

YÜKSEK SICAKLIK VE SÜLFAT ETKİSİNDE ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLER



Necim KAYA

yaz
yayınları

Yüksek Sıcaklık ve Sülfat Etkisinde Çimento Esaslı Kompozitler

Necim KAYA

yaz
yayınları
2025

Yüksek Sıcaklık ve Sülfat Etkisinde Çimento Esaslı Kompozitler

Yazar: Necim KAYA

ORCID NO: 0000-0003-1478-761X

© YAZ Yayınları

Bu kitabın her türlü yayın hakkı Yaz Yayınları'na aittir, tüm hakları saklıdır. Kitabın tamamı ya da bir kısmı 5846 sayılı Kanun'un hükümlerine göre, kitabı yayınlayan firmanın önceden izni alınmaksızın elektronik, mekanik, fotokopi ya da herhangi bir kayıt sistemiyle çoğaltılamaz, yayınlanamaz, depolanamaz.

E_ISBN 978-625-5838-45-2

Temmuz 2025 – Afyonkarahisar

Dizgi/Mizanpaj: YAZ Yayınları

Kapak Tasarım: YAZ Yayınları

YAZ Yayınları. Yayıncı Sertifika No: 73086

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3
İscehisar/AFYONKARAHİSAR

www.yazyayinlari.com

yazyayinlari@gmail.com

info@yazyayinlari.com

Bu kitap, Necim KAYA tarafından hazırlanan ve “Yüksek Sıcaklık ve Sülfat Hücumuna Maruz Kalmış Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerin Mühendislik Özelliklerinin Makine Öğrenmesi Yöntemleriyle İncelenmesi” başlığını taşıyan doktora tezinden üretilmiştir. Söz konusu tez Doç. Dr. Serhat DEMİRHAN danışmanlığında tamamlanmış olup, danışman hocamız, tezden üretilecek yayınlardaki tüm akademik haklarından kendi isteğiyle feragat ettiğini beyan etmiş ve bu nedenle adı yazarlar arasında yer almamıştır.

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, çimento esaslı lifli kompozitlerin performansını etkileyen yüksek sıcaklık ve sülfat etkisi gibi çift yönlü dayanıklılık sorunlarını detaylı bir şekilde incelemektedir. Ayrıca lif türü, çimentonun uçucu kül ile ikame edilmesi, farklı sıcaklıklarda yüksek sıcaklık etkisi ve sülfat etkisi gibi faktörlerin bu kompozitlerin özellikleri üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde analiz etmek amaçlanmıştır. Son olarak, bu çalışmanın çimento esaslı lifli kompozitler üzerine yapılacak gelecekteki araştırmalara katkıda bulunmasını ve inşaat mühendisliği alanındaki bilgi birikimine değer katmasını temenni ediyorum.

Bu çalışma esnasında sabırları ve destekleri için eşime, çocuklarıma, anneme, kardeşlerime, akademik çalışmalarımda her zaman yanımda olan öğretim üyesi Ahmet Dünder'a ve hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen, emektar akademisyen babam Ekrem KAYA'ya, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Saygılarımla...

Necim KAYA

BABAM EKREM KAYA

VE

OĞLUM EKREM KAYA'YA İTHAFEN

İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ.....	1
1.1. Önceki Yaklaşımlar	2
1.2. Amaç ve Kapsam	3
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	6
2.1. Yangın ve Sülfat Etkisi.....	8
2.1.1. Çimento esaslı lifli kompozitlerde yangın etkisi....	13
2.1.2. Çimento esaslı lifli kompozitlerde sülfat etkisi.....	16
2.2. Lifler ve Lif Teknolojisi.....	21
2.3. Mineral Katkıları ve Uçucu Kül	32
2.3.1.Uçucu kül katkılı çimento esaslı malzemelerde yüksek sıcaklık etkisi.....	48
2.3.2.Çimento esaslı uçucu kül katkılı malzemelerde sülfat hücumu	52
2.4. Kireçtaşı Formasyonları ve Nano Kalsit	55
3. MATERYAL VE YÖNTEM	65
3.1. Materyal	65
3.1.1. Çimento	65
3.1.2. Uçucu kül	68

3.1.3. Nano kalsit	69
3.1.4. Agregat	72
3.1.5. Lif	72
3.1.6. Akışkanlaştırıcı	73
3.2. Yöntem	74
3.2.1. Eğilme dayanımı	82
3.2.2. Basınç dayanımı	84
3.2.3. UPV	85
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	88
4.1. Yüksek Sıcaklık Etkisi	88
4.1.1. Basınç dayanımı	89
4.1.2. Ultrases dalgası hızı (UPV)	97
4.1.3. Eğilme dayanımı	106
4.2. Sülfat Etkisi	111
4.2.1. Basınç dayanımı	111
4.2.2. UPV değerleri	118
4.2.3. Eğilme dayanımı	125
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	131
5.1 Sonuçlar	131
5.1.1. Yüksek sıcaklık etkisi	131
5.1.2. Sülfat etkisi	136

5.2. Öneriler	140
5.2.1. Yüksek sıcaklık etkisi.....	141
5.2.2. Sülfat etkisi.....	142
KAYNAKLAR.....	143

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu)
BS	: Çelik lif
CEM I 52,5 N	: Genel amaçlı, 52.5 MPa basınca dayanabilen ve normal dayanım sınıfına sahip Portland çimentosu
ÇELK	: Çimento Esaslı Lifli Kompozit
MSE	: Mean square error (Ortalama kare hatası)
NC	: Nano Kalsit
PP	: Polipropilen
R	: Korelasyon katsayısı
SEM	: Scanning Elektron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TS	: Türk Standartları
UK	: Uçucu Kül
UPV	: Ultrases Dalgası Geçiş Hızı
CH, Ca(OH) ₂	: Kalsiyum hidroksit
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrat
C ₃ A	: Trikalsiyum Alüminat
C ₄ AF	: Tetra Kalsiyum Alümino Ferrit
BS_FA0_0	: Çelik lifli, uçucu kül kullanılmayan, oda sıcaklığındaki numune
BS_FA0_200	: Çelik lifli, uçucu kül kullanılmayan, 200°C sıcaklıkta bekletilen numune
BS_FA0_500	: Çelik lifli, uçucu kül kullanılmayan, 500°C sıcaklıkta bekletilen numune
BS_FA30_0	: Çelik lifli, %30 uçucu kül kullanılan, oda sıcaklığındaki numune
BS_FA30_200	: Çelik lifli, %30 uçucu kül kullanılan, 200°C sıcaklıkta bekletilen numune
BS_FA30_500	: Çelik lifli, %30 uçucu kül kullanılan, 500°C sıcaklıkta bekletilen numune

