatı arayüzünde daha yapışkan bir bağ oluşmasına da katkıda bulunur. Bu gelişmiş bağ mukavemeti, çimento hamuru ile agregalar veya takviye arasındaki arayüzey geçiş bölgesini (ITZ) optimize eden ve iyileştirilmiş yük aktarımına ve genel yapısal performansa yol açan silika dumanının mikro dolgu etkisinden kaynaklanmaktadır (Osmançelebioğlu, 2022).

2.5.3. Çimento esaslı lifli kompozitlerde yüksek sıcaklık etkisi

Kompozit malzemelerin yüksek sıcaklıklar altında ayrışması, yangın senaryolarındaki performans değerlendirmelerinde kritik bir faktördür. Çimento esaslı lifli kompozitler, yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında yapısal bütünlüklerini tehlikeye atabilecek önemli fiziksel ve kimyasal değişikliklere uğrarlar. Bu ayrışma süreci, çimento matrisine entegre edilen liflerin bileşimi ve özelliklerine bağlıdır. Özellikle, yüksek çekme mukavemeti sağladığı bilinen selülozik lifler, diğer lif türlerine kıyasla yüksek sıcaklıklarda daha fazla deformasyona meyillidir (Kısa vd., 2017).

Çimento matrisinin mikro yapısındaki değişiklikler, çimento bazlı lifli kompozitlerin yüksek sıcaklıklardaki davranışını büyük ölçüde belirler. Çimento matrisinin termal kararlılığı, yangın koşulları altında kompozitin mekanik özelliklerini muhafaza etmede eder. Araştırmalar, arayüzey bölgesinin mikro yapısının, yüksek sıcaklıklara tepkisi de dahil olmak üzere beton özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Mikro yapının bozulması, betonarme yapıların tasarımında hayati önem taşıyan basınç dayanımında bir azalmaya yol açar (Yıldırım vd., 2019). Yüksek sıcaklık koşullarında lif ile matris arasındaki yapışma değişiklikleri, kompozitin dayanıklılığı ve yapısal bütünlüğü üzerinde önemli etkiler yaratır.

Su kaybı ve kimyasal dehidrasyon süreçleri, çimento bazlı lifli kompozitlerin yüksek sıcaklıklardaki davranışının kritik yönlerindendir. Bu süreçler, malzemenin mukavemetinde ve dayanıklılığında önemli azalmalara neden olabilir. Çimento matrisinin dehidrasyonu, büzüşmeye ve mikro çatlakların oluşumuna yol açar, bu da kompozitin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkiler. Polipropilen lif ve alçı harçları üzerine yapılan çalışmalar, basınç ve bükülme mukavemeti, görünür gözeneklilik ve yüksek sıcaklık koşulları altındaki su emme kapasitesi su kaybının ve kimyasal dehidrasyonun malzemenin performansı üzerindeki etkisini göstermektedir (Klerk vd., 2020).

Çimento esaslı lifli kompozitlerin yüksek sıcaklıklara maruz kalması, özellikle basınç ve çekme mukavemetinde önemli azalmalara neden olur. Araştırmalar, yüksek hacimli uçucu kül, değişen oranlarda polipropilen lif ve kimyasal katkı maddelerinin eklenmesiyle, bu kompozitlerin oda sıcaklığında mekanik dayanımlarının artırılabilceğini göstermiştir. Ancak, yüksek sıcaklık koşulları altında, bu malzemeler yapısında yaşanan değişimlerle basınç ve çekme mukavemetlerinin bozulmasına yol açar. Bu durum, özellikle yüksek performans için tasarlanmış ve karışık lifler içeren çimento esaslı kompozitlerde belirgindir; bu kompozitler, oda sıcaklığında optimize edilmiş basınç dayanımı, süneklik ve tokluk özelliklerine rağmen yüksek sıcaklıklarda bu özelliklerde önemli azalmalar yaşar (Aydın ve Egemen, 2011).

Yüksek sıcaklıklar, çimento esaslı lifli kompozitlerin elastik modülü ve sünekliğindeki değişimleri de karmaşık hale getirir. Elastik modül, malzemenin stres altında elastik olarak deformasyon kapasitesini, süneklik ise önemli plastik deformasyona uğrama kapasitesini ifade eder. Bu özellikler, inşaat malzemelerinin sismik performansı ve genel dayanıklılığı için kritik önem taşır. Yüksek sıcaklıklar, çimento esaslı yüksek performanslı kompozit malzemelerde yumuşamaya neden olabilir, bu da elastik modüllerinde azalmaya yol açar. Bu yumuşama, betonun düşük çekme ve eğilme

dayanımı nedeniyle çatlak oluşumuna karşı doğal duyarlılığıyla birleştiğinde, malzemenin yapısal bütünlüğünü ve hizmet ömrünü ciddi şekilde tehlikeye atar. Nano malzemelerin ve yüksek performanslı hibrit liflerin kullanımı, bu etkileri azaltmayı amaçlayarak termal stabilite ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar arasında yer alır (Türk ve Kına, 2017).

Yüksek sıcaklıkların zararlı etkileri, çimento esaslı lifli kompozitlerin mekanik özelliklerinin ötesine geçerek termal genleşme davranışlarını ve çatlak oluşumuna karşı duyarlılıklarını da etkiler. Termal genleşme, malzemelerin hacminin sıcaklık artışına tepki olarak artmasını ifade eder ve kısıtlandığında iç gerilimlerin oluşmasına, ardından çatlak ve dökülmeye neden olabilir. Bu, özellikle inşaat malzemeleri için geçerlidir, çünkü dayanıklılık ve yapısal bütünlük doğrudan etkilenir. Çalışmalar, çelik lif katkılı betonlar gibi malzemelerde sıcaklık etkisinin önemli basınç dayanımı kaybına, gerilme-gerinim diyagramında değişikliklere ve termal kaynaklı çatlamaya karşı duyarlılığın artmasına neden olabileceğini göstermiştir (Taşdemir ve Bayramov, 2022).

2.5.4. Yüksek sıcaklık uygulamasının çimento esaslı lifli kompozitlerin dayanıklılığı üzerine etkileri

Çimento esaslı lifli kompozitlerin yüksek sıcaklıklara maruz kalması, mekanik dayanım ve sertlikte gözle görülür bir düşüşe neden olur. Bu olay, kompozitin iç yapısının yüksek termal koşullar altında daha da kötüleşen bozulmasına bağlanmaktadır. Mekanik mukavemet ve sertlikteki azalma, yalnızca kompozitlerin yapısal bütünlüğünü tehlikeye atmakla kalmaz, aynı zamanda uzun süre yüksek sıcaklıklara maruz kaldıkları ortamlarda uygulanabilirliğini de sınırlar (Güvensoy, 2005).

Yüksek sıcaklıkların çimento bazlı lifli kompozitlerin mikroyapısal özellikleri ve gözeneklilik üzerindeki etkileri, dayanıklılıklarını ve performanslarını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu etki, yeni fazların oluşumu ve mevcut gözeneklerin genişlemesi gibi değişikliklere yol açarak kompozitlerin yoğunluğunu ve su emme kapasitesini tehdit etmektedir (Yıldırım vd., 2019).

Çimento bazlı lifli kompozitlerde lifler ve matris arasındaki bağ kuvveti, kompozitin genel bütünlüğünü ve performansını korumak için çok önemlidir. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklara maruz kalmak, bu lif-matris arayüzünü ciddi şekilde bozabilir ve bu da bağ mukavemetinde bozulmaya yol açabilir. Bu bağın bozulması, lif ve matris malzemeleri arasındaki termal uyumsuzluğun bir sonucudur; bu durum, diferansiyel

genleşmeye, arayüzde gözenekliliğin artmasına ve kimyasal bağların zayıflamasına neden olabilir. Bağ mukavemetindeki bu bozulma özellikle zararlıdır çünkü matris ile lifler arasındaki yük aktarım verimliliğini azaltır, dolayısıyla kompozitin yapısal kapasitesinden ve stresleri etkili bir şekilde dağıtma yeteneğinden ödün verir (Er, 2012).

Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) fazlarının yüksek sıcaklıklar altında dehidrasyonu, çimento esaslı lifli kompozitlerin dayanıklılığını ve yapısal bütünlüğünü ciddi şekilde etkileyen bir süreçtir. Bu dehidrasyon, C-S-H yapısında kimyasal olarak bağlı olan suyun kaybına neden olarak, malzemenin mekanik özelliklerinde önemli bir azalmaya yol açar (Guo vd., 2019).

Portlandit [Ca(OH)_2], çimento bazlı malzemelerin kimyasında çok önemli bir rol oynar. Portland çimentosunun hidratasyonunun bir yan ürünü olarak oluşur ve çimento matrisi içindeki puzolanik reaksiyonları önemli ölçüde etkiler (Qarluq, Polat ve Karagöl, 2020). Yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, Ca(OH)_2 bir ayrışma sürecine girer, su buharı açığa çıkar ve kalsiyum okside (CaO) dönüşür. Bu termal ayrışma yalnızca kütledeki genel azalmaya katkıda bulunmakla kalmaz, aynı zamanda kompozitin gözenek yapısını ve bütünlüğünü de etkiler. Yüksek sıcaklıklar nedeniyle Ca(OH)_2 kaybı, malzemenin ikincil hidratasyon reaksiyonlarına girme yeteneğini azaltabilir, dolayısıyla uzun vadeli dayanıklılığını ve çevresel bozulmaya karşı direncini etkiler (Kökmen, 2022).

Çimento esaslı lifli kompozitlerde yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmanın bir sonucu olarak yeni fazların oluşması, dayanıklılıkları üzerinde belirgin bir etkiye sahiptir. C-S-H ve Ca(OH)_2 gibi orijinal bileşenlerin termal ayrışmasından kaynaklanan bu yeni fazlar, malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilir. Örneğin, Ca(OH)_2 'nin CaO 'ya dönüşümü ve ardından silika ile reaksiyona girmesi, belirli kimyasal saldırı türlerine karşı artan direnç sunabilecek yeni kalsiyum silikat fazlarının oluşumuna yol açar (Maheswaran vd., 2015). Ancak, dayanıklılık üzerindeki genel etki karmaşıktır ve çeşitli faktörlere bağlıdır:

- Orijinal kompozitin bileşimi.
- Maruz kalma sıcaklığı aralığı.
- Takviye liflerin varlığı ve bunların yüksek sıcaklıklara karşı direnci.

Çalışmalar, bazı yeni fazların malzemenin belirli çevresel koşullara karşı direncini artırabildiğini, aynı zamanda artan kırılganlık veya termal şoka karşı hassasiyet gibi güvenlik açıklarını da beraberinde getirebileceğini göstermektedir. Bu yeni fazların doğasını ve özelliklerini anlamak, çimento bazlı lifli kompozitlerin yüksek sıcaklık koşulları altında uzun vadeli performansını tahmin etmek demektir.

2.5.5. Çimento esaslı lifli kompozitlerde sülfat hücumu

Çimento bazlı lifli kompozitlere sülfat saldırısı, bu malzemelerin bütünlüğünü ve dayanıklılığını önemli ölçüde tehlikeye atan karmaşık kimyasal işlemleri içerir. Bu kimyasal saldırının merkezinde, dış su kaynaklarında bulunan sülfat iyonları ile betonda bulunan kalsiyum hidroksit arasındaki reaksiyon yer almaktadır. Bu etkileşim, beton matris içinde basınç uygulayan etrenjit ve alçıtaşı gibi genişleyen bileşiklerin oluşumuna yol açarak çatlamaya, dökülmeye ve mukavemet kaybına neden olur. Çimentodaki C_3A fazının varlığı bu reaksiyonlara karşı özellikle hassastır ve bozunma sürecini hızlandırır. Bu kimyasal dinamikleri anlamak, sülfat saldırısının kompozit malzemeler üzerindeki zararlı etkilerini hafifletmeye yönelik stratejiler geliştirmeyi sağlar (Zhao vd., 2020).

Çimento bazlı lifli kompozitlerin bozulmasına katkıda bulunan sülfat kaynakları, hem doğal hem de antropojenik kökenleri kapsayacak şekilde çeşitli ve yaygındır. Saldırıyı başlatmaktan sorumlu birincil sülfat türleri şunları içerir (Alcharchafche, 2022):

- Magnezyum sülfat, genellikle deniz suyunda ve bazı yeraltı sularında bulunur.
- Sodyum sülfat ve kalsiyum sülfat, tipik olarak toprakta ve endüstriyel atık sularda bulunur.

Bu sülfatlar su teması yoluyla betona sızar ve konsantrasyonları ve formları saldırının ciddiyetini belirler. Belirli sülfat türlerinin ve kaynaklarının belirlenmesi, beton yapılara yönelik riskin değerlendirilmesi ve uygun koruyucu önlemlerin tasarlanmasını gerektirir.

Çimento esaslı lifli kompozitlerdeki sülfat saldırısının hızını çeşitli faktörler etkiler ve bu da onu çok yönlü bir olgu haline getirir. Anahtar faktörler şunları içerir (Chen vd., 2017):

- Çimentoda yüksek miktarda C_3A bulunması sülfat saldırısını hızlandırır.
- Çimento, agrega, su ve katkı maddelerinin doğru orantılanması ve homojenliği duyarlılığı azaltabilir.
- Çevredeki sülfat konsantrasyonu ve suyun varlığı kritik değişkenlerdir.
- Daha düşük geçirgenlik, sülfat içeren suyun betona sızma hızını azaltır, böylece saldırı riskini azaltır.

Bu faktörlerin anlaşılması, sülfat saldırısının çimento bazlı lifli kompozitler üzerindeki zararlı etkilerini yavaşlatmak veya önlemek için etkili stratejiler geliştirmeyi sağlar.

Liflerin çimento esaslı kompozitlere entegrasyonu, bu malzemelerin basınç ve gerilme mukavemetleri dahil olmak üzere mekanik özelliklerini önemli ölçüde artırmıştır. Sentetikten doğal türlere kadar çeşitli liflerin kullanımı, çimento bazlı kompozitlerin matrisini güçlendirmiş ve bu malzemelerin arızalanmadan önce önemli ölçüde strese dayanabilmesini sağlamıştır. Ancak sülfat atağına maruz kalmak, bu mekanik dayanımlar için önemli bir tehdit oluşturmaktadır (Belgin, 2022). Çalışmalar, sülfat iyonlarının çimento matrisinin bileşenleri ile reaksiyona girerek, kompozitin iç yapısını zayıflatabilecek genişleyen ürünlerin oluşumuna yol açtığını göstermiştir. Bu reaksiyon sadece basınç dayanımını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda malzemenin çekme dayanımını da olumsuz etkileyerek genel yapısal bütünlüğü ve yük altındaki performansını tehlikeye atar. Bu mukavemetlerdeki azalma, bu kompozitlerden yapılan yapıların dayanıklılığını ve güvenilirliğini doğrudan etkilediği için mühim bir husustur (Tarhan, 2020).

Genleşme ve çatlamayı da içeren fiziksel görünüm değişiklikleri, sülfat saldırısının çimento bazlı lifli kompozitler üzerindeki zararlı etkilerinin göze çarpan göstergeleridir. Sülfat iyonlarının çimentolu matris ile etkileşimi, orijinal malzemelerden daha fazla hacim kaplayan ikincil bileşiklerin oluşumuna yol açar. Bu hacimsel genleşme, kompozitin yüzeyinde çatlaklar ve dökülmeler olarak kendini gösterir; bu durum yalnızca estetik görünümünü etkilemekle kalmaz, aynı zamanda daha fazla sülfat iyonu veya su gibi zararlı maddelerin daha fazla girişine yol açar. Genleşmenin neden olduğu çatlama, malzemenin bütünlüğünü tehlikeye atabilir ve ömrünü önemli ölçüde azaltabilir. Çimento bazlı malzemelerde çatlak gelişimi karmaşıktır ve su/çimento oranı ve sülfat saldırısının neden olduğu hasarın boyutunu azaltabilen veya artırabilen mineral katkıların varlığı dahil olmak üzere çeşitli karışım parametrelerinden etkilenir (Türk ve Kına, 2017).

Sülfat saldırısına maruz kalan çimento bazlı lifli kompozitlerden yapılan yapıların uzun vadeli dayanıklılık kaygıları önemlidir. Sülfat iyonları ve çimento matrisinin bileşenleri arasındaki kimyasal reaksiyonlar, yalnızca anında fiziksel ve mekanik bozulmaya yol açmakla kalmaz, aynı zamanda hızlandırılmış yaşlanma süreçlerine de zemin hazırlar. Genişleme sonucu oluşan çatlaklar, daha agresif maddelere kolay erişim sağlayarak daha fazla bozulmaya yol açar (Erten, 2009). Bu döngüsel bozulma, yapıların servis ömrünü önemli ölçüde azaltır, daha sık onarım ve hatta erken değiştirme gerektirir. Bu yapıların onarılması veya değiştirilmesiyle ilgili ekonomik ve çevresel maliyetler oldukça yüksektir; bu durum, sülfat saldırısına karşı direnci arttırılmış çimento bazlı lifli kompozitler tasarlamının önemini vurgulamaktadır. Düşük C₃A çimentosu kullanmak ve

belirli mineral katkı maddelerini dahil etmek, bu uzun vadeli dayanıklılık sorunlarını azaltmak için önerilen stratejilerdir (Tosun, vd., 2009).

Sülfat dirençli çimento ve tamamlayıcı çimento esaslı malzemelerin kullanımı, çimento bazlı lifli kompozitlerde sülfat atağının azaltılmasında önemli bir rol oynar. Bu strateji, özellikle bozunma riskinin önemli ölçüde arttığı yüksek sülfat içeriğine sahip ortamlarda etkilidir (Elahi vd., 2021). Sülfatların zararlı etkilerine doğası gereği direnen malzemelerin seçilmesiyle, beton yapıların dayanıklılığı ve uzun ömürlülüğü önemli ölçüde artırılabilir. Sülfat saldırısına karşı direncin arttırılmasına yönelik temel hususlar şunlardır (Tang vd., 2019)

- Sülfat bakımından zengin ortamlara dayanacak şekilde özel olarak tasarlanmış sülfata dayanıklı çimento çeşitlerinin kullanılması.
- Uçucu kül, cüruf veya silis dumanı gibi yalnızca kompozitin genel mukavemetine katkıda bulunmakla kalmayıp aynı zamanda sülfat iyonlarına karşı geçirgenliğini de azaltan tamamlayıcı çimentolu malzemelerin dahil edilmesi.
- Daha düşük oranlar, zararlı maddelere karşı daha az geçirgen olan daha yoğun betona yol açtığından, su/çimento oranının optimize edilmesi.

Bu önlemler, sülfat saldırısına yol açan kimyasal reaksiyonların önlenmesi zorlu koşullarda çimento bazlı lifli kompozitlerin bütünlüğünü ve işlevselliğini korumaktadır.

Su girişini ve sülfatlara maruz kalmayı en aza indirmeyi amaçlayan tasarım ve inşaat uygulamaları, çimento bazlı lifli kompozitlerin sülfat saldırısına karşı korunması için gereklidir. Bu hedefe ulaşmaya yönelik etkili stratejiler şunları kapsar (Liu vd., 2017):

- Sülfatça zengin suyun beton yakınında birikmesini önlemek için beton yapıların uygun drenaj sistemleriyle tasarlanması. Buna, suyu yapıdan uzaklaştıran eğimlerin ve su yalıtım membranlarının kullanımı da dahildir.
- Düşük su/çimento oranlarının kullanılması ve beton karışımının iyice sıkıştırılması gibi betonun geçirgenliğini azaltan inşaat tekniklerinin uygulanması. Bu teknikler, sülfat penetrasyonuna daha az eğilimli olan yoğun bir matrisin oluşumunu kolaylaştırır.
- Su ve sülfat iyonlarına karşı bariyer oluşturan yüzey işlemlerinin veya kaplamaların uygulanması. Bu işlemler sülfat giriş oranını önemli ölçüde azaltarak kompozit malzemeyi daha da koruyabilir.

Dikkatli tasarım ve inşaat uygulamaları yoluyla sülfat saldırısının temel nedenlerini ele alarak, çimento bazlı lifli kompozitlerin ömrü uzatılabilir ve sülfata maruz kalan ortamlarda performansları garanti altına alınabilir.

Kimyasal inhibitörler ve koruyucu kaplamalardaki ilerlemeler, çimento bazlı lifli kompozitlerin sülfat saldırısına karşı direncini arttırmanın başka bir yolunu temsil etmektedir. Bu teknolojiler, bozulmaya yol açan kimyasal reaksiyonları engellemek ve böylece kompozitin yapısal bütünlüğünü korumak için tasarlanmıştır (Guo vd., 2020):

- Sülfat iyonlarını nötralize etmek veya bunların çimento matrisi ile reaksiyonunu önlemek için beton karışımına kimyasal inhibitörler eklenebilir. Bu inhibitörler, zararsız bileşikler oluşturmak için sülfatlarla reaksiyona girerek veya potansiyel kimyasal reaksiyon bölgelerini bloke ederek çalışır.
- Beton yapıların yüzeyine uygulanan koruyucu kaplamalar sülfat nüfuzuna karşı fiziksel bir bariyer oluşturur. Modern kaplamalar son derece etkilidir ve yüksek düzeyde sülfatlar da dahil olmak üzere belirli çevresel sorunlara çözüm bulmak üzere uyarlanabilir.
- Bu teknolojilerin devam eden gelişimi, çimento bazlı lifli kompozitlerin agresif ortamlarda dayanıklılığının artırılması için çok önemlidir. Endüstri, malzeme seçimi, tasarım ve yapım stratejileri ile kimyasal inhibitörlerin ve koruyucu kaplamaların kullanımını birleştirerek bu kompozitleri sülfat saldırısının zararlı etkilerinden daha iyi koruyabilir.