H_FA0_0	: Hibrit lifli, uçucu kül kullanılmayan, oda sıcaklığındaki numune
H_FA0_200	: Hibrit lifli, uçucu kül kullanılmayan, 200°C sıcaklıkta bekletilen numune
H_FA0_500	: Hibrit lifli, uçucu kül kullanılmayan, 500°C sıcaklıkta bekletilen numune
H_FA30_0	: Hibrit lifli, %30 uçucu kül kullanılan, oda sıcaklığındaki numune
H_FA30_200	: Hibrit lifli, %30 uçucu kül kullanılan, 200°C sıcaklıkta bekletilen numune
H_FA30_500	: Hibrit lifli, %30 uçucu kül kullanılan, 500°C sıcaklıkta bekletilen numune
BS_FA0_NC_0	: Çelik lifli, uçucu kül kullanılmayan, nano kalsit ilaveli oda sıcaklığındaki numune
BS_FA0_NC_200	: Çelik lifli, uçucu kül kullanılmayan, nano kalsit ilaveli 200°C sıcaklıkta bekletilen numune
BS_FA0_NC_500	: Çelik lifli, uçucu kül kullanılmayan, nano kalsit ilaveli 500°C sıcaklıkta bekletilen numune
BS_FA30_NC_0	: Çelik lifli, %30 uçucu kül kullanılan, nano kalsit ilaveli, oda sıcaklığındaki numune
BS_FA30_NC_200	: Çelik lifli, %30 uçucu kül kullanılan, nano kalsit ilaveli, 200°C sıcaklıkta bekletilen numune
BS_FA30_NC_500	: Çelik lifli, %30 uçucu kül kullanılan, nano kalsit ilaveli, 500°C sıcaklıkta bekletilen numune
H_FA0_NC_0	: Hibrit lifli, uçucu kül kullanılmayan, nano kalsit ilaveli oda sıcaklığındaki numune
H_FA0_NC_200	: Hibrit lifli, uçucu kül kullanılmayan, nano kalsit ilaveli 200°C sıcaklıkta bekletilen numune
H_FA0_NC_500	: Hibrit lifli, uçucu kül kullanılmayan, nano kalsit ilaveli 500°C sıcaklıkta bekletilen numune
H_FA30_NC_0	: Hibrit lifli, %30 uçucu kül kullanılan, nano kalsit ilaveli, oda sıcaklığındaki numune

- H_FA30_NC_200** : Hibrit lifli, %30 uçucu kül kullanılan, nano kalsit ilaveli, 200°C sıcaklıkta bekletilen numune
- H_FA30_NC_500** : Hibrit lifli, % 30 uçucu kül kullanılan, nano kalsit ilaveli, 500°C sıcaklıkta bekletilen numune

"Bu kitapta yer alan bölümlerde kullanılan kaynakların, görüşlerin, bulguların, sonuçların, tablo, şekil, resim ve her türlü içeriğin sorumluluğu yazar veya yazarlarına ait olup ulusal ve uluslararası telif haklarına konu olabilecek mali ve hukuki sorumluluk da yazarlara aittir."

1. GİRİŞ

Günümüzde inşaat endüstrisi, çevresel sürdürülebilirlik, yapısal dayanıklılık, maliyet etkinliği ve enerji verimliliği gibi çeşitli faktörlerin karmaşık dengesi altında sürekli olarak evrim geçirmektedir. Bu bağlamda, yapı malzemeleri alanındaki araştırma ve geliştirme faaliyetleri, sektörün bu değişen dinamiklerine uyum sağlamak ve geleceğe yönelik sürdürülebilir çözümler sunmak için kritik bir öneme sahiptir. Çimento esaslı kompozitler, yapı endüstrisinde yaygın olarak kullanılan temel malzemelerden biridir. Ancak, bu malzemelerin performansını optimize etmek ve çeşitli endüstriyel gereksinimlere uygun hale getirmek için sürekli olarak araştırma ve geliştirme faaliyetlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, bu çalışma, çimento esaslı lifli kompozitlerin performansını iyileştirmek için çimento, uçucu kül, agrega, su, çeliklif, polipropilen, nano kalsit, uçucu kül bağlayıcı oranı, sülfat etkisi, sıcaklık derecesi parametrelerin etkisini kapsamlı bir şekilde araştırmayı amaçlamaktadır. Bir başka deyişle, bu çalışmanın odaklandığı temel parametreler, yapı malzemelerinin mükemmelliğini ve uzun vadeli

dayanıklılığını sağlamak için hayati öneme sahiptir. Araştırmanın sonuçları, inşaat endüstrisinde sürdürülebilirliği artırmak ve gelecek nesillere daha güvenli ve çevre dostu yapılar sunmak için değerli bir rehberlik sağlayacaktır.

1.1. Önceki Yaklaşımlar

Çimento esaslı kompozit malzemelerin performansı, çeşitli dış etkenlere maruz kaldıklarında önemli ölçüde etkilenebilir. Özellikle, yüksek sıcaklık ve sülfat içeren ortamlar, bu malzemelerin dayanıklılığı ve kimyasal stabilitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu zorlu koşullara karşı dirençli çimento esaslı kompozitlerin geliştirilmesi, yapı endüstrisindeki süreçleri ve yapıların uzun vadeli performansını önemli ölçüde iyileştirebilir. Önceki çalışmalarda, yüksek sıcaklığa ve sülfata dayanıklı fiber takviyeli çimento esaslı kompozitlerin geliştirilmesine yönelik çeşitli yaklaşımlar incelenmiştir. Bu yaklaşımlar genellikle malzeme bileşimi, üretim süreci ve işleme koşulları gibi faktörleri içermektedir. Malzeme bileşimi açısından, farklı lif tiplerinin kullanımı ve mineral katkı maddelerinin ilavesi gibi stratejiler, malzemenin mekanik dayanıklılığını ve kimyasal stabilitesini artırmayı amaçlamaktadır. Örneğin, polimer liflerin kullanımı,

çimento esaslı kompozitlerin çatlak direncini ve esnekliğini artırabilirken, nano boyutlu mineral katkıları, malzemenin mikroyapısını iyileştirerek dayanıklılığını artırabilir. Üretim süreci ve işleme koşulları da önemli bir rol oynamaktadır. Optimum karışım oranlarının belirlenmesi, malzemenin homojenliğini ve yapısal bütünlüğünü sağlayabilir. Ayrıca, uygun sıcaklık ve nem kontrolü, malzemenin olgunlaşma sürecini yöneterek istenilen özelliklerin elde edilmesini sağlayabilir. Önceki çalışmalar, yüksek sıcaklığa ve sülfata dayanıklı fiber takviyeli çimento esaslı kompozitlerin geliştirilmesinde önemli ilerlemeler kaydetmiştir. Ancak, bu alanda daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Özellikle, farklı lif tiplerinin ve mineral katkı maddelerinin etkileşimleri daha ayrıntılı bir şekilde incelenmelidir. Ayrıca, üretim sürecinin optimize edilmesi ve işleme koşullarının iyileştirilmesi, malzemenin istenilen özelliklere daha tutarlı bir şekilde ulaşmasını sağlayabilir.

1.2. Amaç ve Kapsam

Bu çalışma, çimento esaslı lifli kompozitlerin performansını iyileştirmek için çeşitli parametrelerin etkisini araştırmayı amaçlamaktadır. Özellikle, lif türü, uçucu kül (UK) kullanımı, nano boyutlu mineral

katkılarının yanı sıra yüksek sıcaklık ve sülfat etkilerinin bu kompozit malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu parametrelerin kombinasyonları, toplamda 24 farklı karışımın tasarlanmasını ve test edilmesini sağlamıştır. Bu çalışmanın odaklandığı temel parametreler şunlardır:

Lif Türü: Çimento esaslı kompozitlerde kullanılan lif türü, malzemenin dayanıklılığı, çatlak direnci ve esneklik gibi önemli mekanik özelliklerini etkileyebilir. Bu çalışmada, çeşitli lif türlerinin kompozit malzemenin performansına olan etkisi değerlendirilmiştir.

UK Kullanımı: UK, çimento esaslı malzemelerde çeşitli amaçlar için kullanılan yaygın bir mineral katkı maddesidir. Bu çalışmada, farklı UK oranlarının kompozit malzemenin mekanik dayanıklılığı ve kimyasal stabilitesi üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Nano Boyutlu Mineral Katkılar: Nano boyutlu mineral katkıları, çimento esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerini artırabilir ve mikroyapısını iyileştirebilir. Bu çalışmada, çeşitli nano mineral katkıların kompozit malzemenin dayanıklılığı ve mikroyapısı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Yüksek Sıcaklık Etkisi: Çimento esaslı malzemeler, genellikle değişen sıcaklık koşullarına maruz kalır. Bu

Çalışmada ise malzemenin 200°C ve 500°C gibi farklı sıcaklık seviyelerine maruz kalmasının kompozit malzemenin performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Sülfat Etkisi: Yapı malzemeleri, özellikle beton ve imento esaslı kompozitler, bazı durumlarda sülfat içeren ortamlara maruz kalabilirler. Bu durum, malzemenin dayanıklılığını ve kimyasal stabilitesini olumsuz yönde etkileyebilir. Bu çalışmada, imento esaslı lifli kompozitlerin sülfatlı ortamlara maruz kalmasının malzeme performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı, imento esaslı lifli kompozitlerin performansını iyileştirmek için çeşitli parametrelerin etkisini değerlendirmek ve bu malzemelerin yapı endüstrisindeki potansiyelini artırmaktır. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde, her bir parametre ayrıntılı olarak incelenecek ve elde edilen sonuçlar analiz edilecektir. Bu alışma, yapı malzemeleri alanında hem araştırmacılara hem de endüstri profesyonellerine değerli bir katkı sağlayacaktır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Çimento esaslı lifli kompozitler, geleneksel çimento bazlı malzemelere kıyasla üstün mekanik özellikleri ve dayanıklılıkları nedeniyle inşaat ve malzeme bilimi alanlarında büyük ilgi görmektedir. Liflerin çimento matrislerine dâhil edilmesi, çekme dayanımı, süneklik ve çatlama direncini artırarak bu kompozitleri çeşitli yapısal uygulamalar için son derece uygun hale getirmektedir. Bununla birlikte, çimento bazlı lif kompozitlerin performansı ve ömrü, çeşitli çevresel ve kimyasal faktörlerden önemli ölçüde etkilenebilir.

Dayanıklılıklarının önemli bir yönü, yüksek sıcaklıklara maruz kalmalarının etkisidir. Yüksek sıcaklıklara maruz kalmak, Çimento esaslı kompozitlerin mikroyapısında ve mekanik özelliklerinde önemli değişikliklere yol açmaktadır. Bu değişiklikler arasında hidratasyon ürünlerinin parçalanması, su kaybı ve liflerin bozulması yer almakta olup, bu durumlar birlikte kompozit malzemenin dayanımını, boyutsal kararlılığını ve bütünlüğünü azaltabilir. Termal etkilerin yanı sıra, sülfatlar gibi kimyasal bileşenler de Çimento esaslı

kompozitlerin dayanıklılığı için büyük bir tehdit oluşturmaktadır. Sülfat saldırısı, genişleyici bileşikler olan etrenjit ve alçıtaşının oluşumuna neden olarak çatlama, dökülme ve yapısal bütünlük kaybına yol açabilmektedir. Sülfat iyonları ile kompozit matrisi arasındaki etkileşimi anlamak, bu tür agresif ortamlara dayanabilen malzemeler geliştirmek için kritik öneme sahiptir.

UK gibi mineral katkı maddelerinin eklenmesi, Çimento esaslı kompozitlerin dayanıklılığını ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için yaygın bir şekilde incelenmiştir. Kömür yanmasının bir yan ürünü olan UK, puzolanik reaksiyona katkıda bulunarak gözenek yapısını iyileştirir ve kompozitlerin uzun vadeli dayanımını ve dayanıklılığını artırır. Bu mineral katkı maddesi ayrıca kimyasal saldırıların etkilerini azaltmaya ve hidrasyon ısını düşürmeye yardımcı olur. Öte yandan, yeni nesil mineral katkı olarak bilinen nano boyutlu malzemelerin, özellikle nano-kalsitin kullanımı, Çimento esaslı kompozitlerin performansını daha da artırmak için umut verici bir strateji olarak ortaya çıkmıştır. Nano-kalsit, yüksek spesifik yüzey alanı ve reaktif özellikleri ile hidrasyon sürecini önemli ölçüde iyileştirir, mikroboşlukları doldurur ve lifler ile çimento matrisi arasındaki ara yüz geçiş bölgesini geliştirir. Bu, üstün

mekanik özelliklere ve çevresel bozulmaya karşı dirence sahip daha kompakt ve dayanıklı bir kompozit yapı ile sonuçlanır.

Mevcut çalışma, yüksek sıcaklık, sülfat saldırısı, *geleneksel* (UK) ve *yeni nesil* (nano boyutlu malzemeler, örneğin NC) mineral katkı maddelerinin Çimento esaslı lif kompozitlerinin performansı üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

2.1. Yangın ve Sülfat Etkisi

Dayanıklılığı ve çok yönlülüğü ile tanınan beton, yüzyıllardır önemli bir inşaat malzemesi olarak kullanılmıştır. Ancak, performansı ve yapısal bütünlüğü zamanla çevresel faktörlerden olumsuz etkilenebilmektedir. Beton yapılar genellikle iki büyük sorunla karşı karşıya kalmakta olup, bunlar yangına maruz kalma ve sülfat saldırısıdır (Yahya ve ark., 2024; Demir ve Eker, 2024; Zaid ve ark. 2024; Manzoor ve ark., 2024). Yangınlar ister kazara ister dış etkenler nedeniyle olsun, betonu aşırı sıcaklıklara maruz bırakarak termal hasara ve potansiyel yapısal arızaya neden olabilmektedir. Deniz ve endüstriyel ortamlarda bulunan sülfat açısından zengin bölgelerde, kimyasal süreçler bozulmaya yol açarak beton altyapısına ciddi bir tehdit

oluşturabilmektedir. Bu sorunları çözmek ve beton performansını artırmak amacıyla mühendisler ve araştırmacılar, betona lifler ekleyerek çimento esaslı lifli kompozitler (ÇELK) geliştirmiştir. Liflerin eklenmesi, malzemenin mekanik özelliklerini, çatlama direncini ve enerji emme kapasitesini artırmaktadır. Bununla birlikte, ÇELK kullanımı, yangına ve sülfat saldırısına karşı dayanıklılığı konusunda yeni araştırma alanları açmaktadır (Sonar ve Sathe, 2024; Machello ve ark., 2024). ÇELK'in yangına dayanıklılığı, yangın durumlarında beton yapıların güvenliğini ve sağlamlığını sağlamak için kritik bir konudur. ÇELK'in yüksek sıcaklıklara karşı direncini, yangın direncinin ardındaki mekanizmaları ve yangın durumlarında davranışını etkileyen faktörleri anlamak, ana araştırma konularıdır. ÇELK'in yangın direncinin artırılması, uygun lif türlerinin seçilmesi, yangın geciktirici bağlayıcıların kullanılması ve mineral katkıların dâhil edilmesi gibi stratejileri içermektedir. Benzer şekilde, ÇELK'in sülfat saldırısının zararlı etkilerine karşı dayanıklılığı, özellikle sülfat iyonlarının beton matrisine nüfuz edebileceği ve genişleme reaksiyonlarına neden olabileceği ortamlarda önemlidir. ÇELK üzerindeki sülfat saldırısı mekanizmalarını anlamak ve etkilerini azaltmak için stratejiler uygulamak,

beton yapıların uzun vadeli dayanıklılığını ve sürdürülebilirliğini sağlamak açısından gereklidir.

Çalışmanın mevcut alt bölümünde, çimento esaslı lifli kompozitlerin yangın ve sülfat dayanıklılığı ile ilgili zorluklar kapsamlı bir şekilde analiz edilecektir. Temel amaç, mevcut anlayışı değerlendirmek, temel mekanizmaları açıklamak ve hem yangına hem de sülfata maruz kalmaya karşı atılan adımları ve teşebbüsleri özetlemektir.