2.5.6. Farklı sülfat türlerinin çimento esaslı lifli kompozitlerin dayanıklılığına etkileri

Çimento hidratasyon reaksiyonlarının hızlandırılması, çimento bazlı lifli kompozitlerin performansını iyileştirmekte etkilidir. Nano ölçekte modifiye edilmiş silika eklenmesi, Tasarlanmış Çimentolu Kompozitlerin (ECC) kürleme aşamasında kendi kendini iyileştirme davranışını önemli ölçüde etkiler. Bu yetenek, zamanla oluşabilecek çatlakları kapatarak kompozitlerin dayanıklılığına ve uzun ömürlülüğüne doğrudan katkıda bulunur. Hızlandırıldığında daha yoğun ve sağlam bir matrisle sonuçlanan çimento hidratasyon reaksiyonları, kompozitlerde mukavemet geliştirilmesi için temel bir süreçtir. Bu süreç, hidratların çökmesini sağlayarak agregaları ve lifleri birbirine bağlayan sertleştirilmiş bir matris oluşturur. Bu hızlandırılmış hidrasyon süreci,

kompozitlerin ilk sertleşmesini ve sertleşmesini iyileştirmekle kalmaz, daha birbirine bağlı ve geçirimsiz bir mikro yapıyı teşvik ederek mekanik özelliklerini de geliştirir (Keskinates, 2022).

Farklı sülfat türlerinin çimento esaslı lifli kompozitlerin mikro yapısı üzerindeki etkisi, hem derin hem de çok yönlüdür. Hidrasyon reaksiyonunun bir yan ürünü olan kalsiyum hidroksit (CH), kompozitin mukavemetine direkt etkisi olmasa da beton içinde önemli bir yapı oluşturur. Sülfatlar, mikro yapının bütünlüğüne hem fayda sağlayabilecek hem de zarar verebilecek etrenjit oluşturmak üzere CH ile etkileşime girer. Başlangıçta etrenjit oluşumu, mikro yapının yoğunlaşmasına katkıda bulunarak kompozitin dayanıklılığını artırır. Ancak, aşırı oluşum veya gecikmiş etrenjit oluşumu, iç genleşmeye neden olarak mikro çatlaklara ve dolayısıyla kompozit yapının zayıflamasına yol açabilir. Ayrıca, polipropilen lifin matrise entegrasyonu, çimento matrisini güçlendirerek ve çatlak ilerlemesine karşı direncini artırarak mikroyapısal özellikleri değiştirdiği gösterilmiştir. Sülfat türleri ile kompozitin mikro yapısı arasındaki bu etkileşim, çimento bazlı malzemelerin gücü, dayanıklılığı ve çevresel bozulmaya karşı direncini dengeleyen tasarımının karmaşıklığını gösterir (Rong vd., 2014).

Çimento bazlı lifli kompozitlerin çeşitli çevresel koşullar altında gösterdiği uzun vadeli dayanıklılık, üstün bileşimlerinin kanıtıdır. Yapılan çalışmalar, bu kompozitlerin yüksek sıcaklıklara, yangına ve ultraviyole etkilere karşı mükemmel direnç sergilediğini ve hizmet ömrünü önemli ölçüde uzattığını göstermiştir. Farklı tipte liflerin tek başına veya kombinasyon halinde birleştirilmesi, bu dayanıklılık seviyesine ulaşmada önemli bir etkidir (Erten, 2016). Özellikle lif takviyesi, kompozitin yapısal bütünlüğünden ödün vermeden, kontaminasyon ve bakteriyel etkiler gibi çevresel stres faktörlerine dayanma yeteneğini artırır. Ek olarak, su ve hava döngülerine maruz kalma dahil sertleştirme koşulları, hidrasyon sürecini ve dolayısıyla malzemenin nihai özelliklerini etkileyerek kompozitin esnekliğini daha da artırır. Bu bulgular, çimento bazlı lifli kompozitlerin uzun vadeli performansının değerlendirilmesinde sadece malzeme bileşiminin değil, aynı zamanda çevresel faktörlerin ve kütleme rejimlerinin de önemli olduğunu gösterir (Yıldırım, vd., 2019).

Çimento bazlı lifli kompozitlerde kalsiyum sülfatın mukavemet gelişimine katkısı, onun su-çimento (W/C) oranını etkileyerek kompozitin genel performansını belirleyici bir mineral katkı maddesi olarak ön plana çıkarır. Kalsiyum sülfatın eklenmesi, etkili hidrasyon reaksiyonlarını destekleyen optimize edilmiş bir matrise yol açarak bu oranın uygun şekilde ayarlanmasını kolaylaştırır. Bu optimizasyon, kompozitin

mukavemetinin zaman içinde geliştirilmesi açısından belirleyicidir. Kalsiyum sülfatın varlığı, çimento matrisi içinde daha ince bir mikro yapıya katkı sağlar ve lifli malzemelerin daha düzgün dağılımını teşvik eder (Gödek vd., 2016). Bu düzgünlük, kompozitin çekme gerilimine dayanma ve gelişmiş dayanıklılık gösterme yeteneği ile doğrudan ilişkilidir ve daha yüksek çoklu çatlama oranına ulaşılmasını sağlar.

Çimento bazlı lifli kompozitlerde sülfat direnci ve hasarın azaltılması, bunların ömrünü ve güvenilirliğini doğrudan etkiler. Özellikle magnezyum sülfat ($MgSO_4$) gibi sülfatlar, etrenjit gibi genişleyen bileşiklerin oluşumuna yol açan kimyasal reaksiyonlar yoluyla çimentolu malzemelerde önemli deformasyonlara neden olabilir. Bu reaksiyonlar sıklıkla kompozit malzemenin çatlamasına, parçalanmasına ve genel olarak bozulmasına neden olur. Ancak kalsiyum sülfat gibi belirli sülfat türlerinin kontrol edilen oranlarda kullanılması, bu olumsuz etkileri önemli ölçüde azaltabilir. Kalsiyum sülfatın eklenmesi, hidrasyon sürecini düzenleyerek, sülfat hasarına karşı daha yoğun ve geçirimsiz bir matris oluşturur. Bu özellik, özellikle sülfatlara maruz kalmanın kaçınılmaz olduğu ortamlarda, örneğin deniz veya yer altı inşaatlarında, faydalıdır (Demir vd., 2022).

Kalsiyum sülfatın diğer kompozit malzemelerle birleştirilmesi, daha gelişmiş çimento bazlı lifli kompozitlerin geliştirilmesine olanak tanır. Mühendisler ve araştırmacılar, farklı lif türlerinin ve mineral katkı maddelerinin benzersiz özelliklerini kullanarak, özel uygulamalara uygun kompozitler tasarlar. Örneğin, yüksek hacimli uçucu kül, çimento ve kalsiyum sülfat içeren bir matrisle polipropilen liflerin birleştirilmesi, üstün dayanıklılık, azaltılmış geçirgenlik ve artırılmış esneklik gibi özellikler gösteren kompozitlerle sonuçlanabilir. Bu sinerjistik etkiler, kompozitlerin sadece mekanik mukavemetine ve dayanıklılığına katkı sağlamakla kalmaz, aynı zamanda sıcaklık değişimleri ve kimyasal maruziyet gibi çevresel faktörlere karşı dirençlerini de artırır. Kalsiyum sülfatın diğer malzemelerle stratejik kullanımı, çimento bazlı lifli kompozitlerin çok çeşitli inşaat uygulamaları için daha etkili ve güvenilir olmasını sağlar (Türk ve Kına, 2017).

2.6. İkili Dayanıklılık Problemleri

Nem ve su emilimi ile çimento bazlı lifli kompozitlerin bütünlüğü arasındaki etkileşim, bu malzemelerin dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü artırma adına çalışma alanıdır. Nem girişi, aşağıdaki önemli bozunma mekanizmalarına yol açar (Ramazanoğlu ve Kaya, 2024):

- Liflerin şişmesi,
- Boşluk yapısının artması,
- Lifler ile çimento matrisi arasındaki bağlanma mukavemetinin azalması.

Bu etkiler, özellikle nem seviyesinin yüksek olduğu veya kompozitlerin sıklıkla suya maruz kaldığı ortamlarda belirgindir. Kür koşulları, bu kompozitlerin bükülme davranışında çok önemli bir rol oynar. Uygun kürleme, aşağıdaki sonuçları sağlar (Kökmen, 2022):

- Boşlukların en aza indirgenmesi,
- Kompozitin neme bağlı hasara karşı direncinin artırılması,
- Malzemenin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi,
- Hizmet ömrünün uzatılması.

Sıcaklık dalgalanmaları, lifli kompozitlerin ömrünü ve performansını önemli ölçüde etkiler; hem yüksek hem de düşük sıcaklıklar farklı zorluklar yaratır. Yüksek sıcaklıklarda, liflerin ve çimento matrisinin termal genişmesi önemli ölçüde farklılık gösterir, bu da aşağıdaki sorunlara yol açar (Açıkel, 2017):

- Mikro çatlamların tetiklenmesi,
- Kompozitin yapısal bütünlüğünün tehlikeye atılması.

Tersine, düşük sıcaklıklar, malzemelerin büzülmesine neden olabilir ve özellikle bu tür gerilimlere dayanacak şekilde tasarlanmamış kompozitlerde, esnekliğin azalmasıyla çatlama riskinin artmasına neden olabilir. Mineral katkı maddelerinin varlığı ve su/çimento oranı, kompozitin sıcaklığın neden olduğu gerilimlere direnme kabiliyetini belirler. Uygun mineral katkı maddelerinin seçimi ve su/çimento oranının dikkatli kontrolü, çimento esaslı lifli kompozitlerin ısı direncini artırmak için temel stratejilerdir (Tonoli vd., 2019).

Kimyasallara maruz kalma, çimento bazlı lifli kompozitlerin dayanıklılığını ve performansını etkileyen başka bir önemli faktördür. Kimyasallar kompozit malzemelerle çeşitli yollarla etkileşime girerek, aşağıdaki sorunlara neden olabilir:

- Liflerin bozulması,
- Çimento matrisinin ayrışması,
- Lif-matris yapışmasının kaybolması.

Bu kimyasal etkileşimler özellikle kompozitlerin asitler, bazlar veya tuzlar gibi agresif kimyasallara maruz kaldığı ortamlarda geçerlidir. Kompozitte kullanılan lif türü, kimyasal direnci belirlemede önemli bir rol oynar. Araştırmalar, karışık liflerin

kullanılmasının, kompozitin kimyasal saldırılara karşı direncini artırabildiğini ve böylece zorlu çevre koşullarında kullanım ömrünü uzatabildiğini göstermiştir. Karışık lif kombinasyonlarının kullanılması, çimento bazlı lifli kompozitlerin kimyasal direncini artırmak ve kimyasal olarak agresif ortamlarda kullanımları için daha uygun hale getirmek adına kanıtlanmış bir yaklaşımdır (Nguyen vd., 2019).

2.6.1. Yüksek sıcaklık ve sülfat hücumunun ikili etkisi ve lifli kompozitlerin davranışı

Lifli kompozitlerin yüksek sıcaklıklara maruz kalması, termal bozulma nedeniyle mekanik özelliklerinde önemli değişikliklere yol açar. Bu değişimler, kompozit malzemelerin bileşimi ve yapısından belirgin şekilde etkilenir. Özellikle, lifler ile matris arasındaki bağın bütünlüğü, kompozitin mukavemetini ve sertliğini belirleyen kritik faktörlerdendir. Ara yüzeydeki yüksek bağlanma veya yapışma, kompozitin yapısal bütünlüğünü koruduğunu gösterirken, düşük bağlanma, termal stres altında yapısal zayıflığa ve sertlik kaybına yol açabilir. Ayrıca, liflerin çekme ve basınç dayanımları ile yorulma dayanıklılıkları, bu malzemelerin termal zorluklara nasıl tepki vereceğini belirlemede önemlidir. Bu nedenle, termal bozulma ile lifli kompozitlerin mekanik özellikleri arasındaki ilişkinin anlaşılması, yüksek sıcaklıktaki ortamlarda performanslarının optimize edilmesi sağlar (Liang vd., 2015).

Yüksek sıcaklıklar, sadece lifli kompozitlerin mekanik özelliklerini değil, aynı zamanda fiziksel yapılarını ve bileşimlerini de etkiler. Malzemelerin ısıtıldığında genleştiği ve bu genleşmenin, kompozit malzeme içinde mikro çatlaklara ve tabakaların ayrılmasına neden olabileceği bilinir. Bu durum, fiziksel özellikleri değiştirir ve potansiyel olarak malzemenin bütünlüğünü tehlikeye atar. Kompozit içerisindeki lif oranı, kompozitin termal stres altındaki davranışını belirgin şekilde etkiler. Kullanılan lif türü ve miktarı, kompozitin sıcaklığa bağlı değişikliklere dayanma kapasitesini belirler; bu da, termal direnci artırmak için malzemelerin dikkatlice seçilmesi ve orantılanmasına dikkat çeker (Kalyoncu, 2007).

Lifli kompozitlerin yüksek sıcaklıklara uzun süreli maruz kalması, performanslarının kritik bir yönüdür. Çalışmalar, yüksek sıcaklık altında, özellikle cüruf katkı maddeleri ile güçlendirildiğinde, SIFCON (bulamaç infiltrasyonlu lif beton) kompozitlerinin bükülme performansının önemli ölçüde etkilenebileceğini göstermiştir. Uzun süreli termal maruziyet, kompozitlerin dayanıklılığında bozulmaya yol açabilir, bu

da uzun süreli termal stabilite gerektiren uygulamalar için önemli bir endişe kaynağıdır. Yüksek sıcaklıkların kompozitlerin yorulma davranışı üzerindeki etkisi, bu malzemelerin zaman içinde termal strese nasıl tepki vereceğinin derinlemesine anlaşılmasını gerektirir. Lifli kompozitlerin yüksek sıcaklıktaki ortamlarda uzun vadeli dayanıklılığını sağlamak, malzeme seçimi, tasarım ve işleme tekniklerine kapsamlı bir yaklaşım gerektirir (Canbaz ve Ünüvar, 2016).

Sülfat iyonları ile kompozit malzemeler arasındaki etkileşim, malzemelerin bütünlüğünü ciddi şekilde tehlikeye atabilecek kimyasal reaksiyonları tetikler. Kompozitlerin bulunduğu çevre koşullarında yaygın olan sülfat iyonları, kompozit malzemenin bileşenleriyle reaksiyona girerek matrise sızabilir ve kompozitin yapısı üzerinde zararlı etkileri olan yeni bileşiklerin oluşumuna neden olabilir. Özellikle çimento bazlı kompozitlerde, sülfat iyonlarının kalsiyum alüminatla reaksiyonu, matris içinde genleşmeye ve çatlamaya yol açan alçı ve etrenjit gibi bileşiklerin oluşumuna sebep olur. Bu süreç, malzemeyi içten zayıflatmanın yanı sıra, daha fazla bozulmaya ve dış etkenlerden kaynaklanan hasarlara karşı daha duyarlı hale getirir (Eren vd., 2023).

Kompozit matrisin ve lif-matris arayüzeyindeki bağ kuvvetinin bozulması, lifli kompozitlerin performansını ve dayanıklılığını önemli ölçüde etkileyen bir husustur. Sülfat saldırısı ve yüksek sıcaklıklar gibi zorlu ortamlara maruz kalındığında, lifler ve matris arasındaki yapışkan bağ zayıflayabilir veya bozulabilir. Bu bozulma, lif ve matris arasındaki termal genleşme uyumsuzluğundan ve ayrıca matris malzemesinin kendisinin kimyasal olarak bozunmasından kaynaklanır (Esendemir ve Caner, 2018). Lif-matris arayüzündeki bağ gücü tehlikeye girdiğinde:

- Lifler ile matris arasındaki yük aktarım verimliliği azalır.
- Kompozitin dış yüklere ve gerilimlere dayanma yeteneği önemli ölçüde azalır.
- Ara yüzeyde yayılabilen ve birleşebilen mikro çatlaklar oluşabilir, bu da delaminasyon ve lif çekilmesi gibi makroskobik arızalara yol açabilir.

Bu hasar mekanizmaları, kompozitin yapısal bütünlüğünü ve mekanik özelliklerini ciddi şekilde zayıflatır, onu daha az güvenilir hale getirir ve hizmet ömrünü kısaltır (Wu vd., 2017).

Lifli kompozitlerdeki aşınmanın hızlanması ve bunun sonucunda hizmet ömründe meydana gelen azalma, yüksek sıcaklık ve sülfat saldırısının birleşik etkilerinin doğrudan bir sonucudur. Sürekli maruz kalınan bu koşullar, daha hızlı malzeme bozulmasına yol açar; bu durum aşağıdaki özelliklerle karakterize edilir (Seyrek, 2016):

- Artan yüzey aşınması ve malzeme kaybı.
- Kompozitin yapısal bileşenlerinin aşamalı olarak zayıflaması.
- Mekanik ve çevresel hasarlara karşı artırılmış duyarlılık.

Çalışmalar, çeşitli yüklerin etkisi altında, uzun süre çevre koşullarına maruz kalan kompozit malzemelerde aşınma yüzdesinin önemli ölçüde artabileceğini göstermiştir. Bu hızlandırılmış aşınma, yalnızca kompozitin görünümünü ve yüzey kalitesini etkilemekle kalmaz, aynı zamanda mekanik performansını ve işlevselliğini de azaltır ve sonuçta malzemenin etkin ömrünün azalmasına yol açar.

Lifli kompozitler, üstün mekanik özellikleri ve yapısal bütünlükleri sayesinde çeşitli sektörlerde giderek artan bir kullanıma sahiptir. Ancak, yüksek sıcaklıklarda kimyasal bozunmaya olan hassasiyetleri, önemli bir zorluk teşkil eder. İşlevselleştirilmiş nanokil ilavesiyle yapılan çalışmalar, cam-keklar lif/epoksi hibrit kompozitlerin darbe davranışını artırmış ve bu malzemelerin kırılabilirliğini azaltmada umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Bu yaklaşım, yalnızca kimyasal bozunma ile ilgili endişeleri gidermekle kalmaz, aynı zamanda aşırı termal koşullara maruz kalan lifli kompozitlerin genel dayanıklılığını artırma potansiyeline de sahiptir (Hussein vd., 2018).

Yüksek sıcaklık ve sülfat saldırısının lifli kompozitlerin mekanik özellikleri ve yapısal bütünlüğü üzerindeki birleşik etkisi, detaylı bir anlayış ve yenilikçi çözümler gerektiren karmaşık bir konudur. Özellikle, çekme mukavemeti gibi kritik bir mekanik parametre, bu koşullar altında ciddi şekilde risk altındadır. Karışık liflerin beton karışımlarına dahil edilmesiyle yapılan çalışmalar, çekme mukavemetinin artırılabilirliğini göstermiştir. Bu bulgu, çevresel stres faktörlerinin yarattığı olumsuz etkileri hafifletmek için kullanılabilecek potansiyel bir stratejiyi işaret etmektedir (Türk, 2022).

Lifli kompozitlerin çevresel stres faktörlerine karşı direncini artırmak, hizmet ömrünü ve uygulama yelpazesini genişletmek açısından kritik önem taşır. Lif seçimini etkileyen hafiflik, mukavemet, elastisite modülü ve yorulma mukavemeti gibi faktörler, kompozit yapının çevresel streslere karşı göstereceği performansta belirleyici rol oynar. Cam lif takviyeli polyeşter kompozitler üzerine yapılan çalışmalar, farklı lif oranlarının ve deniz suyuna maruz kalmanın yorulma davranışları üzerindeki etkilerini kapsamlı olarak incelemiştir. Elde edilen bulgular, daha iyi dayanıklılık için lif içeriğinin optimize edilmesi yönünde değerli bilgiler sunar. Bu stratejilerde, lifli kompozitlerin tasarımında, hem malzeme bileşimi hem de çevresel zorluklar dikkate alınmaktadır (Bingöl ve Çavdar, 2016).

3. YÖNTEM ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Deney kapsamında teste tabi tutulan numunelerin üretimi aşamasında kullanılan malzemeler olan; CEM I 42,5 N Normal Portland Çimento, agrega, su, kimyasal katkı (hiper akışkanlaştırıcı), polipropilen lif, çelik lif, silis dumanı, sodyum sülfat ve potasyum sülfata ilişkin bilgilere aşağıda yer verilmiştir.