ÇELK'in içerisinde, her biri farklı avantajlar ve özellikler sunan çeşitli lif türleri kullanılmaktadır. Lif türünün seçimi, belirli uygulamalara ve istenen performans kriterlerine bağlıdır. ÇELK'te yaygın olarak kullanılan lif türleri arasında çelik lifler, polipropilen lifler, cam lifler ve sentetik makro lifler bulunmaktadır. Çelik lifler, ÇELK'te kullanılan en eski ve en yaygın lif kategorilerinden biridir. Genellikle soğuk çekilmiş çelik telden üretilen bu lifler, kancalı, düz veya kıvrımlı gibi çeşitli konfigürasyonlarda olabilmektedir (Demirhan, 2017). Çelik lifler, betonun çekme dayanımını ve eğilme kapasitesini artırarak çatlama ve dökülmeye karşı direncini artırır. Endüstriyel zeminlerde, kaldırımlarda ve püskürtme beton uygulamalarında yaygın olarak kullanılırlar (Yang ve ark., 2024). Polipropilen lifler,

doğası gereği sentetik olup, plastik büzülme çatlamasına karşı direncini artırmak ve genel dayanıklılığı yükseltmek amacıyla beton karışımlarına eklenmektedir. Hafif olup karıştırılması, dağıtılması ve bitirilmesi kolay olan polipropilen lifler, konut beton plakalarında, kaldırımlarda ve kaplamalarda sıkça kullanılır (Hossain ve ark., 2024). İnce cam tellerden oluşan cam lifler, ÇELK'in darbe ve aşınma direncini artırmak için kullanılır. Ayrıca alkali-silika reaksiyonlarına karşı direnç sağlarlar ve prekast elemanlar, ince kesitli paneller ve mimari cepheler gibi yüksek performanslı uygulamalar için idealdirler (Muñoz Pérez ve ark., 2024). Naylon ve polyester gibi sentetik makro lifler, üstün mekanik özellikleri ve dayanıklılıkları nedeniyle ÇELK'de giderek daha fazla tercih edilmektedir. Bu lifler, plastik büzülme çatlamasını azaltmada ve betonun tokluğunu artırmada etkilidir. Sentetik makro lifler, püskürtme beton projelerinde, tünel kaplamalarında ve prekast beton bileşenlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Malhotra ve ark., 2024).

Liflerin çimento esaslı malzemeye dâhil edilmesi, genel işlevselliğini ve dayanıklılığını artıran çeşitli faydalı özellikler kazandırır. Çimento esaslı malzemede lif takviyesinin bazı önemli avantajları arasında çatlak

kontrolü, artırılmış tokluk ve süneklik, iyileştirilmiş dayanıklılık, azaltılmış büzülme çatlama ve artan yangın direnci bulunmaktadır. Lifler, mikro çatlakların beton matrisi boyunca etkili bir şekilde dağılmasında kritik bir rol oynar, böylece makro çatlak oluşumunu azaltır ve çatlak genişliklerini en aza indirir (Gamage ve ark., 2024). Bu çatlak kontrol mekanizması, beton yapıların uzun ömürlülüğünü ve sağlamlığını önemli ölçüde artırır. Liflerin varlığı, betonun enerji emme kapasitesini artırarak onu darbe ve dinamik yüklere karşı daha dirençli hale getirir. Tokluk ve süneklikteki bu iyileşme, özellikle yüksek stres ve sismik koşullarda faydalıdır (Yan ve ark., 2024a). ÇELK, donma-çözülme döngüleri, kimyasal erozyon ve aşınma gibi çeşitli çevresel stres faktörlerine karşı daha fazla direnç gösterir ve böylece beton yapıların ömrünü uzatır (Zhang ve ark., 2024). Liflerin, özellikle sentetik makro liflerin dâhil edilmesi, beton gibi geleneksel çimento esaslı malzemelerde yaygın olan plastik ve kuruma büzülme çatlama ile ilgili sorunların azaltılmasına yardımcı olur. Çelik lifler gibi belirli lif türleri, aşırı ısı koşulları altında bile yapısal bütünlüğü koruyarak betonun yangın direncine katkıda bulunur. Dolayısıyla ÇELK, geleneksel betonu birçok açıdan geride bırakan umut verici bir yapı malzemesi olarak öne

çıkmaktadır. Farklı lif türlerinin bir araya getirilmesi, mühendislerin beton karışımını çatlak önleme, tokluk ve çevresel dayanıklılık gibi belirli performans kriterlerini ve zorlukları karşılayacak şekilde uyarlamasına olanak tanımaktadır. ÇELK'in bileşiminin ve avantajlarının derinlemesine anlaşılması, bu tartışmanın sonraki bölümlerinde ayrıntılı olarak açıklandığı gibi, yangına ve sülfat bakımından zengin ortamlara tepkisini anlamak için gerekmektedir.

2.1.1.Çimento esaslı lifli kompozitlerde yangın etkisi

Yangın olaylarında oluşan yüksek sıcaklık, betonun yapısal bütünlüğü için önemli bir tehdit oluşturmakta ve potansiyel olarak çökmeye ve yıkıcı sonuçlara yol açabilmektedir. ÇELK, geleneksel betona kıyasla yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında benzersiz bir davranış sergiler. Sıcaklık arttıkça, ÇELK'in bileşen malzemeleri çeşitli termal ve mekanik dönüşümlere uğramaktadır. ÇELK'in yüksek sıcaklık ortamlarındaki davranışı dayanımın korunması, dökülme direnci, yük taşıma kapasitesi ve yangın sonrası davranış olarak özetlenebilir. ÇELK, genellikle yüksek sıcaklıklarda geleneksel betondan daha iyi mukavemet tutma özelliği

sergilemektedir (Sajid ve Kiran, 2024). Liflerin varlığı, çatlak yayılımını kontrol etmeye ve sınırlamaya yardımcı olarak, mikro çatlama varlığında bile yük taşıma kapasitesini korumaktadır. Yangın senaryolarında beton için kritik zorluklardan biri, iç basınç oluşumu nedeniyle beton yüzeyinden fırlayan patlayıcı parçalardır. Polipropilen veya çelik lifler gibi belirli liflerin kullanılması, betonun termal streslere dayanma kabiliyetini artırarak dökülme riskini önemli ölçüde azaltmaktadır (Ali ve ark., 2024). ÇELK, yüksek sıcaklıklara maruz kalma sırasında toplam performansı korunurken, sıcaklıklar yükselmeye devam ettikçe yük taşıma kapasitesi kademeli olarak azalabilmektedir. ÇELK'in yangın durumlarındaki performansı, beton matris içindeki liflerin türü, dozajı ve dağılımından etkilenir. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, ÇELK farklı yangın sonrası davranışlar sergileyebilmekte ve soğutma aşaması ve sonraki soğutma oranları, ÇELK'in artık mekanik özelliklerini etkileyebilmektedir. ÇELK'in yangın sonrası performansını anlamak, yapısal bütünlüğünü ve onarım ve rehabilitasyon potansiyelini değerlendirmek için gereklidir.

ÇELK'in yangın direnci, karışım tasarımı ve malzeme seçimi aşamasında mühendisler tarafından

dikkate alınması gereken birçok faktörden etkilenir. ÇELK'in yangın direncini etkileyen temel faktörler arasında liflerin türü ve dozajı, beton karışım tasarımı, liflerin dağılımı ile malzemenin ısıtıldığı sıcaklık ve oran yer alır (Li ve ark., 2024d). ÇELK'in yangın performansı, kullanılan liflerin türü ve miktarına bağlı olarak önemli ölçüde değişir; çünkü farklı lifler yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında farklı termal ve mekanik özellikler göstermektedir (Chen ve ark., 2024a). Çimento esaslı malzemelerin, agregaların ve bunların karışımındaki oranlarının seçimi, genel yangın direncinin belirlenmesinde kritik bir rol oynar ve optimum performans için iyi bir karışım tasarımının önemini vurgular. Beton matrisi içinde liflerin eşit dağılımının sağlanması, yapı boyunca tutarlı yangın direnci için gereklidir; yetersiz dağılım ise lokalize zayıflıklara neden olabilmektedir (Ni ve ark., 2024; Li ve ark., 2024c). Ayrıca, bir yangın senaryosunda yaşanan sıcaklık ve ısıtma oranı, değişen maruz kalma koşullarının farklı performans seviyelerine yol açabileceği göz önünde bulundurulduğunda, ÇELK'in yangın tepkisini belirlemede önemli faktörlerdir.

Mineral katkıların ÇELK'e eklenmesi, yangın direncini artırmada iki önemli avantaj sağlar. Mineral

katkılar, betonun kürleme sürecindeki ısı üretimini azaltır ve mikro yapısını olumlu yönde etkileyerek yangın performansını iyileştirir. Yaygın olarak kullanılan mineraller arasında UK, cüruf ve silis dumanı bulunur (Sajid ve Kiran, 2024). Yangına dayanıklılık açısından ÇEK'te mineral katkı kullanımının sağladığı avantajlar, kalsiyum hidroksit içeriğinin azalması, daha iyi gözenek yapısı ve artan mukavemet gelişimidir. Mineral katkılar, kalsiyum hidroksit (CH) ile reaksiyona girerek ek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli oluşturur, bu da beton içindeki CH miktarını azaltır. CH'deki bu azalma, yangın anında patlayıcı dökülme riskini azaltır. Ayrıca, mineral katkılar ÇELK'in gözenek yapısını geliştirerek geçirgenliği azaltır ve yangın durumlarında ısı ve zararlı gazların girmesini kısıtlar. Mineral katkılar ayrıca, ÇELK'te uzun vadeli dayanım gelişimini destekleyerek malzemenin yangına maruz kaldıktan sonra yük taşıma kapasitesini korumasına yardımcı olmaktadır.

2.1.2. Çimento esaslı lifli kompozitlerde sülfat etkisi

Sülfat saldırısı, çimento esaslı malzemeyi servis ömrü boyunca devamlı veya belirli periyotlarla çevreleyen ve sülfatların yoğun olduğu ortamlarda yapılarının

etkinliğini ve ömrünü olumsuz etkileyebilen yaygın bir kimyasal bozulma türüdür. Sülfat saldırısı, genellikle yeraltı suyunda, toprakta veya endüstriyel atıklarda bulunan sülfat iyonlarının beton bileşenleriyle reaksiyona girmesiyle ortaya çıkar (Wang ve ark., 2024a). Sülfat saldırısının iki ana mekanizması vardır, bunlar dış sülfat saldırısı ve iç sülfat saldırısı olmak üzere iki ana kategoride sınıflandırılabilir. Dış sülfat saldırısı, toprak veya yeraltı suyu gibi dış kaynaklardan gelen sülfatların beton yüzeyiyle etkileşime girmesiyle meydana gelir. Bu sülfatlar çimentolu matrisle etkileşerek genişleyen sülfat bileşenleri (etrenjit) oluştururken iç sülfat saldırısı ise, sülfat içeren agregalar veya karışımda sülfat bakımından zengin malzemelerin kullanılması gibi durumlarda ortaya çıkmaktadır. Bu iç kaynaklar, genişleyen etrenjit veya tomasit bileşenlerinin gelişimini tetikleyebilmektedir (Yang ve ark., 2023; Yin ve ark., 2023; Wang ve Lu, 2024). Hem dış hem de iç sülfat saldırısı, betonun hacminde genişlemeye ve çatlakların oluşmasına yol açma potansiyeline sahiptir, bu da zamanla dayanım ve dayanıklılıkta bir düşüşe neden olur.

Sülfat saldırısının çimento esaslı lifli kompozitlerin (ÇELK) dayanıklılığı üzerindeki etkisi oldukça önemli olup, dayanım kaybı, çatlama ve dökülme, hacim

genişlemesi, lif-matris ara yüzünün bozulması gibi çeşitli bozulma biçimlerine yol açabilmektedir. Sülfat saldırısı, farklı seviyelerde mikro yapısal hasar ile neticelendiği için ÇELK'in hem basınç hem de eğilme dayanımlarını azaltma potansiyeline sahiptir (Saha ve ark., 2024; Jin ve ark., 2024a; Aydoğan ve ark., 2024). Sülfat reaksiyonları sonucunda çatlama ve genişleme meydana gelmesi, yapısal kapasiteyi tehlikeye atmakta olup, genişleyen sülfat bileşenleri, çimento esaslı malzemenin yüzeyinde çatlamalara ve dökülmelere neden olarak ÇELK bileşenlerinin estetiğini ve yapısal bütünlüğünü olumsuz etkileyebilmektedir. Ayrıca, sülfat saldırısı çimento esaslı malzeme matrisi içinde hem hacim genişlemesine yol açarak iç basıncın birikmesine hem de yıkıcı çatlama olasılığının artmasına neden olabilmektedir. Bu kimyasal süreçler, lifler ve matris arasındaki ara yüzü bozarak genel boyutsal kararlılığı etkileyebilmektedir. Dayanım kaybı, çatlama ve dökülmenin birleşik etkileri, sülfatların yoğun olduğu ortamlarda ÇELK'in dayanıklılığını ve hizmet ömrünü önemli ölçüde azaltabilmektedir.

ÇELK'lerde sülfat saldırısının azaltılması, sülfat bakımından zengin ortamlardaki çimento esaslı yapıların uzun süreli dayanıklılığını ve performansını sağlamak için kritik öneme sahiptir. ÇELK'in sülfat direncini artırmak,

uygun karışım tasarımına, sülfata dayanıklı çimentoların kullanılmasına, mineral katkıların tasarıma dâhil edilmesine ve yüzey işlemlerine bağlıdır. Karışım tasarımında su-bağlayıcı oranı, çimento tipi ve içeriği, agrega seçimi ile lif dozajı ve dağılımı gibi birçok kritik faktör, sülfat direncinin artırılmasına katkı sağlamaktadır (Yu ve ark., 2023; Sobuz ve ark., 2023; Qin ve ark., 2023). Düşük su-bağlayıcı oranı, ÇELK'te daha yüksek dayanım ve daha az geçirgenlik elde etmek için gerekli olup, bu sülfat reaksiyonları için serbest suyun kullanılabilirliğini azaltmaktadır. Sülfata dirençli çimentolar gibi uygun çimento türlerinin seçimi ve çimento içeriğinin belirli sülfata maruz kalma koşullarına göre ayarlanması, sülfat direncini artırmak için hayati önem taşımaktadır. Agregaların detaylı bir şekilde değerlendirilmesi, iç sülfat saldırısını tetikleyebilecek zararlı sülfatların veya diğer maddelerin bulunmadığını doğrulamak için gerekmektedir. Beton karışımı boyunca tutarlı bir koruma ve güçlendirme sağlamak için liflerin dozajını ve dağılımını optimize etmek de oldukça önemli olup, iyi dağıtılmış lifler, sülfat saldırısı karşısında ÇELK'in yapısal bütünlüğünü korumada önemli bir rol oynayacaktır.