3.1.1. Çimento

Bu tez çalışmasında bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42,5 N tipi Portland çimentosu tercih edilmiştir. Kullanılan çimento, yüksek klinker içeriğine (%95'ten fazla) sahip olup, yalnızca %5'in altında minör ilave bileşen içermektedir. Bu çimentonun tercih edilme nedeni, doğrudan çalışmanın deneysel amacı ile ilişkilidir. Tez kapsamında, çimento esaslı lif takviyeli kompozitlerin 600 °C yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra, sodyum sülfat (Na_2SO_4), potasyum sülfat (K_2SO_4) ve normal su içeren kür ortamlarında, farklı kür yaşlarında (7, 28 ve 90 gün) dayanım performansları incelenmiştir. Yüksek sıcaklık sonrası oluşabilecek serbest kireç (CH) miktarındaki artış, mikroyapı bozulmaları ve çatlak oluşumları gibi etkiler, kullanılan çimentonun kalitesiyle doğrudan ilişkilidir.

Ayrıca bu çimento, çalışmada kullanılan silis dumanı ile kimyasal olarak uyumludur. Silis dumanı, çimentonun CH hidrasyon ürünüyle reaksiyona girerek ikincil C-S-H jel oluşumunu desteklemekte ve özellikle sülfatlı ortamlarda dayanımı artırıcı etkiler göstermektedir. CEM I 42,5 N çimentosunun bu tür mineral katkılarla birlikte kullanılmaya uygun olması, deneysel tasarımda aranan önemli bir kriter olmuştur. Sonuç olarak, CEM I 42,5 N çimentosu; yüksek dayanım potansiyeli ve katkılarla uyumluluğu sayesinde, bu çalışmanın deneysel tasarımına en uygun bağlayıcı malzeme olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca TS EN 197-1 standardına uygunluğu sayesinde, laboratuvar koşullarında standartlara uygun numune üretimi gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.1'de çalışmada kullanılan Normal portland çimentosu (CEM I 42.5) ile silis dumanının temel kimyasal bileşenlerini ve bazı fiziksel karakteristiklerini göstermektedir.

Çizelge 3.1. Normal portland çimentosu ve silis dumanı fiziksel özellikleri ve kimyasal kompozisyonları

Kimyasal Kompozisyon	Normal Portland Çimento	Silis Dumanı
CaO (%)	65.70	0.62
SiO ₂ (%)	21.60	91.96
Al ₂ O ₃ (%)	4.10	1.20
Fe ₂ O ₃ (%)	0.26	0.84
MgO (%)	1.30	1.02
SO ₃ (%)	3.30	0.22
K ₂ O (%)	0.77	1.16
Na ₂ O (%)	0.19	0.67
Kızdırma Kaybı (%)	3.20	1.86
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	25.9	94.0
BET Yüzey Alanı, m ² /kg	-	-
Özgül Yüzey Alanı, m ² /kg	460	19080

3.1.2. Silis dumanı

Bu çalışmada mineral katkı olarak Antalya Eti Elektrometalurji A.Ş. tesislerinde elde edilen silis dumanı kullanılmıştır. Mikrosilika, densified ve undensified olarak üzere iki türde bulunan biçimsiz SiO₂ partiküllerinden meydana gelen, yapı kimyasalları, refrakter ve inşaat endüstrilerinde kullanılan, ASTM C-1240 kurallarını sağlayan bir mineral katkıdır.

3.1.3. Agregası

Deneyisel çalışmada maksimum agregası tane boyutu 2 mm olan dere agregası kullanılmıştır. Kullanılan agregaya ait görsel Şekil 3.1.'de verilmiş olup, agregaya ait elek analizi sonuçları Çizelge 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Deneyde kullanılan agregaya ait görsel

Çizelge 3.2. Kum elek analizi sonuçları

Elek Açıklıkları (mm)	Elek Üzerinde Kalan Miktar (gr)	Elek Üzerinde Kalan Miktar %	Elek Üzerinde Kalan Yığılmı Miktar %	Elekten Geçen Miktar %
2	0	0	0	100
1	74	4	4	96
0,5	389	23	27	73
0,25	940	54	81	19
0,125	283	16	98	2
0	42	2	100	0

3.1.4. Çelik lif

Çalışmada iki adet çelik lif kullanılmış olup, ilki Bekaert firmasına ait Dramix OL kodlu 6 mm uzunluğunda ve 0,16 mm çapında pirinç kaplı çelik lif kullanılmıştır (Şekil 3.2). Nominal çekme mukavemeti 3000 N/mm^2 , young modülü 200 GPa dır. Diğer lif ise, Kemerix firmasına ait çapı 0,35 mm uzunluğu 6 mm olan çekme dayanımı $3437,5 \text{ N/mm}^2$ olan çelik lif kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.2. Deney esnasında kullanılan ve 16 mikron çapa sahip pirinç kaplı çelik life ait görsel



Şekil 3.3. Deney esnasında kullanılan ve 35 mikron çapa sahip pirinç kaplı çelik life ait görsel

3.1.5. Polipropilen lif

Mevcut çalışmada çelik liflere ilave olarak, Polyfiber firmasından temin edilen 6 mm boyunda ve 30 mikron çapında polipropilen lif kullanılmıştır. Lif, EN 14889 Bölüm II Tip 1A ve ASTM C1116 Tip III standartlarını karşılamakta olup, liflerin belirli kalite

ve performans kriterlerini karşıladığını gösterir. %100 saf polipropilen, bu liflerin kimyasal olarak dirençli, dayanıklı ve hafif olmasını sağlar. %100 saf polipropilen mikro lifler, yüksek sıcaklık ve sülfat etkisine karşı mükemmel direnci ve diğer birçok avantajı ile çimento esaslı lifli kompozitler için ideal bir takviye malzemesidir. Bu özellikler, bu liflerin aşırı koşullara maruz kalan yapılarda kullanılmasını ideal hale getirir. Life ait görsel Şekil 3.4'te ve fiziksel ve mekanik özellikler ise Çizelge 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Deney esnasında kullanılan polipropilen life ait görsel

Çizelge 3.3. Propilen lifin özellikleri

Malzeme	Tip	Safılık	Standart	Çekme Dayanımı	Elastisite Modülü	Uzama
%100 saf polipropilen	Monofilament mikro lif	Olefinsiz, poliadmitsiz, naylonsuz 1. sınıf saf Polipropilen	EN 14889 Part II Type 1A, ASTM C1116	Type III	467 - 548 MPa	4048 - 5674 MPa
Özgül Ağırlık	Sağlamlık	Erime Noktası	Yüzey Alanı	Asit / Alkali Dayanımı	Çimento Uyumu	Emilim
%20 - 25	0.91 gram / cm ³	Transparan	120 milyon + / kg	140 m ² /kg	Mükemmel	Mükemmel

3.1.6. Kimyasal katkı

Deneysel çalışmalarda betonun işlenebilirliğini artırmak maksadıyla Master Builder Solutions firmasına ait ve TS EN – 934 – 2 standartlarına uygun şekilde üretilen MasterGlenium 51 isimli yeni nesil hiper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Deney esnasında kullanılan yeni nesil hiper akışkanlaştırıcıya ait teknik özelliklere Çizelge 3.4.'te yer verilmiştir.

Çizelge 3.4. Deneyde kullanılan yeni nesil hiper akışkanlaştırıcı ait teknik özellikler

Teknik Özellikler	
Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik Eter Esaslı
Görünüm	Kahverengi – Sıvı
Özgül Ağırlık (20°C’de)	1.082 – 1.142 kg/lt
pH Değeri	6 – 7
Alkali İçeriği (%)	≤ 3,00 (ağırlıkça)
Klor İyon İçeriği (%)	≤ 0,10 (ağırlıkça)
Korozyon Davranışı	Sadece EN934-1:2008, EkA.1’de verilen bileşenleri kapsar

3.1.7. Su

Yürütülen deneysel çalışmalar esnasında betonun hazırlanması ve oluşturulan numunelerin kür havuzunda bekletilmesi için Batman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi’ne ait Yapı Malzemesi Laboratuvarında bulunan içilebilir musluk suyu kullanılmıştır. Deney süreci boyunca kullanılan şebeke suyu içilebilir niteliğe sahip ve TS EN 1247 standartlarına uygundur. Deneyde Batman ili şebeke suyu kullanılmıştır.

Çizelge 3.5. Şebeke suyuna ait özellikler

pH	7.0 - 8.5 (Nötr ila hafif alkali)
Toplam Çözünmüş Katı Maddeler	200 - 500 mg/L (Orta derecede sert)
Klor	0.5 - 1.0 mg/L (Dezenfeksiyon için kullanılır)
Sülfat	200 - 300 mg/L (Orta seviyede)
Nitrat	10 - 50 mg/L (Düşük seviyede)
Nitrit	0.1 mg/L'den az (Çok düşük seviyede)
Kalsiyum	50 - 100 mg/L (Orta seviyede)
Magnezyum	10 - 20 mg/L (Düşük seviyede)

Sodyum	50 - 100 mg/L (Orta seviyede)
Potasyum	2 - 10 mg/L (Düşük seviyede)
Bakır	0.05 mg/L'den az (Çok düşük seviyede)
Kurşun	0.01 mg/L'den az (Çok düşük seviyede)
Demir	0.3 mg/L'den az (Çok düşük seviyede)

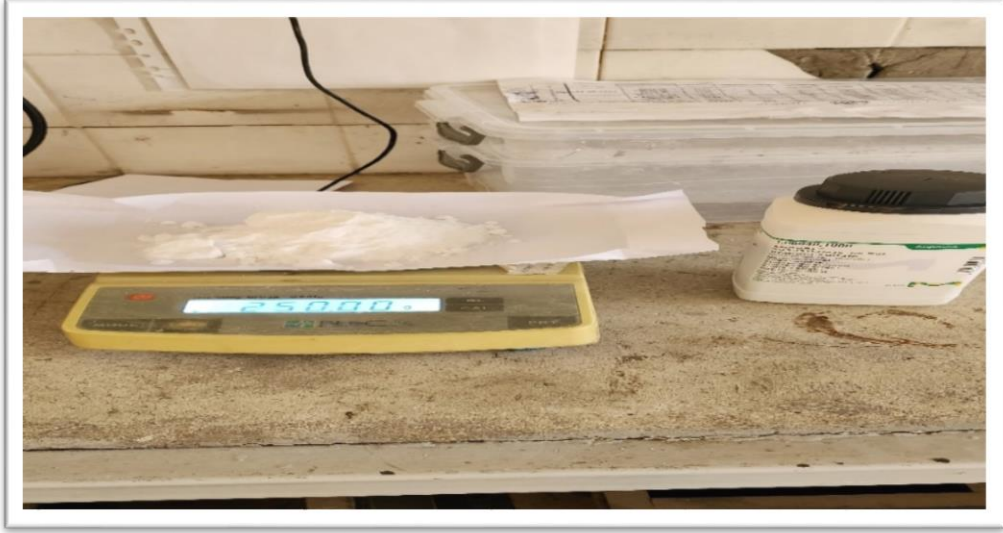
3.1.8. Sülfat

3.1.8.1. Sodyum sülfat

Çalışma kapsamında hazırlanan beton numunelerin maruz kalacağı sülfat türlerinden birini teşkil eden sodyum sülfat için; MERCK İlaç Ecza ve Kimya Tic. A.Ş.'ne ait 1.06649 ürün numaralı sodyum sülfat ürünü kullanılmıştır. Bahse konu sodyum sülfat ürününe yönelik teknik özelliklere Çizelge 3.6.'de yer verilmiştir.

Çizelge 3.6. Deneyde kullanılan sodyum sülfata ait teknik özellikler

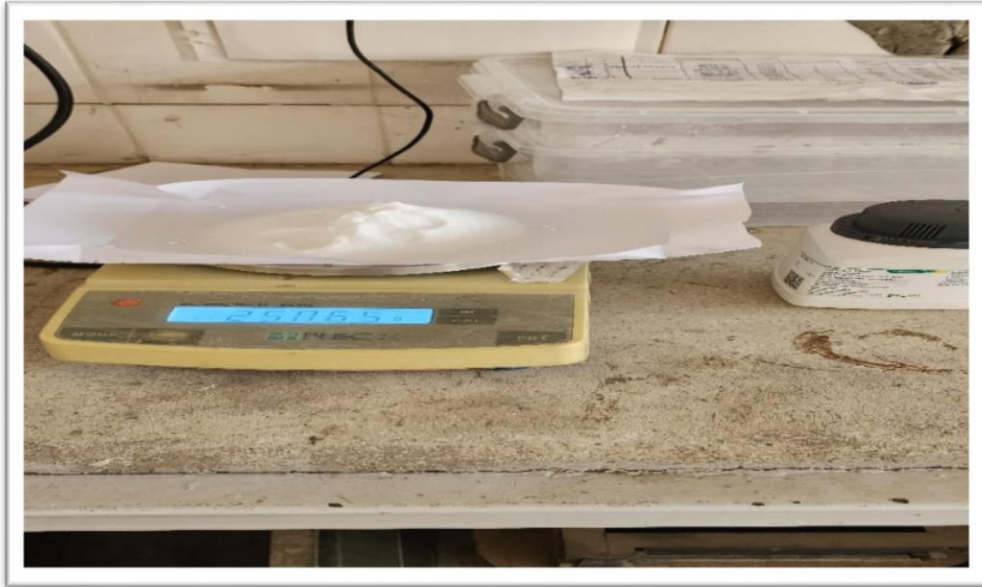
Teknik Özellikler	
Fiziksel Hali	Kristal
Erime Noktası	888 °C
İlk Kaynama Noktası	108.9 °C
pH	5.2 – 8.0
Su İçinde Çözünürlüğü	445.5 g/l
Yoğunluk	2.70 g/cm ³
Kütle Yoğunluğu	14000 – 16000 kg/m ³



Şekil 3.5. Deneyde kullanılan sodyum sülfata ait görsel

3.1.8.2. Potasyum sülfat

Deney esnasında numunelere tatbik edilecek sülfat türlerinden bir diğerini oluşturan potasyum sülfat için MERCK İlaç Ecza ve Kimya Tic. A.Ş. 'ne ait 1.05153 ürün numaralı potasyum sülfat ürünü kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Deneyde kullanılan potasyum sülfata ait görsel

Bahse konu potasyum sülfat ürününe yönelik teknik özelliklere Çizelge 3.7.'de yer verilmiştir.

Çizelge 3.7. Deneyde kullanılan potasyum sülfata ait teknik özellikler

Teknik Özellikler	
Fiziksel Hali	Kristal
Erime Noktası	1.067 °C
İlk Kaynama Noktası	1.689 °C
pH	7
Su İçinde Çözünürlüğü	120 g/l
Yoğunluk	2,662 g/cm ³
Kütle Yoğunluğu	800 kg/m ³

3.2. Deneysel Çalışma

3.2.1. Numunelerin hazırlanması

Numunelerin üretimi sırasında kullanılacak olan malzemelerin hem kimyasal hem de fiziksel özellikleri materyal bölümünde ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Tez araştırmasında üretilen 6 karışımın karışım oranları Çizelge 3.8 'te verilmiştir. Bu karışımlar, Şekil 3.7 a'da gösterildiği şekilde, karışım mikseri içerisinde homojen bir şekilde harmanlanmış, ardından TS EN 196-1 standardına uygun 40x40x160 mm boyutlarındaki kalıplar kullanılmak üzere test numuneleri üretilmiştir. Karışımın homojen şekilde oluşturulmasına yönelik olarak ilk aşamada agrega, çimento ve içeriğe göre silis dumanı mikserde 2 dakika harmanlanmıştır. Harmanlanan kuru karışıma öngörülen su miktarının %90'ı ilave edilmek suretiyle 4 dakika arasında harmanlanmıştır. Son olarak kalan %10'luk ilave su miktarına belirtilen ağırlıkta hiper akışkanlaştırıcı katkı eklenerek mevcut harcın istenen işlenebilirlik seviyesine gelmesini müteakip karışımda yer alan ilgili lif türü eklenerek lifli çimento harcının 4 dakika daha karıştırılmasına devam edilmiştir.

Karışım kodu ibaresinde yer alan ifadeler şu şekilde isimlendirilmiştir:

BF16 : Bünyesinde 0.16 mm çap değerine sahip çelik lif barındıran karışım,

BF35 : İçeriğinde 0.35 mm çap değerine sahip çelik lif barındıran karışım,

PP30 : 0.30 mm çap değerine sahip polipropilen lif barındıran karışım,

N : CEM I 42,5 N Normal Portland Çimentosu

SF : Silis dumanı

Çizelge 3.8. Karışım oranları (kg/m³)

Karışım Numarası	Karışım Kodu	Çimento	Silis Dumanı	Agrega	Su	Lif Türleri			Akışkanlaştırıcı Katkı
						BF16	BF35	PP	
1	BF16_N	844	-	1100	295	78	-	-	4,9
2	BF35_N	844	-	1100	295	-	78	-	4,9
3	PP30_N	844	-	1100	295	-	-	9,4	6,0
4	BF16_N_SF	791	24,5	1060	286	78	-	-	5,1
5	BF35_N_SF	791	24,5	1060	286	-	78	-	4,9
6	PP30_N_SF	791	24,5	1060	286	-	-	9,4	5,4



Şekil 3.7. a) Malzemelerin karışım mikserine konması b) Numunelerin karışım mikserinde karıştırılması işlemi

Üretilen çimento harçları yağlanmış olan boyutları 40x40x160 mm prizma şeklindeki kalıplara doldurularak Şekil 3.8.-b’de sarsma cihazında TS EN 196-1 standardı referans alınarak sıkıştırılıp, harç içindeki boşlukların kapatılması düşürülmesi sağlanmıştır. Kalıplardaki numuneler Resim 3.9. a)’ de görüldüğü gibi 24 saat bekletildikten sonra çıkarıldı.



Şekil 3.8. a) Karışımın kaplara yerleştirilmesi b) Numunelerin titreşime tabi tutulması



Şekil 3.9. a) Numunelerin kalıpta bekletilmesi b) Numunelerin kür havuzuna konması

Kalıplardan 24 saat sonra çıkarılan numuneler Şekil 3.9. b) de görüldüğü gibi ilk üç gün (72 saat) kür havuzunda bekletilmiştir. Kür havuzundan çıkarılan numuneler öncelikle, içilebilir su ile yıkanmış ardından kâğıt havlu vasıtasıyla yüzeylerindeki ıslaklık absorbe edilmiştir. Islaklığı giderilen numuneler, laboratuvar ortamında 15 dakika boyunca kurumaya bırakıldıktan sonra Proceq marka ultrasonik beton test cihazının kalibrasyonu kontrol edilmiştir. Cihazın kalibrasyonunda tespit edilen olası bir problem durumunda kalibre malzemesi ile gerekli standardizasyon sağlanmıştır. Kuruyan prizmatik numuneye ait ölçüm yapılacak yüzeye bir miktar ultrason jeli sürülmüştür. Söz konusu cihaz marifetiyle ASTM C 597’de belirtilen işlem adımlarına uygun şekilde numuneler tahribatsız test yöntemine tabi tutulmuştur. Her kür yaşı için UPV ölçümleri yapıldıktan sonra numuneler basınç dayanımı testine tabi tutulmuş ve 7,28 ve 90 günlük kür yaşı için basınç dayanımı testi sonrası elde edilen numunelerden taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri elde edilmiştir.

3.2.2. Ultra ses dalgası geçiş hızı (UPV)

Çimento esaslı malzemelerin mikro yapısal özelliklerini tahribatsız bir şekilde belirlemek için Ultrases Dalgası Geçiş Hızı (UPV) testi uygulanır. Bu test, ultrasonik dalgaların malzeme içinden geçiş hızını ölçerek malzemenin dayanımı hakkında bilgi edinmeyi amaçlar. Ölçülen hız, malzemenin mikroyapısal karakteristiğı hakkında bir gösterge olarak kullanılır. Çizelge 3.9’da UPV değıerleri ile beton kalitesi arasındaki ilişki verilmiştir. (Mishra, 2016; Demirhan, 2020).

Çizelge 3.9. UPV değıer aralığı

Geçiş Hızı (km/sn)	Beton Kalitesi
4,5 st	Mkemmek
3,5-4,5	İyi
3-3,5	Orta
3 altı	Zayıf

Numunelerin 7, 28 ve 90 günlük gelişim aşamalarında, basınç dayanımı testine tabi tutulmadan evvel, Proceq cihazı ile UPV lmleri yapılmıştır. Bu lmler, numunelerin dayanım ve kalite özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiş olup, cihaz düzeneğı şekil 3.10’de verilmiştir.



şekil 3.10. UPV cihaz düzeneğı

Şekil 3.11.'de sunulduğu üzere; üretim aşamasının 72'nci saatinde (3 günlük kür yaşı) bulunan deney numuneleri ısıtılma işlemi için tutulmak amacıyla kül fırınına yerleştirilmiştir. Numuneler, 3 günlük kür yaşı sonrasında kül fırını 600 °C sıcaklık değerine ulaştıktan sonra fırına eklenmiş ve fırında 2 saatlik süre boyunca yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır.