Sülfata dirençli çimentolar, sülfat saldırısının etkilerine karşı dayanıklı olacak şekilde özel olarak

tasarlanmıştır (Saha ve ark., 2024). Bu çimentolar, sülfat tepkilerine karşı yatkinlıklarını azaltan düşük kalsiyum alüminat seviyeleri ile tanımlanmaktadır. ÇELK, sülfat açısından zengin ortamlarda kullanılacak ise, sülfata dirençli çimento kullanımı uygun bir hafifletme yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Sülfata dirençli çimento, sülfat kaynaklı bozulmalarda yaygın olarak görülen genişleyen etrenjit ve tomasit bileşiklerinin oluşumunu azaltmaya yardımcı olur.Öte yandan, puzolanik malzemelerin ÇELK'e dahil edilmesi, sülfat direncini artırmaktadır (Karasin ve ark., 2022; Uysalve Sumer, 2011; Ju ve ark., 2024). UK, silis dumanı ve metakaolin gibi puzolanik malzemeler, kalsiyum hidroksit (CH) ile kimyasal etkileşime girerek ek C-S-H jeli oluşturur. Bu durum, sülfat etkileşimleri için mevcut CH miktarını azaltarak sülfat ataklarına karşı duyarlılığı düşürür, yani sülfata daha dirençli bir matris ile neticelenir. Mineral katkıların kullanılmasıyla, mikroyapısal geçirgenlik azalmış daha kompakt bir çimento esaslı yapı oluşumu elde edilir (Singh ve ark., 2024; Yönve Karataş, 2024; Solanki ve ark., 2023). Azalan geçirgenlik, sülfat iyonlarının çimento esaslı malzemenin içine nüfuz etmesini engelleyerek yapının sülfat kaynaklı direncini artırır.

2.2. Lifler ve Lif Teknolojisi

Çimento esaslı kompozitlerde, malzeme tokluğunu ve diğer özelliklerini iyileştirmek ve geliştirmek için çeşitli lifler kullanılmaktadır. Çimento esaslı lifli kompozitlerde (ÇELK) kullanılan çelik lifler uzun bir süredir lifli beton üretiminde tercih edilsede, modern çelik lifler (a) yüksek narinlik, (b) daha karmaşık geometriler ve (c) genellikle yüksek dayanım özellikleri nedeniyle daha popüler hale gelmiştir. Çelik liflere göre daha etkili takviye sağladıkları için, polietilen, polipropilen, naylon mono ve PVA gibi lifler daha cazip bir seçenek olarak öne çıkmaktadır (Zhaove ark., 2023; Al Ghalive ark., 2023). Liflerin mekanik ve geometrik özellikleri farklılık göstermekte olup, bu iki özellik betonun genel özelliklerini etkilemektedir (Ayawannave Poowancum, 2024). Lifler, betonun (a) tokluğunu artırmak, (b) çatlak genişliklerini azaltmak, (c) plastik rötre çatlaklarını önlemek ve (d) yangın sırasında betonun bozulmasını ve dökülmesini engellemek gibi performans özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır.

ÇELK, kompozit bir malzeme olduğu için içindeki bileşenlerin performansından etkilenmektedir. Bu bağlamda, ÇELK'in önemli bileşenlerinden olan liflerin (a) türü, (b) uzunluğu, çapı ve narinliği, (c) hacimsel oranı ve

(d) matris içindeki düzgün dağılımı gibi temel özellikleri, kompozit malzemenin davranışını belirlemede kritik rol oynar (Wangve ark., 2024b; Eidve ark., 2024). Farklı mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip lifler geniş bir yelpazede sunulur ve çimento bazlı matrisleri takviye etmek için kullanıldıkları için, liflerin türü, geometrik şekilleri ve matris içindeki dağılımları, liflerin performansını doğrudan etkileyen ana faktörlerdir. Bu nedenle, liflerin kompozitteki kullanım amacını ve davranışını belirleyen geometrik ve mekanik özelliklerinin, ÇELK'in dayanım ve dayanıklılık özelliklerini modifiye etmek için uygun olması gerekmektedir. Böylece, belirli bir amaç için üretilecek veya tasarlanacak yüksek performanslı kompozitten beklenen performans özellikleri sağlanabilir. Yüksek dayanıma sahip gevrek matrislere sahip kompozitlerin mekanik performansı, lifler aracılığıyla çatlakların köprülenmesinden önemli ölçüde etkilenir (Xieve ark., 2024). İlk çatlak oluşumunun ardından yüklerin liflere aktarılması ve mikro/makro çatlakların lifler tarafından köprülenmesi, çeşitli lif türlerinin kullanımıyla ÇELK'lerin performans özelliklerinde iyileşmeler sağlar. Çimento esaslı malzeme içindeki lifler, malzemenin mikro yapısal ağ yapısını oluşturduğundan ve agregalardan daha geniş

bir yüzey alanına sahip olduğundan, daha fazla çimento hamurunun adsorbe edilmesine neden olur ve bu da karışımın viskozitesini artırır. Liflerin taze beton karışımına eklenmesi, maksimum agrega tane boyutu, lif hacmi, lif türü, lif geometrisi ve lif narinlik oranı gibi çeşitli parametrelere bağlı olarak işlenebilirliği genellikle düşürür (Gencelve ark., 2011).

Liflerin boylarının çaplarına olan oranı, narinlik oranı olarak adlandırılır. Bu oran, liflerin matrisle olan aderansını etkiler. Narinlik oranı arttıkça, liflerin çekme dayanımı da artar ve bu durum ilk çatlak oluşumundan sonra performansın iyileşmesine yol açar (Demirhan, 2017). Ancak, narinlik oranının yükselmesi liflerin uzunluğunu da artırır ve bu durum liflerde topaklaşmalara neden olabilir, bu da kompozit malzemenin performansını olumsuz etkiler. Öte yandan, liflerin uzunluğu (narinlik) arttıkça kompozit malzemenin performansında iyileşmeler görülebilir. Düşük narinlik oranlarında ise lifler taze beton içinde daha kolay dağılır. Genel olarak, ÇELK'lerde narinlik oranı 20 ile 100 arasında değişen lif türleri kullanılmaktadır. Lif türü ve betondaki hacimsel kullanım oranı, ÇELK'lerin özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Lif donatılı betonlarda, hacimsel lif kullanım oranı genellikle %2-3 arasında olup, bu oran

ÇELK'nin kullanım amacına göre değişiklik gösterebilir. Yüksek hacimlerde lif kullanımı, karışım sırasında topaklaşmalara ve işlenebilirlikte bozulmalara yol açabilir. Ayrıca, lif kullanım oranı arttıkça eğilme dayanımında ve matris tokluğunda artış gözlemlenir. ÇELK'lerin mekanik performansı için liflerin dağılımı kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle hem taze hem de sertleşmiş kompozit malzemenin istenen performansının sağlanması, liflerin matris içerisindeki dağılımına bağlıdır. Liflerin etkinliği, matris içerisindeki dağılımlarına bağlı olarak mekanik özelliklerin geliştirilmesinde etkili olur (Demirhanve ark., 2020). Liflerin matris içinde homojen olarak dağılması ve gerilme doğrultusundaki çatlak açıklıklarına dik olarak yerleştirilmesi, liflerin performansını en üst seviyeye çıkarır (Erdemve ark., 2020). Liflerin özgül ağırlığına bağlı olarak, yüksek özgül ağırlığa sahip lifler kalıplara yerleştirildikten sonra aşağıya doğru çökme eğilimindedir. Taze beton, üretim yöntemi, sıkıştırma ve kalıp geometrisi gibi pek çok parametreye bağlı olarak liflerin dağılımı değişiklik gösterebilir (Demirhan, 2017). Liflerin dağılımındaki farklılıklar, kompozitin mekanik özelliklerini belirleyen deney sonuçlarında farklılıklara yol açabilir ve değişim katsayısı, basınç dayanımına kıyasla daha yüksek olabilir. Liflerin karışım içerisindeki

dağılımını iyileştirmek için lif donatılı taze betonun nispeten plastik ve kohezif olması gerekmektedir.

ÇELK, beton ve çelik liflerden oluşan bir kompozit malzeme olduğundan dolayı çimento esaslı malzemenin mekanik özelliklerini, özellikle çekme dayanımı, eğilme dayanımı, tokluk ve çatlak direncini önemli ölçüde artırır. Bu gelişim, yüksek eğilme performansı ve etkinliğiyle bilinen ÇELK'in inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır. ÇELK'lerin üretiminde daha çok tercih edilen çelik lifler, düz, kancalı uçlu, kıvrımlı ve deforme olmuş gibi çeşitli tiplerde olabilmekte olup, boy/çap oranı ise performans açısından kritiktir. ÇELK, endüstriyel zemin kaplamaları, kaldırımlar, prekast beton ürünler ve yapısal bileşenler gibi çeşitli uygulamalarda kullanılır ve artan yük taşıma kapasitesi, geliştirilmiş dayanıklılık, azaltılmış bakım maliyetleri ve artırılmış güvenlik gibi avantajlar sunar. Ancak, yüksek malzeme maliyetleri, işlenebilirlik sorunları ve liflerin eşit dağılımı gereksinimi gibi zorluklar dikkate alınmalıdır (Akeedve ark., 2022). Bu zorluklara rağmen, ÇELK'in ağır yüklere dayanma, aşınmaya direnç gösterme ve dinamik ve darbe yükleri altında üstün performans sergileme yeteneği, onu modern inşaat uygulamalarında değerli bir malzeme haline getirmektedir.

Çelik lifler, çatlakları köprüleyip yayılmasını önleyerek betonun çekme dayanımını artırır; bu, çekme gerilmelerinin önemli olduğu kaldırımlar ve döşemeler gibi uygulamalar için büyük bir öneme sahiptir. Ayrıca, betonun eğilme dayanımını artırarak, eğilme ve kopmalara karşı daha dirençli hale getirir; bu da özellikle kirişler ve eğilme kuvvetlerine maruz kalan yapısal bileşenler için yararlıdır (Wangve ark., 2021b; Turker ve Torun, 2020). Çelik lifli ÇELK'ler, düz betona göre daha yüksek tokluk ve süneklik sunar, bu da sismik aktiviteler ve darbelere karşı dayanıklı yapılar için önemli bir özellik olan arızadan önce belirgin bir deformasyona izin verir. Ek olarak, çelik lifler, köprüleme işlevi görerek gerilimi daha geniş bir alana yayar, çatlak genişliklerini azaltır ve beton yapıların dayanım ve dayanıklılığını, özellikle eğilme performansını artırır (Live ark.,2020). Çelik lifli ÇELK'ler; ağır yükleri taşıma, aşınmaya karşı direnç gösterme ve dinamik ve darbe yükleri altında üstün dayanıklılık ve performans sunma yeteneği nedeniyle endüstriyel zeminler, kaldırımlar, prekast beton ürünleri ve yapısal elemanlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Artan yük taşıma kapasitesi, geliştirilmiş dayanıklılık ve azalmış bakım maliyetleri gibi avantajlarına rağmen, yüksek maliyetler, işlenebilirlik sorunları ve homojen lif

dağılımı gibi zorlukların yönetilmesi gereklidir. Çelik lifli ÇELK'lerin yüksek tokluğu ve çatlama direnci, özellikle yüksek stresli ortamlarda ve sismik aktiviteye açık bölgelerde avantaj sağlar, yapıların ömrünü uzatır ve onarım sıklığını azaltır (Weive ark., 2024).

ÇELK, inşaat uygulamalarında dayanımı, dayanıklılığı ve çatlama direncini önemli ölçüde artıran son derece çok yönlü ve yüksek performanslı bir malzeme olduğundan dolayı, çelik lifleri beton karışımına entegre ederek, ÇELK çekme dayanımı, eğilme dayanımı, tokluk ve çatlama ile dökülmeye karşı direnç gibi mekanik özellikleri geliştirir ve böylece genel performansını büyük ölçüde artırır. Bu iyileştirmeler, ÇELK'i özellikle yüksek dayanıklılık ve yük taşıma kapasitesi gerektiren uygulamalar için ideal hale getirir ve inşaat sektöründe olağanüstü bir değer sunar.

Lifler ile matrisler arasındaki arayüzdeki fiziksel ve kimyasal süreçlerin anlaşılması, kompozit yapı malzemelerinin, özellikle son yıllarda öne çıkan çimento esaslı lifli kompozitlerin davranışını kavramak için temeldir; çünkü lifler yük iletimi için ana ortam olarak işlev görür. Kompozit malzemelerin özelliklerini etkileyen lif-matris arayüzünün önemli rolü, bu konunun önemini vurgular. Sonuç olarak, lif-matris arayüzünün belirleyici

özellikleri, çelikten inşa edilenler de dâhil olmak üzere yaygın olarak kullanılan kompozit malzemelerin ve altyapıların yapısal bütünlüğünün korunmasında büyük öneme sahiptir.

ÇELK'lerde, lif ile matris arasındaki bağlanma gücü, lifin, matrisin ve arayüzey geçiş bölgesinin (ITZ) özelliklerinden etkilenir. Çok sayıda çalışma, lif-matris çekme davranışını araştırarak şu parametrelere odaklanmıştır (Demirhanve ark., 2020; Erdemve ark., 2020): (1) liflerin türü ve geometrisi, (2) liflerin hizalanması (oryantasyonu), (3) liflerin yüzey işlemleri, (4) matrisin mukavemeti ve bileşimi ve (5) yükleme hızı. Lif tipinin lif-matris bağı üzerindeki etkisini en detaylı şekilde inceleyen çalışma Chin ve Xiao (2012) tarafından yapılmıştır. Çalışmalarında, (1) düz kıvrımlı, (2) düz uçlu, (3) kancalı uçlu, (4) yuvarlak kıvrımlı ve (5) çift ankrajlı çelik lifler gibi çeşitli lif türlerini değerlendirmişlerdir. Sonuçları, düz kıvrımlı liflerin en yüksek çekme yükünü sağladığını göstermiştir (50 mm uzunluğunda ve 1.14 mm çapında lifler için 1.1856 kN). Öte yandan, en yüksek çekme tokluğu (50 mm uzunluğunda ve 1.00 mm çapında lifler için 10.8 Nm) düz uçlu çelik liflerde elde edilmiştir. Chin ve Xiao (2012), lif deformasyonlarının boyutunun, miktarının, yoğunluğunun veya derecesinin artırılmasının

nihai çekme yüklerini yükselttiğini ancak çekme tokluğunu azalttığını ve bunun tersinin de geçerli olduğunu belirtmiştir. Richardson ve Heather (2013), kancalı çelik liflerin elyaf-matris bağına 3D çelik liflerle karşılaştırmış ve matrisin 3D liflere olan bağlanma mukavemetinin kancalı çelik liflere göre üç kat daha fazla olduğunu bulmuştur. Ancak, Richardson ve Heather (2013) kancalı liflerin, 3D liflerin gerilme mukavemetinden daha yüksek bir mukavemete sahip olduğunu ifade etmiştir.