Şekil 3.11. a) Numunelerin yüksek sıcaklığa maruz bırakıldığı fırın b) Numunelerin fırına konması

Isıl işlem ile ilgili prosedürün uygulanmasından sonra fırından çıkarılan numuneler oda sıcaklığındaki su havuzuna bırakılarak hızlı bir soğuma sürecine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.12. Numunelerin tekrar kür havuzuna konması

Soğuyan numunelere ilişkin yeniden UPV ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Geline aşamaya kadar gerekli veri tespitlerinin gerçekleştirildiği numuneler standart, %5 doygunlukta bulunan sodyum sülfat ve %5 doygunlukta potasyum sülfat kür kaplarında Şekil 3.13'deki şekliyle bırakılmıştır.



Şekil 3.13. a) Suya sodyum ve potasyum tuzlarının ilave edilmesi b) Numunelerin sodyum ve potasyum içeren suya katılması

Her bir karışımdan 9 adet numune üretilmiştir. Böylelikle standart kür koşulları, sodyum sülfat ve potasyum sülfat kür koşullarına maruz bırakılan üçer adet numune elde edilmiştir. Bu üç adet numuneden her biri 7,28 ve 90 günlük kür yaşlarını ifade edecek şekilde ilgili kür koşullarında bekletilmiştir. Bunun neticesinde; her bir karışımın farklı dış etkenler altında sergilediği mekanik ve fiziksel özelliklerin incelenebilmesi mümkün kılınmıştır.

3.2.2. Numunelere uygulanan test yöntemleri

Standartta göre çimento harcı numunesi eğilme dayanım deneyine tabi tutulur. Burada yapılan asıl işlem çimento harcı numunesinin eğilme etkisi altında ne kadarlık bir yüke dayanabileceğini belirlemek için kullanılan bir test yöntemidir. Numuneler, test cihazına yerleştirilir. Test cihazı, numuneyi iki destek noktası arasında tutan ve ortasına yük uygulayan bir çerçeveden oluşur. Numuneye, belirli bir yükleme hızıyla kademeli olarak yük uygulanır. Numune kırılıncaya kadar yük uygulanmaya devam edilir. Kırılma, numunenin ikiye bölünmesi veya önemli bir

deformasyona uğraması olarak tanımlanır. Numunenin kırılma anındaki yük değeri, eğilme dayanımını hesaplamak için kullanılır. Bu süreçte aynı numuneye ait iki adet prizmatik parçaya 0,50 (N/mm²)/s yükleme hızı ile basınç uygulanmış ve bu kuvvet her bir parça yenilinceye kadar tatbik edilmiştir. Numunenin yenildiği an, elde edilen azami kuvvet değeri kaydedilmiştir. TS EN 196-1'e göre test edilen harç numunelerinden elde edilen iki muadil numune Şekil 3.14.'de görüldüğü üzere basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.14. Basınç dayanımı test düzeneği



Şekil 3.15. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), hem iletken hem de yalıtkan numunelerin incelenmesine olanak sağlayan bir görüntüleme tekniğidir. Metaller, tekstiller, lifler, plastikler, polimerler, partiküller (örneğin, kum, çakıl) ve dehidre biyolojik örnekler gibi çeşitli materyaller SEM ile analiz edilebilir. Yalıtkan numunelerin görüntülenmesi için yüzeylerinin iletken bir malzeme ile kaplanması gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan numunelerin SEM analizleri, Çukurova Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı bünyesinde gerçekleştirilmiştir.



4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, çalışma sürecinde üretilen numunelerin farklı kür koşulları ve kür yaşlarına bağlı olarak yapılan deneylerin sonuçları yer almaktadır. Basınç dayanımı sonuçları ilk alt başlıkta, UPV değerlerine ait sonuçlar ise ikinci alt başlıkta incelenmiştir.

4.1. Basınç Dayanımı

Bu çalışmada, çimento esaslı lifli kompozitlerin yüksek sıcaklık ve sülfat etkisi altındaki davranışları basınç dayanımı açısından değerlendirilmiştir. Numunelerin 600 °C'ye maruz bırakılmasıyla meydana gelen dayanım değişimleri incelenmiş, hem sıcaklığın hem de sülfat etkisi gibi ikili durabilite etkilerinin mekanik performans üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu kapsamda, hem sıcaklık hem de sülfat türlerinin malzeme üzerindeki uzun vadeli yapısal etkileri ortaya konulmuştur. Çalışmada ayrıca, lif türü ve narinlik oranının dayanım üzerindeki rolü de incelenmiştir. Ayrıca, uzunlukları 6 mm olan 30 mikron çapındaki polipropilen lif ile 16 mikron ve 35 mikron çapında çelik liflerin farklı koşullar altındaki performansları değerlendirilmiştir. Deneysel veriler, 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinde elde edilen basınç dayanımları doğrultusunda, zaman faktörünün sülfat etkisiyle birleştiğinde malzeme yapısındaki bozulmalara ne şekilde yansıdığını ortaya koymuştur. Bazı karışımlarda kullanılan silis dumanı katkısının, dayanımı artırıcı etkisi ve çevresel etkilere karşı sağladığı direnç de gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, lif tipi ve boyutu, mineral katkı kullanımı ile farklı kür koşullarının bir arada değerlendirildiği bu çalışma, bu parametrelerin kombinasyonunun çimento esaslı lifli kompozitlerin dayanım performansı üzerindeki etkisini kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır.

Mevcut tez çalışmasında, 600 °C'lik yüksek sıcaklık; standart, sodyum sülfatlı ve potasyum sülfatlı üç farklı kür rejimleri; 7, 28 ve 90 günlük üç kür yaşı; mineral katkı olarak silis dumanı kullanımı ile narinlikleri farklı iki mikro boyutlu çelik lif ve farklı narinlikte polipropilen liflerin etkileri hem münferit hem de ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda yürütülen basınç dayanımı testleri aracılığıyla mevcut deneysel çalışma; (i) narinlikleri farklı olan liflerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı üzerindeki etkisi,

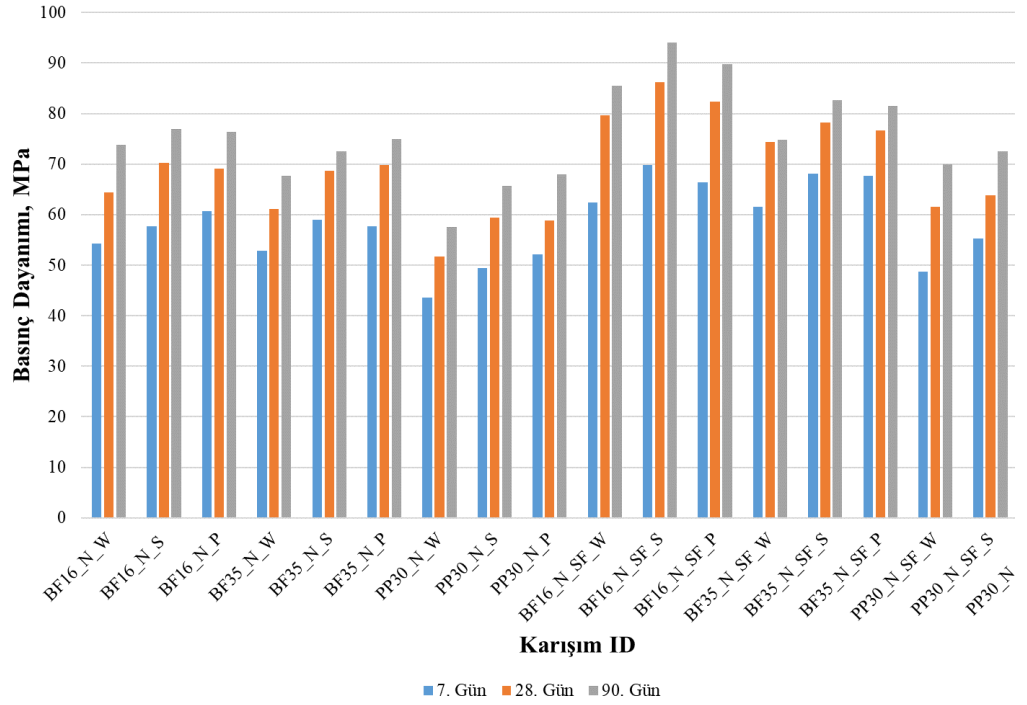
(ii) uygulanan farklı kür rejimlerinin dayanım gelişimine katkısını, (iii) silis dumanı gibi mineral katkının hem yüksek sıcaklık hem de sülfatlı ortam koşullarındaki performansını ve son olarak hem karışım içeriği hem de çevresel faktörlerin kür süresine bağlı olarak oluşturduğu etkiyi ortaya koymuştur. Söz konusu değişkenler doğrultusunda hazırlanan karışımlara ait numunelerin kür yaşına bağlı ortalama basınç dayanımları, Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te sunulmuştur.

Çimento esaslı yapı malzemelerinde yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen kabuk atma (spalling) olgusunun temel nedenleri, malzeme içinde termal gerilmelerin düzensiz şekilde dağılması ve gözeneklerde biriken buharın oluşturduğu iç basınçtır (Ding ve ark., 2016). Bu bağlamda, mekanik, geometrik ve kimyasal açıdan farklı özellikler taşıyan lifler, yüksek sıcaklık koşullarında çimento esaslı kompozitlerin performansını artırmakta ve bu malzemelere farklı mühendislik özellikleri kazandırmaktadır. Şekil 4.1'de sunulan deneysel veriler doğrultusunda, kür yaşı, kür rejimi ya da silis dumanı ikamesi gibi değişkenlerden bağımsız olarak, üç günlük kür süresinin ardından yüksek sıcaklığa maruz bırakılan tüm numuneler arasında en yüksek basınç dayanımının, 16 mikron çapında çelik lif içeren ve BF16 koduyla tanımlanan karışımlarda elde edildiği görülmüştür. Bu karışımı sırasıyla BF35 ve PP30 kodlu lif katkılı örnekler takip etmiştir. Her ne kadar BF16 ve BF35 liflerinin uzunlukları eşit olsa da, narinlik oranlarındaki farklılık birim hacimde bulunan lif sayısını değiştirmiş, bu da mekanik performans üzerinde belirleyici olmuştur. Özellikle daha yüksek narinlik oranına sahip olan BF16 lifleri, mikro çatlak oluşumunu daha etkin şekilde engelleyerek matris bütünlüğünü korumuş ve bu sayede karışımın dayanımını önemli ölçüde artırmıştır. Bu sonuçlar doğrultusunda, en yüksek basınç dayanım değerinin BF16 lif katkılı karışımlarda elde edildiği açıkça ortaya konmuştur.

Çimento esaslı malzemelerin mekanik performansını, yüksek durabilite karakteristiğini ve geçirgenlik özelliklerini belirleyen başlıca parametreler arasında porozite, gözenek çapı ve gözeneklerin dağılım karakteristikleri yer almaktadır. Yüksek sıcaklığa maruz kalma durumunda, malzeme içerisindeki gözeneklilik oranı artmakta ve gözenek boyutları genişlemektedir (Li ve ark., 2020). Deney sürecinde 600 °C sıcaklığa maruz bırakılan çimento esaslı lifli numunelerde, içerikte bulunan polipropilen liflerin ergimeye başlamasıyla (Adar ve ark., 2020) matris içinde boşlukların oluştuğu, bu nedenle de lif katkısının basınç dayanımına sınırlı ölçüde katkı sunduğu gözlemlenmiştir (Li ve ark., 2017). Başka bir ifadeyle, düşük ergime noktasına sahip olan PP30 tipi lif içeren karışımlar, yüksek sıcaklık altında çözünerek iç buhar basıncının dışarı çıkmasına

olarak tanısı da, liflerin erimesi sonucu oluşan gözenek artışı nedeniyle dayanım değerlerinde düşüşe yol açmıştır (Eidan ve ark., 2019; Xie ve ark., 2018; Aslani ve Kelin, 2018; Mahsanlar, 2006). Bu bağlamda, polipropilen liflerin düşük termal direnç göstermesi çelik liflerle kıyaslandığında daha zayıf bir performansa işaret etmektedir (Wu ve ark., 2020). Polipropilen liflere kıyas edildiğinde, çelik lifler yüksek sıcaklık ortamlarında mekanik özelliklerini büyük ölçüde koruyabilmekte ve gerilmeye karşı daha dayanıklı kalabilmektedir. Belirli bir sıcaklık seviyesinin aşılmasıyla birlikte, çelik lifler boyutsal kararlılığını yitirmeden boyuna uzayarak malzeme içinde iç gerilimlerin baskın hâle geldiği bir davranış göstermektedir (Alhamad ve ark., 2022). Sonuç olarak baktığımızda, çelik lif katkılı karışımların (BF16 ve BF35), PP30 lif katkılı örneklerle kıyasla daha yüksek boyutsal kararlılık sergilemesinin temel nedeni bu termal dayanım farkı olarak değerlendirilebilir. Öte yandan, pirinç mikro çelik liflerin (BF16 ve BF35) diğer çelik liflere kıyasla daha düzgün yüzey pürüzlülüğüne sahip olması, işlenebilirlik açısından avantaj sağlayarak matrisin yoğunluğunu artırmakta; bu da daha yüksek dayanım değerlerinin elde edilmesine katkı sunmaktadır (Yazıcı, 2017; Ünal ve ark., 2007).

Yapılan deneysel çalışmalar kapsamında, numunelere uygulanan kür koşullarını temsil eden harf kodları şu şekilde tanımlanmıştır: “**W**” harfi, kireçli su içeren kür havuzunu ifade etmekte olup, standart su kürünü temsil etmektedir. “**S**” harfi, sodyum sülfat çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen kür rejimini; “**P**” harfi ise potasyum sülfat çözeltisiyle uygulanan kür koşulunu göstermektedir. Bu semboller, deneysel sonuçların analizinde kür ortamlarının etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirmek amacıyla kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Kür yaşına göre karışım basınç dayanımı değerleri

Çimento esaslı malzemelerde hidrasyon süreci sıcaklığın etkisiyle hız kazanmakta ve özellikle erken yaşlarda oluşan hidrasyon ürünleri sayesinde dayanımda gözle görülür bir artış meydana gelmektedir. Temel hidrasyon reaksiyonları sonucunda başta C-S-H jelleri olmak üzere, kalsiyum hidroksit (CH) gibi fazlar da oluşur. Literatürde belirtildiği üzere, etrenjit ayrışması 50–110 °C aralığında gerçekleşirken; kalsiyum hidroksit yaklaşık 450–500 °C sıcaklıklarda ayrışmaya başlar (Alhamad ve ark., 2022). Çimento hamurunda belirgin düzeyde yapısal bozulmalar ise genellikle 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda gözlemlenmektedir (Pasztnik ve Wróblewski, 2021). Yüksek sıcaklık maruziyeti sonucunda, çimento hamurunun mikroyapısında yer alan bileşenlere bağlı olarak çeşitli fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar oluşur. Bu süreçte, bağlı suyun buharlaşması yaklaşık 100 °C'de, kalsiyum hidroksitin ayrışması 500 °C civarında ve kalsiyum silikat hidratların (C-S-H jeli) bozulması ise yaklaşık 700 °C'de meydana gelir. Söz konusu termal bozunmalar, çimento esaslı malzemenin mekanik özelliklerinin zayıflamasına yol açmaktadır (Pasztnik ve Wróblewski, 2021; Türkmen ve Fındık, 2013; Luccioni ve ark., 2003). Bu bağlamda, Şekil 4.1'de sunulan veriler, yüksek sıcaklık sonrası uygulanan farklı kür rejimlerinin çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımı üzerinde belirgin etkiler oluşturduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Şekil 4.1’de sunulan grafik incelendiğinde, standart su kürüne tabi tutulan numunelerde basınç dayanımının diğer kür koşullarına kıyasla daha düşük seviyelerde gerçekleştiği görülmektedir. Buna karşılık, sülfat içeren kür rejimleri, özellikle sodyum sülfat ve potasyum sülfat çözeltileri, numunelerde dayanım gelişimini daha yüksek düzeyde desteklemiştir. Her iki sülfatlı ortam benzer performans sergilese de, potasyum sülfat çözeltisinde kürlen numunelerde elde edilen basınç dayanımı değerlerinin, sodyum sülfatlı ortama kıyasla biraz daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Üç günlük kür yaşına sahip numunelerde, sıcaklık etkisinin ardından tüm karışımlarda hidrasyon hızının artmasına bağlı olarak dayanım gelişiminde belirgin bir artış kaydedilmiştir. Şekil 4.1’de sunulan verilere göre, basınç dayanımındaki en yüksek değişim standart su kürüne tabi tutulan numunelerde 7 ila 90 gün arası kür yaşlarında gözlemlenmiş olup, en yüksek basınç dayanımı artışı, silis dumanı katkılı BF16_N_SF karışımında bu oran %36,95 iken, silis dumanı içeren PP30_N_SF karışımı için en fazla %43,48 ulaşmıştır. Her iki karışımın da PP30 lifleri içermesi, yüksek sıcaklık nedeniyle bu liflerin erimesi sonucu oluşan boşluk yapısıyla ilişkilidir. Sodyum sülfat ve potasyum sülfat çözeltisi içeren kür koşullarında ise numunelerin kür süresi boyunca gösterdiği dayanım artışları dikkat çekicidir. Her ne kadar literatürde sodyum sülfat çözeltisinin çimento esaslı malzemelerde potasyum sülfata göre daha yıpratıcı bir etkiye sahip olduğu belirtilmiş olsa da (Skalny ve ark., 2002), bu çalışma kapsamında bazı karışımlarda potasyum sülfatlı kür koşulları altında muadil ya da daha yüksek dayanım artışları elde edilmiştir. Öte yandan, genel olarak, her iki sülfatlı kür rejimi de benzer performans düzeyleri sunmuştur. Silis dumanı katkısının bu sürece etkisi ise özellikle dikkat çekicidir; çünkü katkı içermeyen sistemlerde, oluşan kalsiyum hidroksit etrenjit formasyonu yoluyla değerlendirilmesi dayanım artışını sınırlandırmıştır. Buna karşılık, silis dumanı içeren karışımlarda, içerikteki reaktif oksitler puzolanik reaksiyonlara girerek ilave C-S-H jel oluşumuna yol açmış ve daha yüksek dayanım seviyeleri sağlanmıştır. Ayrıca, çimentonun kısmen silis dumanı ile ikame edilmesi erken yaşlardaki dayanımı belirgin bir ölçüde artırmakla birlikte, zamanla süregelen puzolanik etkiler sayesinde daha dayanıklı ve bütünlüklü bir matris yapısı olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında, silis dumanı gibi mineral katkılar yalnızca puzolanik özellikleriyle değil, aynı zamanda filler etkisiyle de gözenekliliği azaltarak daha yoğun bir mikroyapının oluşmasına katkıda bulunmakta, bu da özellikle lif donatılı sistemlerde mekanik performansın artmasına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır (Abid ve ark., 2017; Afroughsabet ve ark., 2016; Jang ve ark., 2016).

Sonuç olarak, bu çalışmada, çimento esaslı lif takviyeli kompozitlerin 600 °C'ye kadar çıkan yüksek sıcaklık ve sülfat etkisi altındaki basınç dayanımı davranışlarını kapsamlı bir biçimde değerlendirmiştir. Deneysel araştırmada, farklı lif türleri (çelik ve polipropilen), liflerin narinlik oranları, mineral katkı olarak silis dumanı kullanımı ve üç farklı kür rejimi (standart su, sodyum sülfat ve potasyum sülfat çözeltileri) dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, özellikle 16 mikron çapındaki çelik liflerin kullanıldığı BF16 kodlu karışımın, yüksek sıcaklık maruziyeti sonrasında en yüksek basınç dayanımını sağladığını ortaya koymuştur. Bu durum, söz konusu liflerin yüksek narinlik oranına sahip olması ve mikro çatlak ilerlemesini etkili biçimde sınırlandırma yeteneğiyle açıklanabilir. Polipropilen lif katkılı karışımlar ise düşük ergime sıcaklıkları nedeniyle yüksek sıcaklık altında dayanım kaybı yaşamıştır. Silis dumanı katkısının ise, hem puzolanik reaksiyonları teşvik etmesi hem de gözenek yapısını iyileştirici dolgu etkisi sayesinde, tüm deneysel koşullarda dayanımı artırdığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, sülfatlı kür ortamları içinde özellikle potasyum sülfat çözeltisinin, standart kür koşullarına kıyasla daha olumlu bir dayanım gelişimi sağladığı belirlenmiştir. Genel değerlendirme doğrultusunda, lif tipi ve narinliği, kullanılan mineral katkı ve uygulanan kür rejiminin etkileşimi; çimento esaslı kompozitlerin mekanik performansı üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.

4.2. SEM Görüntüsü

Portland çimentosunun hidratasyonu sonucu oluşan başlıca ürünler, SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntülerinde ayırt edilebilir özellikler göstermektedir. Örneğin, kalsiyum hidroksit (CH, sönmüş kireç) genellikle altıgen tabaka şeklinde kristaller olarak görülürken, başlıca bağlayıcı faz olan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) amorf jel benzeri bir doku halinde gözlemlenir. Etrenjit ($C_6AS_3H_{32}$ olarak bilinen kalsiyum alüminat sülfat hidrat, üç kalsiyum alüminatın sülfatla reaksiyon ürünü) ise iğnemi/çubuk benzeri kristaller formunda oluşur ve özellikle çimento esaslı malzemenin ilerleyen yaşlarında boşlukları veya çatlakları dolduracak şekilde büyüyebilir. İncelenen SEM görüntülerinde bu hidratasyon ürünlerinin mikroyapı üzerindeki etkileri belirgin olup, her bir karışım ve kür koşulu için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Özellikle sönmüş kirecin (CH) ve C-S-H jelinin dağılımı ile etrenjit kristallerinin varlığı, mikroyapının yoğunluğu ve hasar durumu hakkında önemli bilgiler sunmaktadır. Yapılan analizlerde, referans kür (standart su kürü) ile sülfat ortamındaki kürler (Na_2SO_4 ve K_2SO_4 çözeltileri)

arasında belirgin mikroyapısal farklılıklar gözlemlenmiştir. Standart su küründe (kontrol ortamı) numunelerin SEM görüntülerinde matrisin büyük ölçüde C-S-H jeli ve dağınık portlandit (CH) kristallerinden oluştuğu, etrenjit oluşumunun ise sınırlı düzeyde kaldığı görülmektedir. Bu durum, taze harçta başlangıçta oluşup priz sırasında yapı içerisinde kalan bir miktar etrenjit olabileceğini, ancak dış ek bir sülfat kaynağı olmaksızın bunun önemli bir genişleme yapmadığını göstermektedir.

Sülfat çözeltilerine maruz bırakılan numunelerde (Na_2SO_4 ve K_2SO_4 kürleri) ise, matris içinde yeni ve daha fazla oranda etrenjit kristallerinin oluştuğu tespit edilmiştir. SEM görüntülerinde bu numunelerin gözeneklerinde ve özellikle oluşan mikro-çatlaklarda iğne şeklinde etrenjit kristalleri açıkça seçilebilmektedir. Literatürde, sertleşmiş beton içinde dış kaynaklı sülfatların mevcut hidratasyon ürünleriyle reaksiyona girerek ikincil etrenjit ve jips gibi ürünler oluşturduğu, bu etrenjit oluşumunun hacimce genişlemeye yol açarak iç gerilmeler ile neticelendiği ve sonuçta çatlaklara neden olduğu iyi bilinmektedir. Nitekim Na_2SO_4 çözeltisiyle kürlenmiş numunelerde etrenjit ile birlikte jips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) oluşumu da muhtemeldir; bu iki ürünün bir arada oluşması betonun genişterek çatlamasına yol açan ana mekanizmadır.

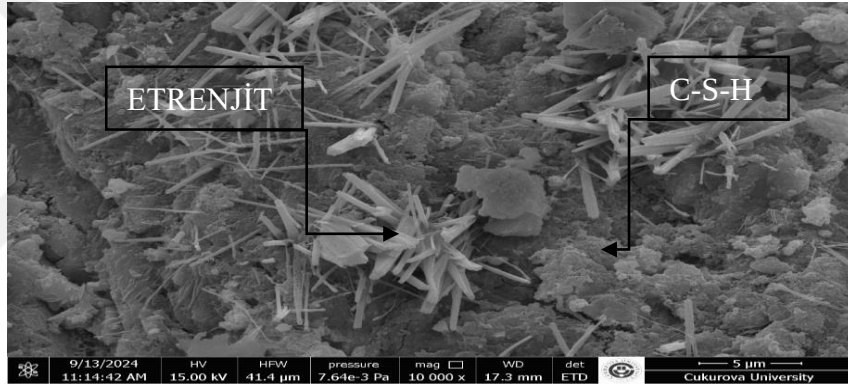
K_2SO_4 çözeltisinde kürlenmiş numunelerde de benzer şekilde sülfat saldırısı gerçekleşmekte, K^+ iyonlarının varlığı sadece pore çözeltisinin alkalinitesini yüksek tutarak C-S-H jelinin kısmen istikrarlı kalmasını sağlasa da, sonuçta sülfat ile reaksiyonlarda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tüketilerek jips ve etrenjit benzeri genişleyen ürünler meydana gelmektedir. Dolayısıyla her iki dış sülfat türü de (Na_2SO_4 ve K_2SO_4), kontrollü su kürüne kıyasla çimento hamurunda belirgin etrenjit oluşumuna ve çatlak gelişimine neden olmuştur.

BF16 kodlu karışımın (Çelik lif, $\varnothing 0.16$ mm) SEM görüntülerinin verildiği Resim 4.1’de standart su kürü altında BF16 numunesinin mikroyapısında yoğun C-S-H matrisi ve yer yer portlandit kristalleri gözlenmiştir. CH kristalleri altıgen tabakalar halinde SEM görüntüsünde seçilebilmekte olup, bu ürünlerin varlığı pozzolan içermeyen normal bir çimento matrisinde beklenen bir durumdur. Etrenjit oluşumu, su küründe sınırlı düzeyde kalmıştır; sadece priz öncesi oluşan primer etrenjit kristallerine ait izlere rastlanmıştır. Numunenin genel yapısı yoğun olup belirgin bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. BF16 karışımı, çelik lif içermekle birlikte, lif hacmi ve dağılımı itibarıyla matrisin bütünlüğünü olumsuz etkileyecek bir durum oluşturmamış olup, aksine çelik lifler çatlak oluşumunu engelleyici bir donatı olarak davranarak kırılabilirliği azaltabilir.

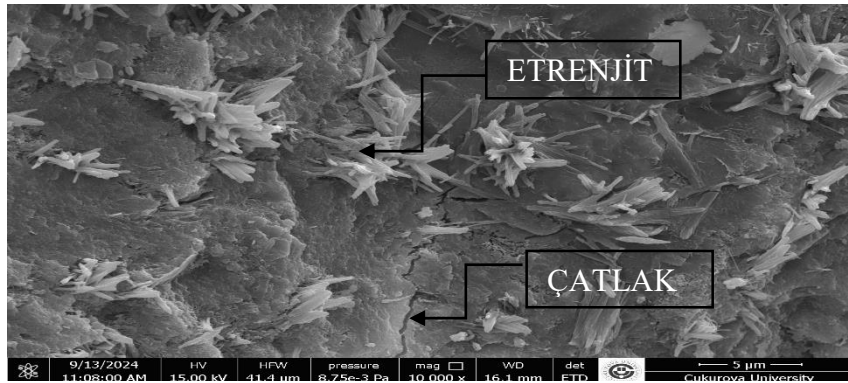
Na_2SO_4 küründe BF16 numunesinin mikroyapısında ise, dış sülfatın etkisiyle portlandit kristallerinin bir kısmının tükendiği ve bunun sonucunda iğnemsî etrenjit kristallerinin daha yoğun biçimde oluştuğu görülmüştür. Etrenjit kristalleri özellikle boşluklarda ve lif çevresinde birikme eğilimindedir. Bu numunede, sülfat saldırısına bağlı başlangıç mikro-çatlaklarının, etrenjit oluşumunun ilerlemesiyle daha belirgin hale geldiği anlaşılmaktadır. K_2SO_4 küründe de BF16 benzer şekilde sülfat kaynaklı ürünlere maruz kalmıştır; SEM görüntülerinde etrenjit kristalleri tespit edilmiştir. Potasyum sülfat ortamında, reaksiyon ürünleri sodyum sülfata benzer biçimde etrenjit oluşumunu içerir ve bu da mikroyapıda boşluk dolduran kristaller olarak kaydedilmiştir. Sonuç olarak BF16 karışımı, silis dumanı içermediği durumda, her iki sülfat ortamında da belirgin etrenjit oluşumu ve mikroyapıda bozulma emareleri göstermiştir.

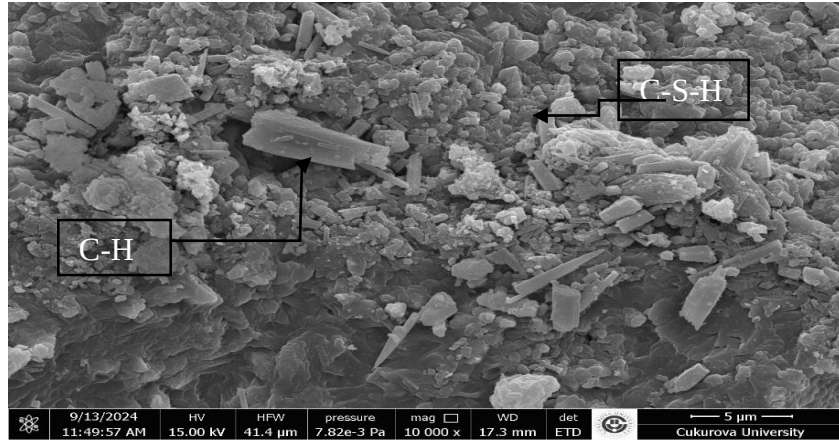
BF16

Potasyum Sülfat Rejimi



Sodyum Sülfat Rejimi





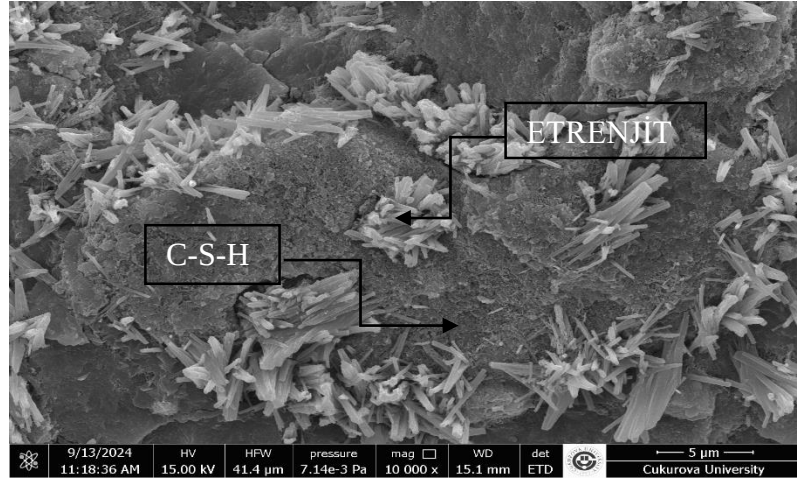
Resim 4.1. Kür rejimine göre BF16 kodlu karışım için SEM görüntüleri

BF35 kodlu karışımın (Çelik lif, Ø0.35 mm) SEM görüntülerinin verildiği Resim 4.2’de BF35 karışımı da silis dumanı içermeyen, ancak daha kalın çaplı (muhtemelen daha uzun boylu veya daha yüksek hacimli) çelik lif içeren çimento esaslı bir malzemedir. Standart su kürü altında BF35 numunesinin mikroyapısı, BF16’ya benzer şekilde yoğun bir C-S-H matrisi ve dağınık CH kristalleri barındırmaktadır. Ancak BF35 numunesinin SEM görüntülerinde, su kürü koşulunda dahi ufak çaplı bazı mikro-çatlaklar tespit edilmiştir.

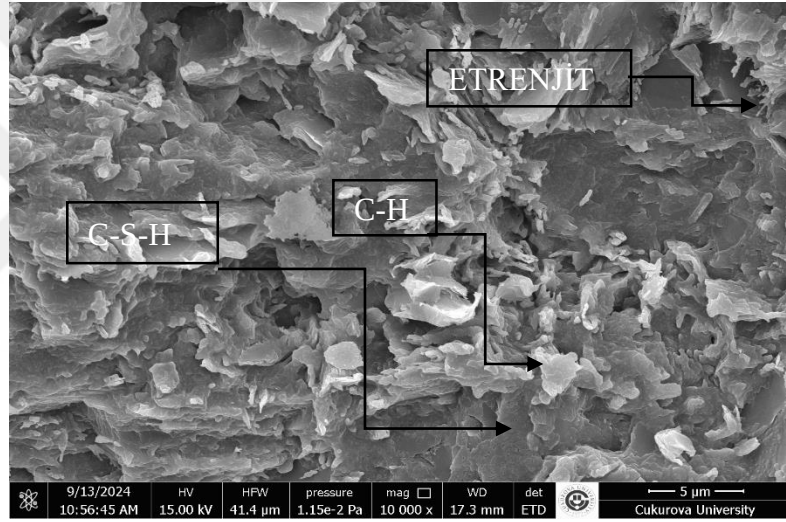
Su kürü numunesinde etrenjit izleri çok az olup, ana fazlar C-S-H ve CH olarak kalmıştır. Na₂SO₄ ile kürlenmiş BF35 örneğinde ise, sülfatın etkisi şiddetli şekilde gözlenmiştir: C-S-H yapısında bozulma emareleri, portlandit kristallerinin kısmen yok olması ve bunların yerine bol miktarda iğne biçimli etrenjit kristallerinin ortaya çıkması kaydedilmiştir. Oluşan etrenjit, matris içinde boşlukları doldurmuş ve çatlakların gelişimine neden olmuştur. Bu bulgu, harici sülfat ile temas eden çimento hamurunda etrenjit oluşumunun ilerleyerek ciddi genleşme ve iç gerilmeler ile neticelendiğini doğrular niteliktedir. Ayrıca, sülfatın CH ile reaksiyonu sonucu jips oluşumu da beklenbilir ve jips kristalleri de etrenjit ile birlikte genişleyerek yapıyı zorlar. BF35 numunesinde Na₂SO₄ kürüne bağlı hasarın, BF16’ya kıyasla en az aynı düzeyde, belki daha fazla olduğu söylenebilir; bu da muhtemelen liflerin matris bütünlüğüne katkısının sınırlı kalması ve daha gözenekli bir yapı oluşmuş olmasından ileri gelmektedir. K₂SO₄ küründe BF35 numunesi yine sülfat saldırısı ürünleri göstermiştir. Potasyum sülfat ortamında, SEM görüntülerinde etrenjit kristallerine rastlanmış ancak ilginç bir şekilde BF35 numunesinin potasyum sülfat ile küründe, sodyum sülfata göre etrenjit kristallerinin yoğunluğu biraz daha düşük görünmüştür. Bu farkın nedeni, K₂SO₄ çözeltisinin kimyasal etkisinin kinetik veya çözünürlük farklarından kaynaklanabilir; K₂SO₄’ün oluşturduğu KOH ortamı C-S-H jelini kısmen stabilize etse de diğer yandan Ca(OH)₂ tüketimi ve ikincil ürün oluşumu devam etmektedir. BF35 karışımının K₂SO₄ ortamına maruz kalmış numunesinde de bazı mikro çatlaklar tespit edilmiş, ancak bunların bir kısmının etrenjit kristallerinin bulunduğu boşlukları çevrelediği gözlemlenmiştir. Genel olarak BF35 karışımı, daha kalın lifli yapısına rağmen sülfat ortamlarında ciddi etrenjit oluşumu ve çatlak gelişimi sergilemiş; su küründe ise beklenenden biraz daha fazla mikro-çatlak barındırmıştır.

BF35

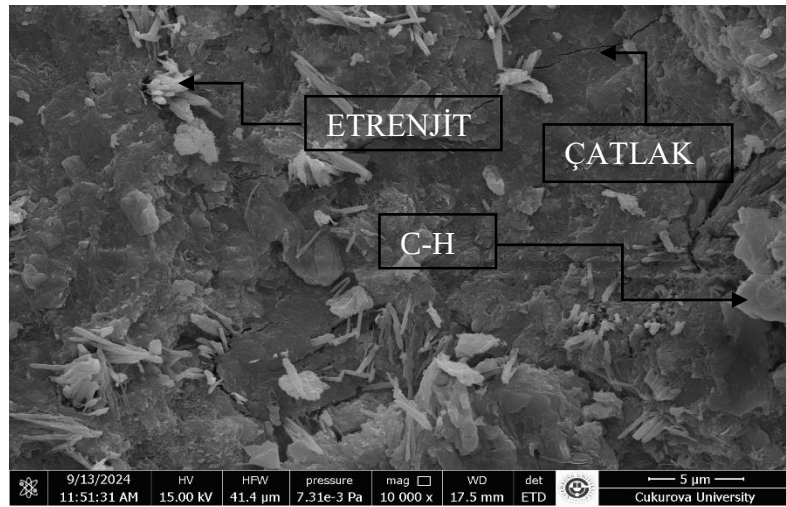
Potasyum Sülfat Rejimi



Sodyum Sülfat Rejimi



Standart Kür Rejimi



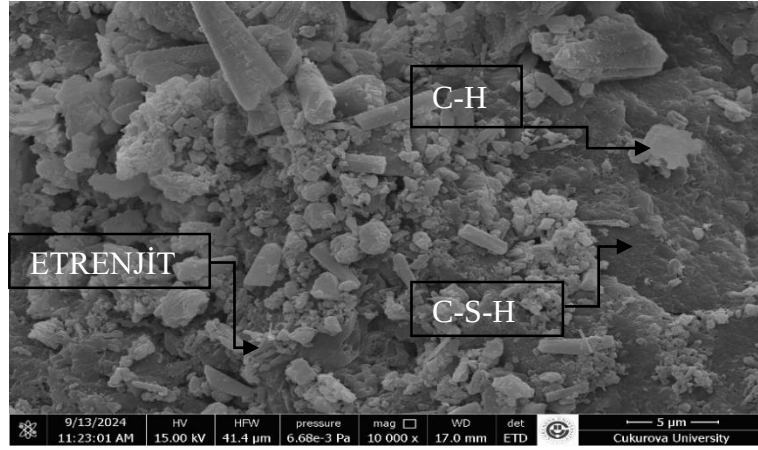
Resim 4.2. Kür rejimine göre BF35 kodlu karışım için SEM görüntüleri

PP30 kodlu karışımın (Polipropilen lif, Ø0.30 mm) SEM görüntülerinin verildiği Resim 4.3'te çimento matrisinde polipropilen (PP) lifleri içeren ve silis dumanı katkısı olmayan bir karışımdır. Standart su kürü uygulanmış PP30 numunesinin SEM incelemesinde, yoğun C-S-H matrisi içerisinde dağılmış portlandit kristalleri görülmüştür. PP lifleri, çelik liflerin aksine yüzeyleri hidrofobik ve pürüzsüz olduğu için, matrisle arayüzey bağlanmaları daha zayıf olabilir; ancak erken yaşlarda plastik rötre çatlaklarını azaltma ve çatlak dağıtma konusunda etkilidirler. Su kürlü PP30 numunesinde belirgin bir çatlaklaşma saptanmamış, yapı genel olarak bütünlüğünü korumuştur. SEM görüntülerinde çok az miktarda iğne şeklinde kristal yapılar fark edilmiştir ki, bunlar muhtemelen çimento içindeki alçı taşının hidrasyonu ile oluşan primer etrenjit kristalleridir ve zararsız düzeydedir. Na₂SO₄ kürüne maruz kalan PP30 numunesinde, portlandit kristallerinin bir kısmının sülfat ile reaksiyona girerek ortadan kalktığı, bunun sonucunda oluşan kalsiyum sülfat ve etrenjit ürünlerinin matris içinde belirdiği görülmüştür. Özellikle etrenjit, SEM görüntüsünde iğnemsî yapılar halinde net biçimde ayırt edilmiş; bu kristallerin bazıları mikro-çatlaklar boyunca uzanarak yapının bütünlüğünü bozmuştur. PP liflerinin varlığı, çatlak ilerlemesini tamamen durduramasa da, çatlak boyutlarını sınırlamaya kısmen yardımcı olmuş olup, literatürde PP liflerinin betonda sülfat saldırısına doğrudan kimyasal bir direnç katkısı olmamakla birlikte, çatlak kontrolü yönüyle dolaylı fayda sağladığı belirtilmektedir.

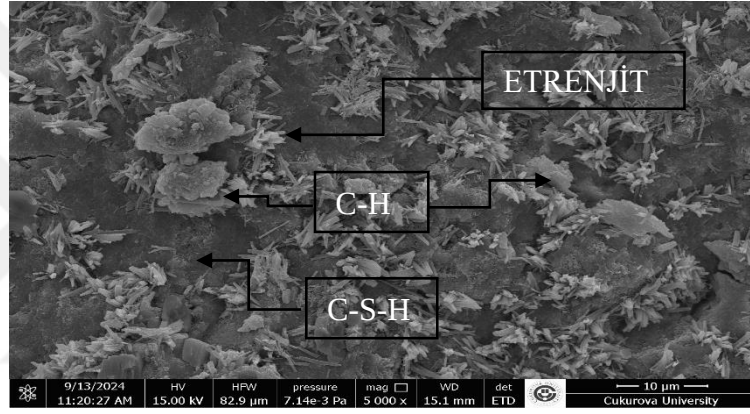
K₂SO₄ küründe PP30 numunesi benzer bir tablo sergilemiştir. Sülfat etkisiyle oluşan etrenjit kristalleri tespit edilmiş ve bunlar matrisin çeşitli bölgelerinde yoğunlaşmıştır. Na₂SO₄ ve K₂SO₄ ortamlarında PP30'un maruz kaldığı hasar, genel olarak çelik lifli numunelere benzer bir desen izlemiştir. Polipropilen lifler kimyasal olarak inert olduğu için, sülfat saldırısının kimyasal boyutunu etkilememiş; dolayısıyla CH + sülfat reaksiyonları serbestçe gerçekleşmiş ve etrenjit oluşumu gözlenmiştir. Sonuç olarak PP30 karışımı, sülfat ortamlarında belirgin etrenjit oluşumu ve çatlak gelişimi göstermiş, su kürü altında ise kararlı bir mikroyapı sergilemiştir.

PP30

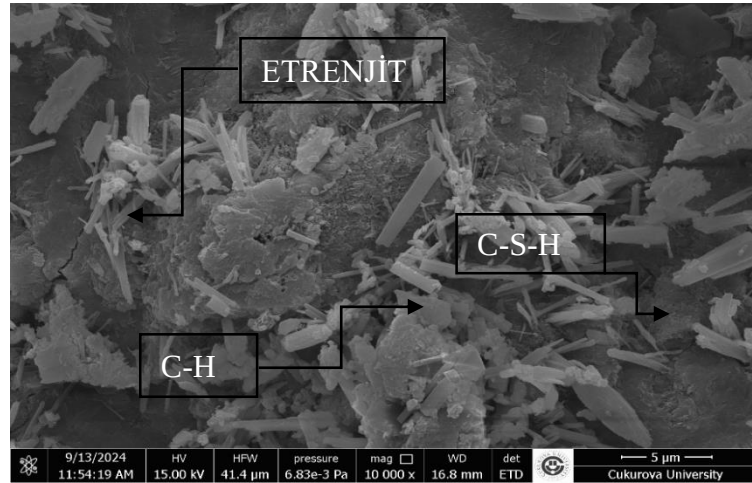
Potasyum Sülfat Rejimi



Sodyum Sülfat Rejimi



Standart Kür Rejimi

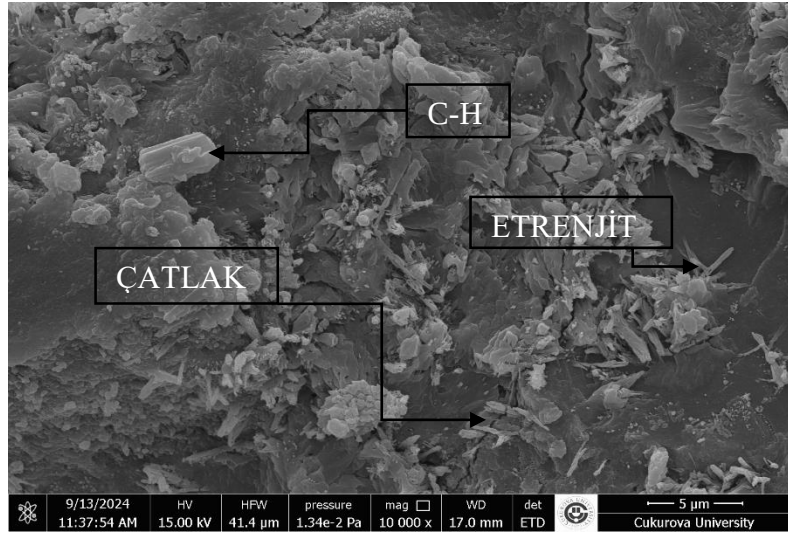


Resim 4.3. Kür rejimine göre PP30 kodlu karışım için SEM görüntüleri

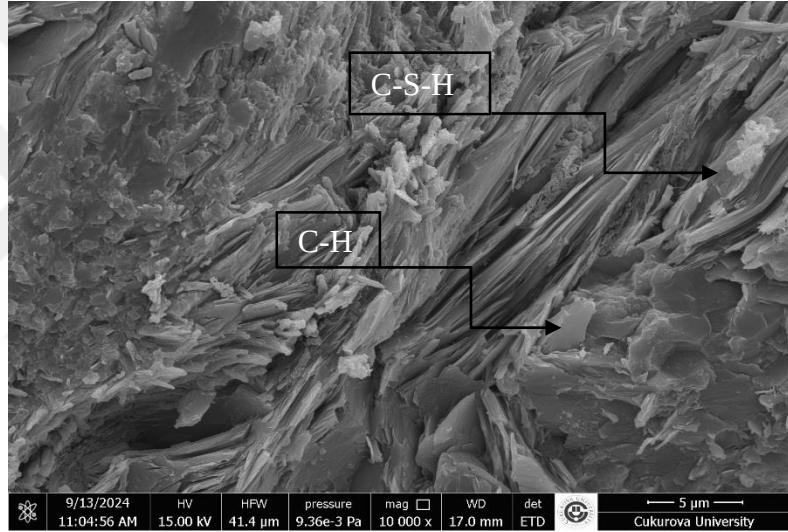
BF16-SF kodlu karışımının (Çelik lif Ø0.16 mm + Silis dumanı) SEM görselleri Resim 4.4'te verilmiştir. Standart su küründe, BF16-SF numunesinin SEM görüntülerinde portlandit (CH) kristallerinin miktar ve boyut olarak belirgin şekilde azaldığı, buna karşın C-S-H jel fazının daha homojen ve yaygın hale geldiği tespit edilmiştir. Silis dumanı, hidrasyon sırasında açığa çıkan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek ilave C-S-H oluşturur; dolayısıyla SF'li numunede CH içeriğinin azalması ve C-S-H miktarının artması beklenen bir sonuçtur. Na_2SO_4 küründe BF16-SF numunesi, silis dumanının sülfat saldırısına karşı sağladığı direnç sayesinde, SF içermeyen eşdeğerine kıyasla daha iyi bir performans sergilemiştir. SEM görüntülerinde, Na_2SO_4 çözeltisine maruz kalan BF16-SF'de büyük ve belirgin etrenjit kristallerine rastlanmamış olup, oluşan etrenjit miktarı çok sınırlı kalmıştır. Bu kritik bulgu, silis dumanının hem matris geçirgenliğini düşürerek sülfat iyonlarının içeri girişini zorlaştırması, hem de bünyedeki portlandit miktarını azaltarak sülfatla reaksiyon kapasitesini sınırlandırması sayesinde.

BF16-SF

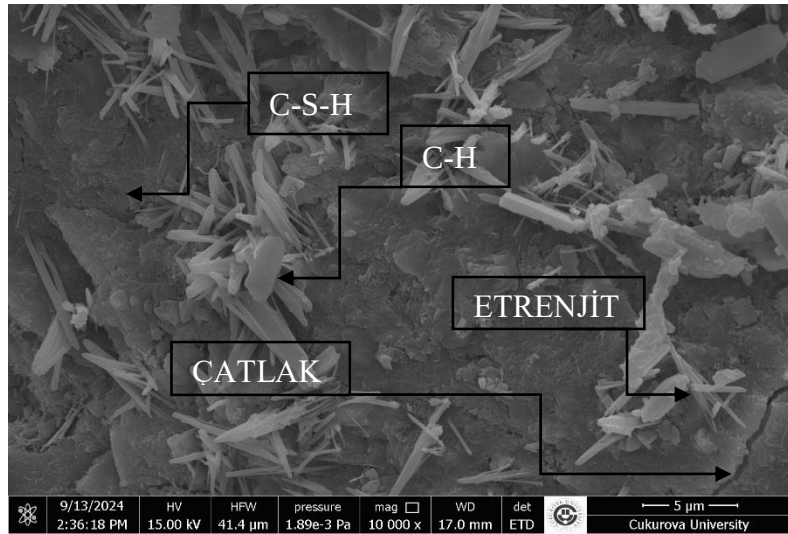
Potasyum Sülfat Rejimi



Sodyum Sülfat Rejimi



Standart Kür Rejimi



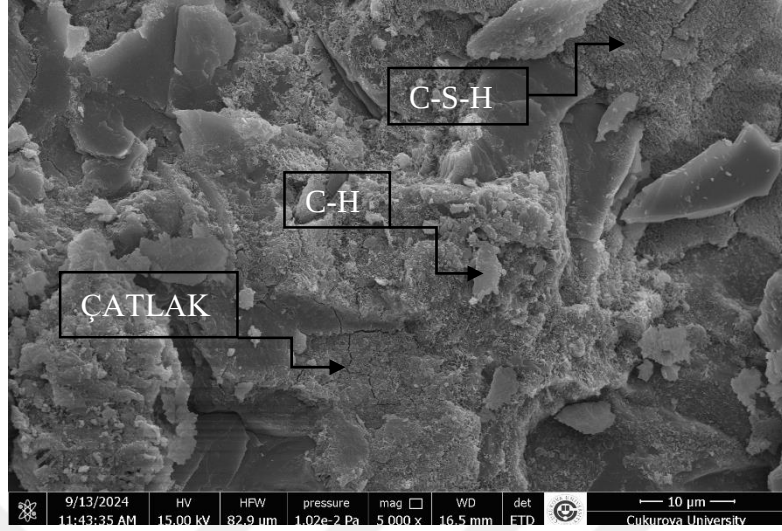
Resim 4.4. Kür rejimine göre BF16-SF kodlu karışım için SEM görüntüleri

BF35-SF kodlu karışımının (Çelik lif Ø0.35 mm + Silis dumanı) SEM görselleri Resim 4.5'te verilmiştir. Bu karışım BF35'in silis dumanı ihtiva eden versiyonudur. Standart su kürü altında BF35-SF numunesinin mikroyapısı, yoğun C-S-H matrisi ve çok sınırlı miktarda küçük portlandit kristallerinden oluşmaktadır. Silis dumanının etkisiyle, BF35'e kıyasla CH kristallerinin sayıca azaldığı ve boyutlarının küçüldüğü; bunun yerine reaksiyonla oluşan ikincil C-S-H'nin boşlukları doldurarak homojen bir yapı oluşturduğu SEM ile gözlenmiştir. Su kürlü BF35-SF'de belirgin bir çatlak oluşumu saptanmamıştır; mikroyapı oldukça bütüncül ve sıkı görünmektedir. Na₂SO₄ küründe BF35-SF numunesi, sülfatın saldırısına uğramış ve SEM incelemesinde buna dair belirtiler kaydedilmiştir. Özellikle, BF35-SF'nin Na₂SO₄'e maruz kalan örneklerinde ince çatlaklar ve bu çatlakları kısmen dolduran etrenjit kristalleri tespit edilmiştir. Silis dumanı katkısı sayesinde CH içeriği azalmış olsa da, BF35-SF karışımında muhtemelen çimento içerisindeki alüminat fazların (C₃A ve C₄AF) miktarı ve reaktivitesi, sülfatla etkileşime girerek bir miktar etrenjit oluşturmuştur.

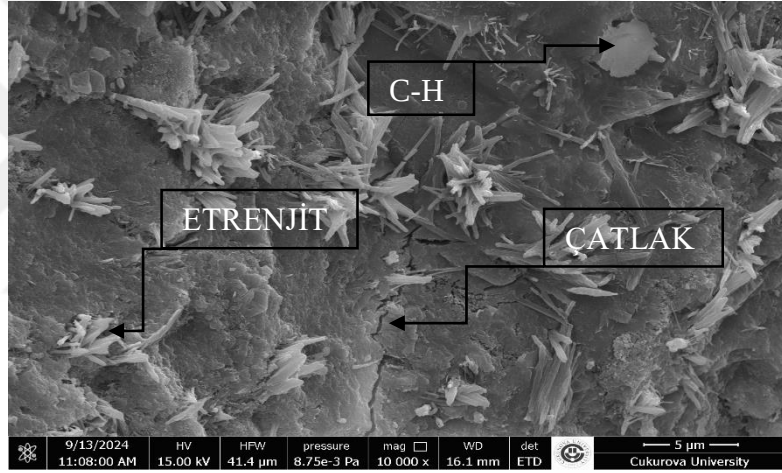
K₂SO₄ küründe ise BF35-SF numunesi dikkat çekici biçimde daha iyi bir performans sergilemiştir. SEM görüntülerinde potasyum sülfata maruz kalan BF35-SF'de belirgin etrenjit kristallerine rastlanmamıştır; daha ziyade C-S-H jelinin varlığı ve dağınık birkaç portlandit kalıntısı not edilmiştir. Bununla birlikte, az sayıda ince çatlak mevcuttur ancak bu çatlaklarda etrenjit dolgusu görülmemiştir. Bu gözlem, K₂SO₄ ortamında silis dumanlı karışımın sülfat saldırısından minimum düzeyde etkilendiğini düşündürmektedir.

BF35-SF

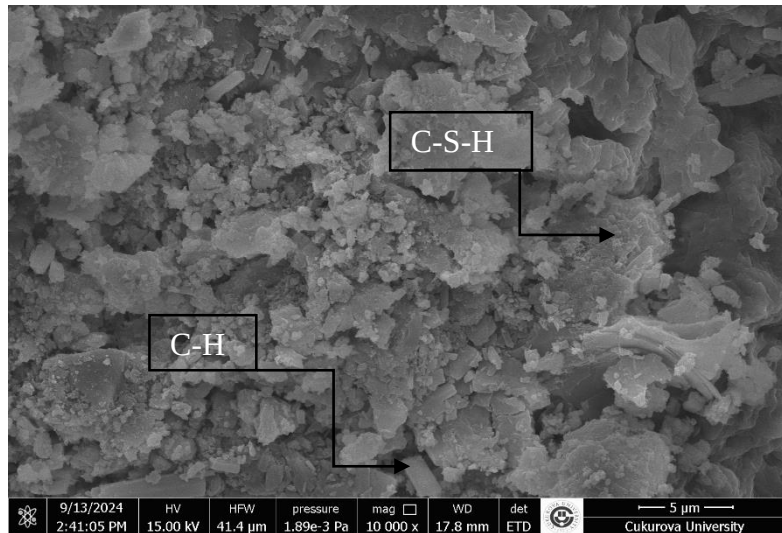
Potasyum Sülfat Rejimi



Sodyum Sülfat Rejimi



Standart Kür Rejimi

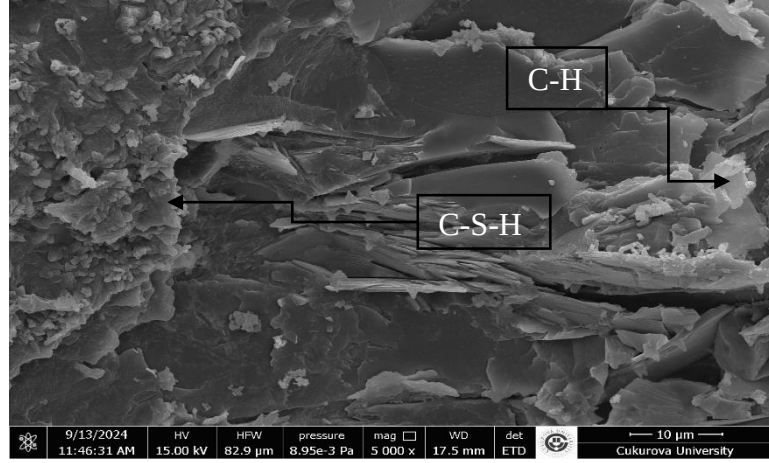


Resim 4.5. Kür rejimine göre BF35-SF kodlu karışım için SEM görüntüleri

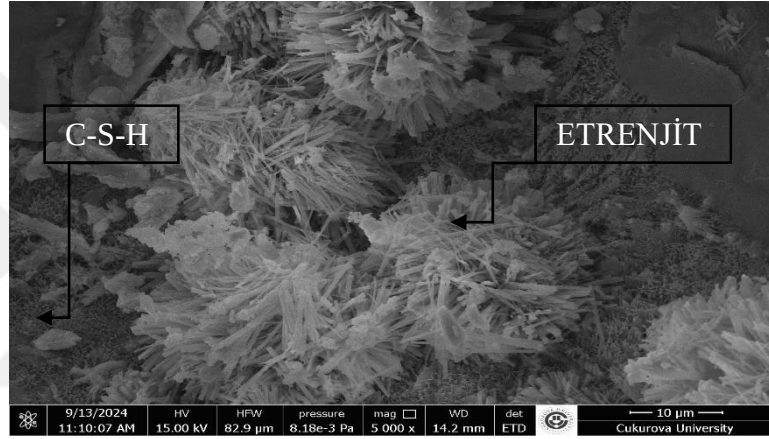
PP30-SF kodlu karışımın (PP lif Ø0.30 mm + Silis dumanı) SEM görüntüleri Resim 4.6’da verilmiştir. PP30-SF, polipropilen lif içeren karışıma silis dumanı ilave edilmiş halidir. Standart su küründe, bu karışımın SEM görüntülerinde yoğun ve homojen bir C-S-H matrisi göze çarpmakta, portlandit kristalleri ise yok denecek kadar az miktarda bulunmaktadır. Silis dumanının pozolanik reaksiyonu sonucunda Ca(OH)_2 büyük ölçüde tükendiği ve bunun yerini yeni oluşan C-S-H’nin aldığı anlaşılmaktadır. Na_2SO_4 küründe PP30-SF, sülfat saldırısına karşı SF katkısının sağladığı iyileştirmeler sayesinde, PP30’a göre daha az zarara uğramıştır. SEM analizinde, Na_2SO_4 ortamında PP30-SF numunesinde etrenjit kristalleri görülmekle birlikte, bunların yoğunluğu ve boyutları kontrol numunesine kıyasla daha düşüktür. K_2SO_4 küründe PP30 SF numunesinde de benzer şekilde sınırlı etrenjit oluşumu tespit edilmiştir. Potasyum sülfat maruziyeti sonrasında PP30-SF’nin mikroyapısında, az miktarda iğnemsiz etrenjit gözlemlenmiş, ancak yaygın bir çatlak ağı oluşmamıştır. Genel olarak PP30-SF, hem sodyum hem potasyum sülfat ortamlarında, silis dumanının desteğiyle, orijinal PP30’a kıyasla daha dirençli bir performans göstermiştir. Mikroyapı, C-S-H ağırlıklı kalmış ve zarar görmüş bölgeler liflerin de katkısıyla kısmen bütünlüğünü korumuştur.

PP30-SF

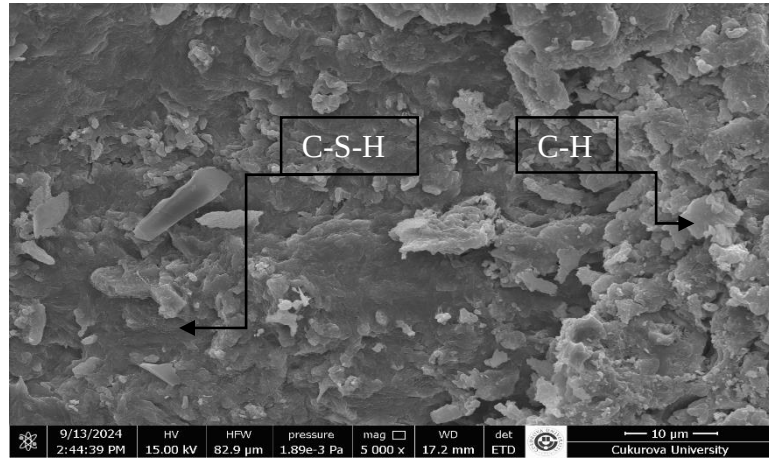
Potasyum Sülfat Rejimi



Sodyum Sülfat Rejimi



Standart Kür Rejimi

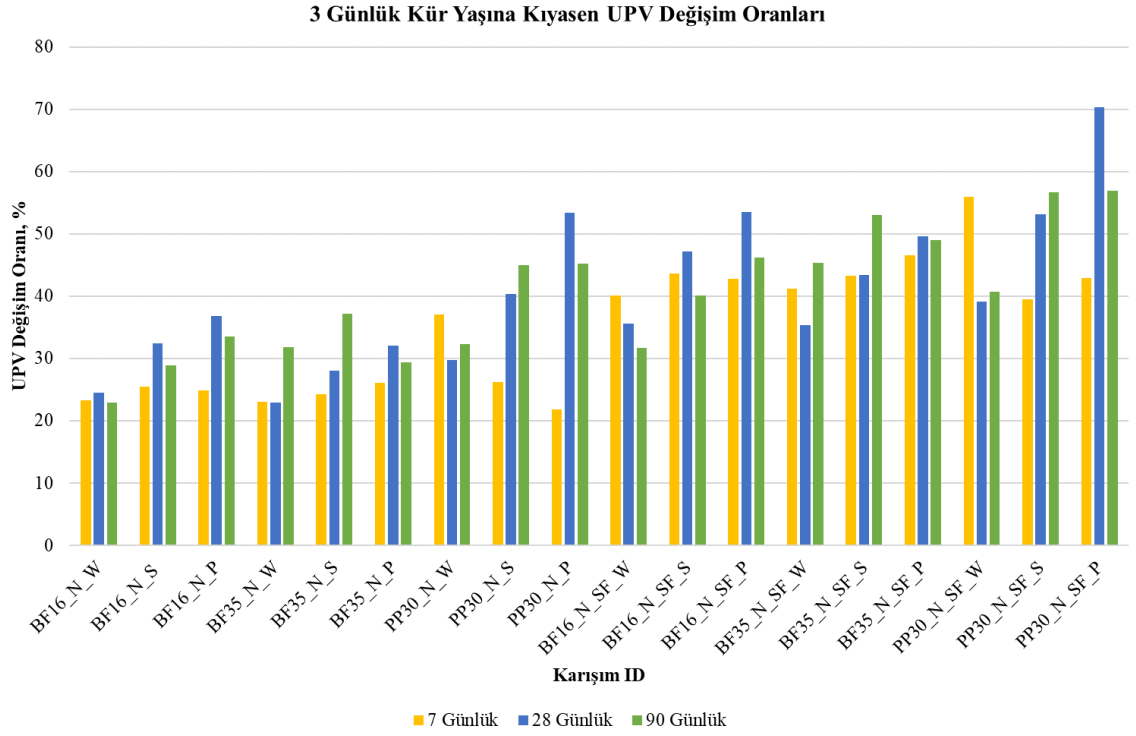


Resim 4.6. Kür rejimine göre PP30-SF kodlu karışım için SEM görüntüleri

4.3. Ultrases Dalgası Geçiş Hızı (UPV)

Şekil 4.2’de 7, 28 ve 90 günlük kür yaşlarına ait ultrases geçiş hızı (UPV) sonuçları gösterilmektedir. Materyal ve metot bölümünde detaylı şekilde ifade edildiği üzere, numuneler üç günlük kür süresinin sonunda 600 °C sıcaklığa maruz bırakılmış ve ardından, ilgili kür yaşına kadar üç farklı ortamda, yani standart su kür koşulları, sodyum sülfat çözeltisi ve potasyum sülfat çözeltisinde test edileceği kür yaşına kadar kür edilmiştir. Elde edilen grafikler incelendiğinde, kür yaşı ve karışım tasarımı parametrelerine bağlı olarak UPV değerlerinde çeşitli oranlarda farklılıklar gözlemlenmiş, bu durum malzemenin içyapısal bütünlüğünün zamana ve çevresel etkilere duyarlılığını ortaya koymuştur.

Şekil 4.2’de sunulan veriler baz alındığında 7 günlük kür yaşına ait UPV sonuçlarına göre, en yüksek ultrases geçiş hızı *değişimlerinin* polipropilen (PP) lifi içeren karışımlarda gözlemlendiği tespit edilmiştir. Buna karşılık, BF16 ve BF35 kodlu çelik lif katkılı karışımlar birbirine yakın değerlere sahip olmuş ve genel olarak PP30 katkılı karışımlara göre daha düşük UPV değerleri sergilemiştir. Numunelerin yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmasının ardından, özellikle PP liflerinin ergimesiyle oluşan boşluk yapısı nedeniyle, uygulanan kür rejimlerinden daha fazla suyun içyapıya nüfuz ettiği anlaşılmış; bu durum, silis dumanı mineral katkısı olsun ya da olmasın, PP içeren karışımlarda mikroyapısal değişimlerin daha belirgin olmasına yol açmıştır. Ayrıca, basınç dayanımı bulgularında da ifade edildiği üzere, sülfat içeren kür koşulları altında çimento esaslı yapıda sülfat bazlı yeni ürünlerin oluşması, numune yoğunluğunu artırmış ve bu da UPV değerlerinde daha büyük değişimlerin elde edilmesine neden olmuştur. Standart su kürüne tabi tutulan örneklerde ise, sülfatlı rejimlerle karşılaştırıldığında daha sınırlı bir UPV değişimi gözlenmiştir. Özellikle silis dumanı içeren sistemlerde, erken yaşlarda hidratasyonun teşvik edilmesi nedeniyle ve yüksek sıcaklık etkisiyle bu sürecin hızlandırılması sonucu nispeten daha düşük başlangıç porozitesi oluşmuş; bu da kür rejiminin mikroyapı üzerindeki etkisini artırarak UPV değişiminin bu karışımlarda daha fazla olmasına yol açmıştır.



Şekil 4.2. 3 günlük kür yaşına kıyasen 7, 28 ve 90 günlük kür yaşı için UPV değişim oranları

Şekil 4.2’de sunulan verilere göre, 28 günlük kür yaşı itibarıyla elde edilen UPV değişim oranları incelendiğinde, BF16 ve BF35 liflerinin yer aldığı karışımlarda benzer düzeyde sonuçlar elde edildiği, buna karşın en yüksek değişim oranlarının PP30 lif katkılı karışımlarda gerçekleştiği görülmüştür. Bu bulgu, önceki bölümlerde de vurgulandığı üzere, PP liflerinin yüksek sıcaklıkta erimesi sonucu oluşan daha gözenekli bir mikroyapının etkisiyle açıklanabilir. 7 günlük kür yaşında gözlemlenen eğilimle paralel olarak, sodyum sülfat ve potasyum sülfat içeren kür ortamlarında bekletilen numunelerde UPV değişim oranları, standart su kürüne tabi tutulanlara kıyasla daha yüksek düzeyde gerçekleşmiştir. Sülfatlı kür ortamlarının kimyasal etkileri ile oluşan ikincil ürünlerin malzeme yapısına katkı sağladığı ve mikroyapısal dönüşümleri hızlandırdığı düşünülmektedir. Ayrıca, 28 günlük kür süresi boyunca devam eden hidrasyon süreçleri ve silis dumanı mineral katkısının puzolanik reaksiyonlara olan etkisi, silis dumanı içeren karışımlarda daha yüksek oranda UPV değişimi ile sonuçlanmıştır.

Şekil 4.2’de sunulan 90 günlük kür yaşına ait UPV değişim oranları incelendiğinde, silis dumanı katkısı içeren numunelerde daha yüksek düzeyde değişimlerin meydana geldiği görülmektedir. BF16 ve BF35 çelik lifleriyle hazırlanan karışımlarda UPV değişim oranlarının birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir.

Buna karşılık, PP30 lifi içeren numunelerde, daha önceki bulgularda da ortaya konduğu üzere, en yüksek UPV değişim seviyeleri kaydedilmiştir. Sülfat içeren kür rejimlerinin, özellikle potasyum ve sodyum sülfat çözeltilerinin, çimento esaslı yapının mikroyapısal dönüşümünü hızlandırdığı ve bu nedenle bu ortamlarda bekletilen numunelerde UPV değişimlerinin en yüksek düzeyde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Buna karşın, standart su kürüne tabi tutulan örneklerde daha düşük UPV değişim oranları elde edilmiştir. Özellikle silis dumanı katkılı sistemlerde, süregelen puzolanik reaksiyonların etkisiyle mikroyapının zamanla daha fazla geliştiği ve bu gelişimin UPV verilerine daha yüksek oranda yansıdığı sonucuna varılmıştır.

Sonuç olarak, UPV sonuçlarına göre, en yüksek değişim oranları polipropilen (PP) lifi içeren karışımlarda kaydedilmiştir. Buna karşılık, çelik lif katkılı karışımlar (BF16 ve BF35) daha düşük ve birbirine oldukça yakın UPV değerleri sergilemiştir. Bu farklılığın temelinde, yüksek sıcaklık uygulaması sonrasında PP liflerinin erimesiyle oluşan boşlukların, suyun malzeme iç yapısına daha fazla nüfuz etmesini kolaylaştırması ve bunun sonucunda mikroyapısal dönüşümlerin daha belirgin hâle gelmesi yer almaktadır. Sülfat içeren kür ortamlarında, özellikle sodyum ve potasyum sülfat çözeltilerinde, sülfat iyonlarının etkisiyle ikincil puzolanik reaksiyon ürünlerinin oluşumu hızlanmış ve bu durum UPV değerlerinde daha yüksek değişimlerin meydana gelmesine neden olmuştur. Silis dumanı katkısı da sistemin mikroyapısal gelişimine önemli katkı sunmuş; hem hidratasyonun hızlanmasına hem de puzolanik reaksiyonlarla ilave C-S-H jellerinin oluşmasına aracılık ederek UPV değişim oranlarını artırmıştır. 7, 28 ve 90 günlük farklı kür yaşları boyunca yapılan değerlendirmelerde, PP30 katkılı karışımların her durumda en yüksek UPV değişimlerini sergilediği, buna karşılık standart su kürüne tabi tutulan örneklerde değişim oranlarının daha düşük seviyelerde gerçekleştiği belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Genel değerlendirme olarak, bu araştırmanın sonuçları göstermiştir ki yüksek sıcaklık ve sülfat gibi iki zorlu etkiye maruz kalan çimento bazlı kompozitlerde, uygun malzeme tasarımı ile performans kayıpları minimize edilebilir. Özellikle çelik lif kullanımı, yüksek sıcaklık sonrası çimento esaslı malzemenin boyutsal kararlılığını korumasına ve sülfat etkisi altında mikro çatlakların ilerleyişinin yavaşlatılmasına olanak tanımıştır. Silis dumanı katkısı ise matris yoğunluğunu artırarak hem yüksek sıcaklığın hem de sülfat saldırısının zararlı etkilerine karşı ilave direnç kazandırmıştır. Polipropilen lif katkısının mekanik dayanım üzerinde belirgin bir etkisi olmasa da, yangın anında çimento esaslı malzemenin bütünlüğünü koruyarak potansiyel bir yapısal hasarın hasarın önüne geçebileceği görülmüştür. Na_2SO_4 ve K_2SO_4 ortamlarıyla etkileşim, bize farklı sülfat tuzlarının tehlike derecelerini kıyaslama imkânı vermiş; sodyum sülfatın daha yıpratıcı olduğu anlaşılmıştır. Yüksek sıcaklık sonrası sülfata maruz kalan çimento esaslı malzeme, tekil etkilerden daha karmaşık ve hızlandırılmış bir bozulma süreci yaşayabileceği ortaya çıkmıştır. Bu bulgular, yangın geçiren betonarme yapıların, eğer sülfatlı toprak, deniz suyu veya endüstriyel kimyasal gibi ortamlarda bulunuyorlarsa, mutlaka özel önlemlerle korunması veya rehabilite edilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Sonuçlar, çoklu zarar mekanizmalarına (termal+kimyasal) maruz malzemelerin tasarımında lif takviyesi ve mineral katkı kullanımının kritik önemini vurgulamaktadır.

5.2. Öneriler

Bu tez kapsamında elde edilen bulgular ışığında, ileriye dönük bilimsel araştırmalar ve malzeme geliştirme çalışmaları için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

- Hibrit Lif Kullanımı: Çalışma, çelik ve polipropilen liflerin ayrı ayrı önemli faydalar sağladığını göstermiştir. Gelecek araştırmalarda, hibrit lif takviyesi (örneğin, çelik + PP liflerin birlikte kullanımı) incelenmelidir. Bu sayede çelik lif ve PP liflerin münferit avantajları bir araya getirilerek, sinerji oluşturularak, yüksek sıcaklık ve sülfat dayanımı daha da iyileştirilebilir.

- Farklı Lif Türleri ve Kaplamaları: Polipropilen dışında, bazalt, karbon, PVA gibi alternatif liflerin yüksek sıcaklık ve agresif kimyasal ortamlardaki performansı araştırılmalıdır. Özellikle bazalt liflerin ısıya dayanımı yüksek olup olmadığı ve sülfat ortamında dayanıklılık sağlayıp sağlamadığı incelenebilir. Ayrıca çelik liflerin sülfat korozyonuna karşı korunması amacıyla farklı kaplamalar veya paslanmaz çelik lifler denenerek, lif-matris arayüzünün agresif ortamlarda nasıl etkilendiği anlaşılmalıdır.

- Uzun Vadeli Dayanıklılık Testleri: Bu çalışma 90 güne kadar olan kür sürelerini kapsamıştır. Daha uzun maruziyet süreleri (6 ay, 1 yıl ve üzeri) boyunca yüksek sıcaklık görmüş numunelerin sülfat etkisi altındaki davranışı izlenmelidir. Özellikle 90 günden sonra ortaya çıkabilecek muhtemel dayanım ve UPV kayıplarını tespit etmek için uzun vadeli deneyler planlanmalıdır. Böylece sülfat saldırısının zamanla hızlanan zarar mekanizması daha iyi anlaşılacak ve servis ömrü tahminleri için veri sağlanacaktır.

- Farklı Yüksek Sıcaklık Seviyeleri: Bu çalışmada tek bir yüksek sıcaklık seviyesi (600 °C) kullanılmıştır. Gelecekte, farklı tepe sıcaklıklarının (300 °C, 800 °C, 1000 °C gibi) ve birden fazla ısıl döngünün (tekrarlanan yangın etkilerinin) malzeme performansına etkisi araştırılmalıdır. Farklı sıcaklıklarda PP liflerin davranışı, çelik liflerin akma dayanımını aşan durumlar veya matrisin kritik dönüşümleri (örneğin, agregaların parçalanmaya başladığı 800–1000 °C aralığı) incelenerek, lifli kompozitlerin yangın dayanım limitleri belirlenebilir.

- Mineral Katkı Optimizasyonu: Silis dumanının olumlu etkileri yanında, çok yüksek oranlarda kullanımının (>%10) termal çatlakları artırabileceği literatürde belirtilmiştir. Bu nedenle, farklı puzolanik mineral katkıları (örneğin uçucu kül, metakaolin, cüruf veya nano-silis) ve bunların optimum dozajları araştırılmalıdır. Hangi katkının, hem yüksek sıcaklık sonrası dayanım toparlanmasına hem de sülfat dayanımına en fazla katkıyı verdiği karşılaştırılmalıdır. Ayrıca silis dumanı + PP lif kombinasyonu gibi, yoğun matris ile spalling'i önleyici lif katkısının birlikte kullanım stratejileri değerlendirilebilir.

- Mikroyapısal Analizlerin Derinleştirilmesi: SEM görüntüleri önemli ipuçları vermiştir ancak daha kapsamlı bir malzeme davranış modeli için ileri mikroyapı analizleri yapılmalıdır. Örneğin, X-ışını difraksiyonu (XRD) ile sülfat reaksiyonu ürünlerinin (jips, etrenjit vb.) nicel miktarları belirlenebilir, termogravimetrik analiz (TGA) ile yüksek sıcaklık sonrası kalan bağlayıcı hidratlar ve yeniden hidratasyon düzeyi ortaya konabilir. Cıva girişim porozimetresi (MIP) veya X-ışını bilgisayarlı tomografisi (μ CT) ile ısı ve kimyasal saldırı sonrasında gözenek boyutu dağılımı ve çatlak ağının

gelişimi incelenebilir. Bu teknik çalışmalar, elde edilen mekanik sonuçların arkasındaki bilimsel mekanizmaları daha net açıklamaya yardımcı olacaktır.

Yukarıdaki öneriler doğrultusunda yapılacak çalışmalar, hem malzeme bilimi alanına katkı sunacak hem de pratik mühendislik uygulamaları için yol gösterici olacaktır. Bu tezde elde edilen sonuçlar, yüksek riskli ortamlar için lif takviyeli, mineral katkılı çimento kompozitlerinin geliştirilmesi konusunda bir temel teşkil etmekte olup, ileride yapılacak kapsamlı çalışmalarla bu malzemelerin güvenli kullanım sınırları ve performans artırma yolları daha da netleşecektir. Böylelikle, enerji santralleri, tüneller, endüstriyel tesisler, deniz yapıları gibi hem yüksek sıcaklık hem de kimyasal saldırı riski barındıran ortamlarda, güvenilir ve dayanıklı yapı malzemeleri kullanımı mümkün hale gelecektir.



KAYNAKLAR

- Abadel, A. A., Naser, M. Z., & Karihaloo, B. L. (2021). High-temperature response of steel and polypropylene fibre-reinforced ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 306, 124795. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124795>
- Açıkel, H. (2017). Betonarme kısa kolonların yangın dayanımlarının çeşitli parametreler açısından irdelenmesi, (Yüksek Lisans Tezi), Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Adar, M., Bingöl, A.F. ve Adar, E., 2020, Kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilirliğine ve yüksek sıcaklık direncine polipropilen lifin etkisi, Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9 (2), 719-732.
- Adil, G., Kevern, J., & Mann, D. (2020). Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 247, 118453.
- Akçay, O., & Çullu, M. (2022). Farklı Karışım Özelliklerine Sahip Betonların Sülfat Dirençlerinin Belirlenmesi. *ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 4(1), 21-31.
- Albayrak, M., & Kaman, M. O. (2019). Charpy darbe testinin deneysel ve sayısal analizi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(3), 945-957.
- Alcharchafche, M. A. S. (2022). Tuğla tozu katkılı beyaz çimentolu kompozitlerin mekanik ve durabilite özelliklerinin araştırılması (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Gelişim Üniversitesi, İstanbul.
- Alhamad, A., Yehia, S., Lublóy, É. ve Elchalakani, M., 2022, Performance of different concrete types exposed to elevated temperatures: A Review, *Materials*, 15(14), 5032.
- Alhassan, A. M., Soliman, A. M., & Nehdi, M. L. (2022). Impact of high temperatures on concrete incorporating silica fume: Pore structure, residual strength, and rehydration. *Cement and Concrete Composites*, 127, 104387. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104387>
- Alhozaimy, A. et al. (2014). *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(1), 99–107.
- Aral, M. (2006). Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı bir optimum tasarım, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Arslan, Y., & Yıldız, S. A. (2019). Endüstriyel Delme Artığı ile Üretilmiş Cam Lif Takviyeli Çimento Bazlı Kompozitlerin Mekanik Özellikleri. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 269–273.

- Balcan, B. (2023). Çimento esaslı kompozitlerde piezoelektrik malzemelerin kullanımı (Yüksek Lisans Tezi). Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ.
- Belgin, C. (2022). Farklı Katkı Malzemeleri Kullanılarak Üretilen Yüksek Performanslı Betonların Elektrik Direnç Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 14(2), 958-966.
- Bentur, A., & Mindess, S. (2007). *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. CRC Press.
- Betgül, Ç. (2022). Karbon Lif Takviyeli Kompozit Malzemenin Farklı Kalınlıkta Destek Plakalar Kullanılarak Delinmesi. *Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Biber, Ş.A., 2001. Karmaşık Çelik Tel Takviyeli Betonların Mekanik Davranışı, Bitirme Ödevi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Canbaz, M., & Ünüvar, C. (2016). Lif ve çimento türünün sifcon özelliklerine etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(6), 400-404.
- Chaudhary, S., & Sinha, A. (2020). Effect of Silica Fume on Permeability and Microstructure of High Strength Concrete. *Civil Engineering Journal*, 6, 1697-1703.
- Chen, F., Gao, J., Qi, B., & Shen, D. (2017). Deterioration mechanism of plain and blended cement mortars partially exposed to sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 154, 849-856.
- Choumanidis, C., Maraveas, C., & Papadopoulos, M. (2017). Hybrid fibre-reinforced concrete against explosive spalling at elevated temperatures: An overview. *Fire and Materials*, 41(8), 1004–1014. <https://doi.org/10.1002/fam.2467>
- Coşkun, Z. (2021). Metatarsal birinci kemiğin mekanik özelliklerinin incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Çavdar, K., & Bingöl, M. (2016). Farklı Takviye Malzemelerinin Kompozit Malzeme Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesine Etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 21(2), 123-132.
- Çopuroğlu, O., Öztürk, M., & Koçak, Y. (2017). Sülfat etkisi altındaki betonun performansının değerlendirilmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(1), 9–14.
- Dedeoğlu, R.Ş. (2010). Akışkanlaştırıcı Katkı Maddelerinin Beton Üzerine Etkilerinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi, Sakarya.

- Demir Şahin, D., Eker, H., & Çullu, M. (2022). Uçucu Kül İnceliğinin Betonun Sülfat Direnci Üzerine Etkisi. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(17), 287-303.
- Demirhan, S. (2020). Combined Effects of Nano-Sized Calcite and Fly Ash on Hydration and Microstructural Properties of Mortars. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 20(6), 1051-1067
- Demirhan, S. (2023). Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitlerin Eğilme Özellikleri. Politeknik Dergisi, 1-1.
- Ding, Y., Zhang, C., Cao, M., Zhang, Y. ve Azevedo, C., 2016, Influence of different fibers on the change of pore pressure of self-consolidating concrete exposed to fire, Construction and Building Materials, 113, 456-469.
- Ding, Y., Zhang, Y. X., Thomas, A., & Yu, Z. (2018). Effect of elevated temperatures on polypropylene fiber reinforced concrete. Fire Safety Journal, 100, 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2018.07.001>
- Dündar, B., Çınar, E., & Peşin, S. (2020). Bazalt ve karbon lif takviyeli betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 10(4), 1039-1048.
- Eidan, J., Rasoolan, I., Rezaeian, A. ve Poorveis, D., 2019, Residual mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete after heating, Construction and Building Materials, 198, 195-206.
- Ekşi, S. (2013). Dairesel kesitli kompozit tüp kirişlerin eğme ve burkulma davranışının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi (Doktora tezi). Sakarya Üniversitesi, Türkiye.
- Elahi, M., Shearer, C., Reza, A., Saha, A., Khan, M., Hossain, M., & Sarker, P. (2021). Improving the sulfate attack resistance of concrete by using supplementary cementitious materials (SCMs): A review. Construction and Building Materials, 281, 122628.
- Er, A. (2012). Kompozit yapı malzemelerinin performans özelliklerinin ve mimarlıkta kullanım olanaklarının araştırılması (Yüksek Lisans Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Eren, F., Keskinates, M., Felekoğlu, B., & Felekoğlu, K. T. (2023). Mineral Katkı İkamesinin Kalsiyum Alümina Çimentolu Harçların Taze Hal ve Zamana Bağlı Sertleşmiş Hal Özelliklerine Etkileri. Turkish Journal of Civil Engineering, 34(3), 139-162.
- Erol, F. (2023). Farklı molariteli ve atıkseramik tozlu alkali ile aktive edilmiş harçların mekanik ve durabilite özellikleri (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Gelişim Üniversitesi

- Erten, E. (2009). Deniz suyunun çimento tipi farklı harçların mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi geliştirilmesi (Yüksek Lisans Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Erten, E. (2016). Yüksek performanslı çimento bazlı kompozit harç karışımlarının dayanıklılığının geliştirilmesi (Doktora Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Esendemir, Ü., & Caner, A. Y. (2018). Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışının Deneysel Olarak İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22(1), 207-215.
- Estévez, E., Martín, D. A., Argiz, C., & Sanjuán, M. Á. (2020). Ultrasonic pulse velocity–compressive strength relationship for Portland cement mortars cured at different conditions. Crystals, 10(2), 133.
- Ghafoori, F. (2021). Çok katlı betonarme binaların kiriş ve kolonlarında CFRP donatı davranışlarının modelsel olarak incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Gödek, E. (2016). Pratikte kullanılabilir polimerik lif katkılı ve çimento esaslı kompozitlerin geliştirilmesi (Yüksek Lisans Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Gödek, E., Keskinates, M., Felekoğlu, B., Felekoğlu, K. T. (2016). Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerde Su/Çimento Oranı ve Mineral Katkı Türünün Çoklu Çatlak Davranışına Etkisi.
- Gražulytė, J., Vaitkus, A., Šernas, O., & Čygas, D. (2020). Effect of Silica Fume on High-strength Concrete Performance. Proceedings of the 5th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering.
- Guo, L., Wu, Y., Xu, F., Song, X., Ye, J., Duan, P., & Zhang, Z. (2020). Sulfate resistance of hybrid lif reinforced metakaolin geopolymer composites. Composites Part B-engineering, 183, 107689.
- Guo, L., Yang, Y., & Chen, B. (2019). Effect of Temperature on Micromechanical Properties of Pol-yvinyl Alcohol Lif–Matrix interface and Uniaxial Tensile Properties of High-Ductility Cementitious Composites. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 304.
- Güçlüer, K., Günaydın, O., Tekin, Ö. F. ve Şahan, MF (2017). Farklı Tipte Agregaların Kullanımının Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi , 6 (1), 107-114.
- Güngör, E. (2013). Karma lifli betonların özelliklerinin deneysel irdelenmesi (Yüksek Lisans Tezi), Balıkesir Üniversitesi
- Güvensoy, G. (2005). Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı ve Kırılma Parametreleri, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

- H.G, N., & Ali, F. (2015). Effect Of Silica Fume On Partial Replacement Of Cement On High Strenth Concrete. Matter: International Journal of Science and Technology, 1, 275-284.
- Hussein, L., Amleh, L., Siad, H., & Lachemi, M. (2018). Effect of very severe sulfate environment on bonded composite concrete system. Construction and Building Materials.
- İlhan, R., & Feyzullahoğlu, E. (2019). Cam Lif Takviyeli Polyester (CTP) Kompozit Malzemelerde Kullanılan Doğal Lifler ve Dolgu Maddeleri. ECJSE, 6(2), 355–381.
- İnce, C. (2020). Sıcak su kürünün silis dumanı takviyeli çimento harçlarının mekanik özelliklerine ve dayanıklılığına etkisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 35(1), 109-126.
- Kahveci, Y. E. (2016). Yapıştırma bağlantılı kompozit malzemelerin mekanik performansı üzerine mekanik bağlamanın etkilerinin incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Kahvecioğlu, Y. E. (2016). Yapıştırma Bağlantılı Kompozit Malzemelerin Mekanik Performansı Üzerine Mekanik Bağlamanın Etkilerinin İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı, İzmir.
- Kalaycıoğlu, H., Yel, H., & Çavdar, A. D. (2012). Çimentolu odun yünü kompozitleri ve kullanım alanları. Kastamonu University Journal of Forestry Faculty, 12(1), 122-133.
- Kalyoncu, H. (2007). Çelik, karbon ve polivinil alkol (PVA) mikroliflerin tekil ve karma olarak kullanımının çimento harçların mekanik özelliklerine etkisi geliştirilmesi (Yüksek Lisans Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Karaduman, Y. (2018). Doğal lif takviyeli mantar esaslı sandviç kompozitlerin viskoelastik özellikleri. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 24(7), 1257-1261.
- Kavazoğlu, F. B. (2021). Bakteri içeren geopolimer harçların özelliklerinin araştırılması (Yüksek Lisans Tezi). Akdeniz Üniversitesi, Antalya
- Keklik, U. (2020). Silika dumanı içeren geopolimer betonların % 5 sülfürik asit etkisinde dayanıklılık performanslarının incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Gelişim Üniversitesi, İstanbul.
- Keskinates, M. (2022). Çoklu çatlak davranışı gösteren farklı polimerik lifli çimento esaslı kompozitlerin mikromekanik tabanlı tasarımları ve kıyaslanması (Doktora Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Khan, M., Cao, M., Hussain, A., & Chu, S. (2021). Effect of silica-fume content on performance of CaCO₃ whisker and basalt lif at matrix interface in cement-based composites. Construction and Building Materials, 300, 124046.

- Khanna, A., & Kotousov, A. (2014). Stress analysis of a crack in a lif-reinforced layered composite. *Composite Structures*, 118, 139-148.
- Kısa, M., Özen, M., Değrimenci, D., Demircan, G., & Dirilmiş, M. (2017). Çevresel Etkilere Maruz Kompozit Malzemelerin Aşınma Davranışı. *HU Muh. Der. 01* (2017) p.54-59 *HU J. of Eng. 01* (2017) p.54-59. Harran Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa.
- Kızıllıgın, B. (2009). Çelik ve karbon lifli harçların sülfat etkilerine dayanıklılığının incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Klerk, M., Kayondo, M., Moelich, G., Villiers, W., Combrinck, R., & Boshoff, W. (2020). Durability of chemically modified sisal fibre in cement-based composites. *Construction and Building Materials*, 241, 117835.
- Kozak, M. (2013). Çelik lifli betonlar ve kullanım alanlarının araştırılması. *Teknik Bilimler Dergisi*, 3(1), 26-35.
- Kökmen, S. (2022). Tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin alkali silika reaksiyonu direncinin araştırılması (Yüksek Lisans Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Köse, E., & Ekici, R. (2019). Partikül takviyeli metal matrisli kompozitlerin darbe davranışları üzerine bir derleme. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 384-393.
- Kurt G. (2006). Lif İçeriği ve Su-Çimento Oranının GRC'nin Mekanik Davranışına Etkileri. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Lee, B., Choi, J., & Kim, Y. (2015). Tensile Behavior of Polyethylene Lif-Reinforced Cementless Composite. *The Korea Academia-Industrial cooperation Society*, 16, 5600-5607.
- Lee, Y. J., Jang, S. Y., & Kim, S. W. (2018). Evaluation of sulfate attack on concrete exposed to elevated temperature. *Materials*, 11(4), 612. <https://doi.org/10.3390/ma11040612>
- Leemann, A. et al. (2014). *Cement and Concrete Composites*, 45, 49–58.
- Li, H. (2015). Effects of Silica Fume on Concrete Compressive Strength. *Applied Mechanics and Materials*, 744-746, 78 - 81.
- Li, L., Shi, L., Wang, Q., Liu, Y., Dong, J., Zhang, H. ve Zhang, G, 2020, A rewiew on the recovery of fire damaged concrete with post-fire-curing, *Construction and Building Materials*, 237, 117564.
- Li, X., Bao, Y., Wu, L., Yan, Q., Ma, H., Chen, G., ve Zhang, H., 2017, Thermal and mechanical properties of high-performance fiber-reinforced cementitious composites after exposure to high temperatures, *Construction and Building Materials*, 157, 829-838.

- Liang, H., Zhang, X., Zhang, L., Wang, X., & Xue, Y. (2022). Effects of high temperature on the gas permeability and pore structure of concrete. *Construction and Building Materials*, 324, 126666. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126666>
- Liang, S., Nouri, H., & Lafranche, E. (2015). Thermo-compression forming of flax fibre-reinforced polyamide 6 composites: influence of the fibre thermal degradation on mechanical properties. *Journal of Materials Science*, 50, 7660-7672.
- Lim, T., Seok, J., & Kim, D. (2017). A Comparative Study of Energy Performance of Fumed Silica Vacuum Insulation Panels in an Apartment Building. *Energies*, 10, 2000.
- Liu, H., Zhang, Q., Li, V., Su, H., & Gu, C. (2017). Durability study on engineered cementitious composites (ECC) under sulfate and chloride environment. *Construction and Building Materials*, 133, 171-181.
- Lu, J., Liu, W., Ma, Z., & Peng, C. (2024). Volume change behavior of sodium sulfate salt during hydration and its effect on concrete deterioration. *Construction and Building Materials*, 365, 130093. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130093>
- Maheswaran, S., Iyer, N., Palani, G., Pandi, R., Dikar, D., & Kalaiselvam, S. (2015). Effect of high temperature on the properties of ternary blended cement pastes and mortars. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 122, 775-786.
- Maheswaran, S., Kalaiselvam, S., & Palanisamy, K. (2015). Influence of silica fume on high performance concrete subjected to sulphate attack. *Journal of Structural Engineering*, 42(2), 121–128.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2017). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Mehta, P.K., & Monteiro, P.J.M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill.
- Mishra, G., 2016, What is Ultrasonic Testing of Concrete for Compressive Strength? [online], <https://theconstructor.org/concrete/ultrasonic-test-on-concrete/2847/> [Ziyaret Tarihi: 4 Nisan 2021]
- Nazarimofrad, E., Shaikh, F., & Nili, M. (2017). Effects of steel fibre and silica fume on impact behaviour of recycled aggregate concrete. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 6, 54 - 68.
- Nazarimofrad, M. H., Rashidi, M., & Ghalehnovi, M. (2017). Influence of silica fume on mechanical properties and durability of high-strength concrete exposed to elevated temperatures. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 41(S1), 33–40. <https://doi.org/10.1007/s40996-017-0071-9>
- Neville, A. M. (2012). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education.

- Neville, A. M. (2016). Properties of concrete (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Nguyen, H., Kinnunen, P., Carvelli, V., & Illikainen, M. (2019). Durability of ettringite-based composite reinforced with polypropylene lfs under combined chemical and physical attack. *Cement and Concrete Composites*.
- Nicolaides, D., Kanellopoulos, A., Savva, P., & Petrou, M. (2015). Experimental field investigation of impact and blast load resistance of Ultra High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites (UHPFRCCs). *Construction and Building Materials*, 95, 566-574.
- Okçuer, T. H. (2021). Endüstriyel kenevirden kompozit malzeme geliştirilmesi (Yüksek Lisans Tezi). Aksaray Üniversitesi, Aksaray.
- Okoye, F., Durgaprasad, J., & Singh, N. (2016). Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete. *Ceramics International*, 42, 3000-3006.
- Orman, A. (2019). Tek yönlü termoplastik prepreglerde üretim yöntemi etkilerinin incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Osmançelebioğlu, B. (2022). Silika dumanı katkılı geopolimer harçların mekanik ve fiziksel özelliklerinin incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Gelişim Üniversitesi, İstanbul.
- Öz, H. Ö., & Güneş, M. (2023). Tasarlanmış çimento esaslı kompozit ile uçucu kül ve cüruf esaslı tasarlanmış geopolimer kompozitlerin mekanik ve mikroyapısal özellikleri. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 1-1.
- Özdem Baş, C. (2023). Kalsine Marn Katkılı Çimento İçeren Polipropilen Esaslı Mikro ve Makro Sentetik Lif Takviyeli Harçların Özellikleri (Yüksek Lisans Tezi), Ordu Üniversitesi, Ordu.
- Patel, P., & Dewangan, A. (2014). Effect of silica fume on fresh properties of concrete. *International Journal of Research in Engineering and Applied Sciences*, 4(4), 29–39.
- Pan, Y., Wu, C., Cheng, X., Li, V., & He, L. (2020). Impact fatigue behaviour of GFRP mesh reinforced engineered cementitious composites for runway pavement. *Construction and Building Materials*, 230, 116898.
- Paşa, O. (2018). Uçucu kül ve silis dumanı katkılı yüksek dayanıklı betonların kalıcılık özellikleri (Yüksek Lisans Tezi). Bilecik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bilecik.
- Pekmezci, B. Y., & Atahan, H. N. (2014). Kimyasal ve nano katkıları: betonda kullanımı ve beton performansına etkileri. *Hazır Beton Dergisi*, Mayıs-Haziran, 69-82.

- Pliya, P., Beaucour, A. L., Noumowe, A. (2014). Contribution of aggregates and fibers to the behavior of concrete at high temperature. *Construction and Building Materials*, 51, 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.047>
- Ponza, M. R., Iasillo, R., & Ferraro, C. (2015). Durability of high-performance concrete with silica fume under sulfate attack. *Procedia Engineering*, 109, 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.221>
- Qarluq, A. W., Polat, R., & Karagöl, F. F. (2020). Halloysit Nano-Kil, Nano-SiO₂ ve Nano-CaO'ın Tekli ve İkili Kullanımının Çimento Esaslı Harçların Özelliklerine Etkileri. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (20), 815-826.
- Rahimi, N. (2019). Karbonatlaşmanın ve sülfatların silis dumanı ve mikro katkılı betonlarda etkisi (Yüksek Lisans Tezi), Konya Teknik Üniversitesi, Konya.
- Ramazanoğlu, B., & Kaya, N. (2024). Çimento Esaslı Kompozitlerde Çatlak Oluşumu ve Çatlak Kontrolünde Lif Kullanımının ve Karışım Parametrelerinin Etkisi: Derleme. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 14(1), 422-436.
- Rong, Z., Sun, W., Xiao, H., & Wang, W. (2014). Effect of silica fume and fly ash on hydration and microstructure evolution of cement based composites at low water–binder ratios. *Construction and Building Materials*, 51, 446-450.
- Safiuddin, M. et al. (2013). *Materials & Design*, 49, 731–742.
- Santhanam, M. et al. (2012). *Cement and Concrete Research*, 42(3), 409–423.
- Santhanam, M., Sreeram, V., & Gettu, R. (2019). Performance of OPC and blended cements in sodium and magnesium sulfate solutions. *Construction and Building Materials*, 228, 116792. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116792>
- Sarı, M. (2013). Farklı tipteki liflerin betonun mekanik davranışına etkisi, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Sasanipour, H., Aslani, F., & Taherinezhad, J. (2019). Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 227, 116598.
- Seyrek, Y. (2016). Soğuk plazma tekniklerinin lifli kompozit performansına etkilerinin araştırılması (Yüksek Lisans Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Shen, D., Kang, J., Jiao, Y., Li, M., & Li, C. (2020). Effects of different silica fume dosages on early-age behavior and cracking resistance of high strength concrete under restrained condition. *Construction and Building Materials*, 263, 120218.
- Sideris, K. et al. (2015). *Cement and Concrete Composites*, 58, 60–68.
- Solmaz, N. (2016). Polimerik lif katkılı kompozitlerin deformasyon sertleşmesi davranışının incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi.

- Sümer, B. (2012). Silis Dumanı Katkılı Betonlarda Polipropilen Lif Kullanımının Beton Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi, Sakarya.
- Sümer, B., & Sarıbıyık, M. (2013). Betonda Silis Dumanı ve Polipropilen Lif Kullanımının Beton Özellikleri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi. Sakarya University Journal of Science, 17(2), 217-224.
- Şahin, M. (2007). Betonla uyumlu polipropilen elyaf takviyeli kompozitlerin üretimi ve özellikleri (Yüksek Lisans Tezi), Marmara Üniversitesi, İstanbul.
- Şimşek, O., Erdal, M., & Sancak, E. (2005). Silis dumanının çelik lifli betonun eğilme dayanımına etkisi. Yapı Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500, Teknikokullar, Ankara.
- Tang, Z., Li, W., Ke, G., Zhou, J., & Tam, V. (2019). Sulfate attack resistance of sustainable concrete incorporating various industrial solid wastes. Journal of Cleaner Production.
- Tarhan, Y. (2020). Dijital üretimli çimento esaslı kompozitlerin donma-çözülme direnci ve boşluk yapılarının incelenmesi, (Doktora Tezi), Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Taşdemir, M. A., & Bayramov, F. (2010). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı. itüdergisi/d, 1(2).
- Tiwari, S., & Bijwe, J. (2013). Various ways to strengthen the lif-matrix interface for enhanced composite performance. Surface and Interface Analysis, 45.
- Tohumcu, İ., & Bingöl, A. F. (2013). Silis Dumanı Ve Uçucu Kül Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Taze Beton Özellikleri Ve Basınç Dayanımları. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen Ve Mühendislik Dergisi, 15(43), 31-44.
- Tonoli, G., Carmello, G., Fioroni, C., Pereira, T., Rocha, G., Souza, R., John, V., & Savastano, H. (2019). Influence of the initial moisture content on the carbonation degree and performance of lif-cement composites. Construction and Building Materials.
- Tosun, K., Felekoğlu, B., Baradan, B., & Altun, İ. A. (2009). Portland Kalkerli Çimento Bölüm II-Sülfat Dayanıklılığı. Teknik Dergi, 20(98), 4737-4757.
- TS 10513, 1992, “Çelik Teller – Beton Takviyesinde Kullanılan”, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- Türk, K., & Kına, C. (2017). Çimento esaslı kompozitlerde karma lif kullanımı. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(6), 671-678.
- Türk, K., Çiçek, N., Katlav, M., & Turgut, P. (2022). Karma Çelik Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonun Elektriksel Direnci. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(2), 482-494.

- Uygunoğlu, T., & Özgüven, S. B. (2019). 3D teknolojisi ile yapı malzemesi üretimindeki gelişmeler. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3(3), 279-288.
- Uzbaş, B., & Aydın, A. C. (2018). Uçucu Kül ve Silis Dumanlı Betonların Mekanik Özelliklerinin XRD ile İncelenmesi. *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(2), 1-22.
- Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., & Shi, Z. (2017). A review on effects of sulfate attack on cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 155, 1107–1121. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.110>
- Wu, H., Lin, X. ve Zhou, A., 2020, A review of mechanical properties of fibre reinforced concrete at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, 135, 106117.
- Wu, Z., Khayat, K., & Shi, C. (2017). Effect of nano-SiO₂ particles and curing time on development of lif-matrix bond properties and microstructure of ultra-high strength concrete. *Cement and Concrete Research*, 95, 247-256.
- Wu, Z., Khayat, K., & Shi, C. (2019). Changes in rheology and mechanical properties of ultra-high performance concrete with silica fume content. *Cement and Concrete Research*.
- Xie, X., Zhou, Z., & Yan, Y. (2019). Flexural properties and impact behaviour analysis of bamboo cellulosic lifs filled cement based composites. *Construction and Building Materials*.
- Yalçın, B., & Ergene, B. (2018). Farklı malzemelere sahip hibrid kompozitlerde çatlağın mekanik davranışlara etkisinin analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(4), 616-625.
- Yastımoğlu, F., & Özkan, A. (2017). Tekrarlanan Yükler Altında Kompozit Malzemelerin Yapılarının İncelenmesini Amaçlayan Deney Aygıtı Tasarımı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 5(2), 56-66.
- Yaşar, D. (2011). Naylon Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı, (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Yazıcı, Ş., 2017, Çelik lif boyu ve kullanım oranının çelik lifli betonun özelliklerine etkisi, 5th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Baku.
- Yermak, M., Mechling, J. M., Courard, L., & Michel, F. (2017). Influence of polypropylene and steel fibres on explosive spalling and residual mechanical behaviour of concrete subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 123, 317–326. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.054>
- Yıldırım, T., Tosun Felekoğlu, K., Gödek, E., Keskinates, M., vd. (2019). Çimento esaslı lifli kompozitlerin dijital görüntü korelasyonu yöntemi ile çoklu çatlak davranışının

incelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 34(1), 479-494.

Yilmaz Akyurek, B. (2022). Takviye Lif Tipinin Biyobozunur Kompozitlerin Mekanik Performans Özelliklerine Olan Etkisinin İncelenmesi.

Yoo, D.-Y., & Banthia, N. (2017). Cement and Concrete Composites, 84, 213–231.

Yu, R., Spiesz, P., & Brouwers, H. (2016). Energy absorption capacity of a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) in quasi-static mode and under high velocity projectile impact. Cement & Concrete Composites, 68, 109-122.

Zhang, P. et al. (2014). Construction and Building Materials, 61, 1–7.

Zhang, Y. X., Ding, Y., & Thomas, A. (2020). Residual performance of concrete with steel and polypropylene fibres after exposure to elevated temperatures. Fire Safety Journal, 111, 102929. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102929>

Zhao, N., Wang, S., Wang, C., Quan, X., Yan, Q., & Li, B. (2020). Study on the durability of engineered cementitious composites (ECCs) containing high-volume fly ash and bentonite against the combined attack of sulfate and freezing-thawing (F-T). Construction and Building Materials, 233, 117313.