Çimento esaslı lifli kompozitlerde yaygın olarak kullanılan polipropilen lifler, birçok faydalı fiziksel, mekanik, termal ve kimyasal özellik sunmaktadır. Yaklaşık 0.91 g/cm^3 gibi çok düşük bir yoğunluğa sahip olan bu lifler, genellikle 0.02 mm ile 0.3 mm arasında çaplara ve 6 mm, 12 mm ve 19 mm uzunluklara sahip hafif kompozitlerin oluşturulmasına katkıda bulunur. Mekanik olarak, 350 ila 750 MPa arasında gerilme dayanımları, 3.5 ila 5 GPa arasında Young modülü ve %10 ile %25 arasında kopma uzaması sunarak kompozitin gerilme kapasitesini, elastikiyetini ve sünekliğini artırmaktadır. Kopma anındaki yüksek uzamaları, mükemmel darbe direnci sağlar. Termal olarak, polipropilen lifler 160 ila 170°C civarında bir erime noktasına, düşük termal iletkenliğe ve

nispeten yüksek bir termal genleşme katsayısına sahiptir. Kimyasal olarak, bu lifler asitler, bazlar ve tuzlar dahil birçok maddeye karşı dirençlidir ve düşük su emilimi kompozitin boyutsal stabilitesini artırır. Ayrıca, korozyon direnci, özellikle zorlu çevre koşullarında kompozitlerin dayanıklılığını önemli ölçüde artırır.

Polipropilen lifler, Çimento esaslı lifli kompozitlere eklendiğinde, malzemenin genel performansını artıran birçok fayda sağlamaktadır. Hem plastik rötre hem de kuruma büzülmesi çatlaklarını kontrol etmede önemli bir rol oynamakta ve bu sayede çatlakları köprüleyerek ve çatlama sonrası ek direnç sağlayarak kompozitin tokluğunu artırır (Ali ve ark., 2024; Zhang ve ark., 2020). Üstün kimyasal direnci ve düşük su emilimi, özellikle donma-çözülme döngülerine (Ren ve Lai, 2021) ve sülfat saldırısına karşı direncin gerekli olduğu zorlu çevre koşullarında (Farhan ve ark., 2023) kompozitin dayanıklılığını önemli ölçüde artırır. Bu lifler, taze betonun işlenebilirliği üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahiptir ve özel ekipman gerektirmeden diğer bileşenlerle kolayca karıştırılmalarına olanak tanır. Ekonomik açıdan, polipropilen lifler diğer sentetik ve doğal liflere kıyasla uygun maliyetli bir seçenektir (Ali ve ark., 2020) ve farklı uygulama ihtiyaçlarını karşılamak için monofilament ve

fibril gibi çeşitli formlarda mevcuttur. Çevresel olarak, polipropilen lifler toksik değildir, inerttir ve geri dönüştürülebilir, bu da onları sürdürülebilir inşaat uygulamaları için ideal hale getirir.

Polipropilen lifler, Çimento esaslı kompozitlerin özelliklerini geliştirmek için çok yönlü ve etkili bir çözüm sunarak, çeşitli inşaat mühendisliği uygulamalarında popüler bir seçenek haline gelir. Endüstriyel zemin kaplamalarında çatlamayı azaltmak ve darbe direncini artırmak amacıyla kullanılırlar. Ayrıca, borular, fayanslar ve bloklar gibi prekast beton ürünlerinin dayanıklılığını artırmak için de tercih edilirler. Tünel ve şev stabilizasyonunda püskürtme beton uygulamalarında kullanıldıklarında, yapışmayı iyileştirir ve geri tepmeyi azaltırlar (Blazy ve Blazy, 2021; Liu ve ark., 2021). Üstün kimyasal dirençleri ve dayanıklılıkları sayesinde deniz yapıları için de uygundur. Polipropilen liflerin önerilen dozajı, özel uygulama gereksinimleri ve istenilen sonuçlara bağlı olarak beton hacminin %0.1 ile %0.5 arasında değişir. Karışım tasarımının lifleri barındıracak şekilde ayarlanması ve kompozit içinde eşit dağılım sağlanması önemlidir. Topaklanmayı önlemek ve liflerin düzgün dağılmasını sağlamak için uygun karıştırma yöntemleri gereklidir (Wangve ark., 2021a).

2.3. Mineral Katkılar ve Uçucu Kül

Bir katkı maddesi, genellikle birlikte karıştırılan bir malzeme olarak tanımlanır. Çimento ve betonda kullanılan pek çok ilave malzeme, çimento veya betonla birlikte karıştırıldıkları için bu geniş tanım kapsamında katkı maddesi olarak kabul edilebilir. Öte yandan, beton ve betonun üretilmiş olduğu çimento esaslı malzemelerin tanımlandığı terminolojide daha net terimler kullanılmaktadır. American Concrete Institute ACI116 (2005: 116R-2) tarafından tanımlandığı şekliyle, katkı maddesi '*su, agrega, hidrolik çimento ve lif donatı dışında, taze karışımın priz veya sertleşmiş özelliklerini değiştirmek amacıyla çimentolu bir karışımın bileşeni olarak kullanılan ve karışımdan önce veya karışım sırasında harmana eklenen bir malzemedir.*' Benzer özellikteki malzemeler, üretim sırasında hidrolik çimentolara öğütme veya harmanlama yoluyla eklendiklerinde ilave olarak adlandırılır. Tercih edilen her iki terimin bazıları yaygın olarak kullanılırken diğerleri ise nispeten daha sınırlı uygulamalara sahip olan çok geniş bir malzeme yelpazesini kapsamaktadır. Literatürde, betonun ana bileşenlerine ilave olarak eklenen katkılar genel olarak kimyasal katkılar ve mineral katkılar olarak iki temel isim çatısı altında toplanmaktadır. Kimyasal katkılar, suda çözünebilen bileşikler olan hava sürükleyici

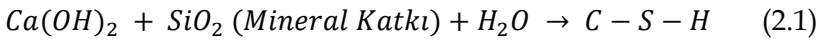
(hava sürükleyici katkıların bir kısmı suda çözülmediği için bazı kaynaklarda kimyasal katkının dışında sınıflandırılmaktadır), su azaltıcı, yüksek oranda su azaltıcı, priz geciktirici ve priz hızlandırıcı maddeleri içerir ve betona çok küçük miktarlarda eklenirler. Mineral katkıları ise betona büyük miktarlarda eklenebilen ince öğütülmüş çözünmeyen mineral maddelerdir. Çimento ikame malzemeleri ve tamamlayıcı çimentolu malzemeler gibi terimler bazen mineral katkıları ile eş anlamlı olarak kullanılsa da; hiçbir mineral katkıların çimentolu sistemlerdeki işlevini tam olarak açıklamaz. Mineral katkıları, beton gibi çimento esaslı malzemelerde ince agreganın bir kısmının yerine geçebildiği gibi başka bir temel bileşen olarak da kullanılabilir. Ancak, bunlardan sadece birkaçı kendi başına sınırlı hidrolik aktiviteye sahip olduğundan çimentolu olarak adlandırılabilir.

Mineral katkıların betonda doğrudan bileşen olarak veya Portland Çimentosu (PC) ile birlikte kullanılmasının temel nedenleri hem taze betonun işlenebilirliğini hem de sertleşmiş betonun dayanıklılığını artırmaktır. Aslında, betonun neredeyse her özelliğini etkilemekle birlikte bu etki mineral katkının hem fiziksel hem de kimyasal özelliklerine göre değişkenlik göstermektedir. Çimento ve

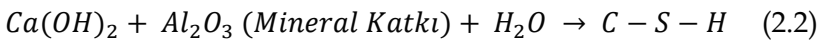
betonda mineral katkıların kullanımında teknik nedenlerin yanı sıra ekonomik ve ekolojik nedenler de aynı derecede önemli, hatta bazen daha önemlidir. PC üretimi, tüm süreci itibariyle yoğun enerji gerektiren bir prosestir. Örneğin; 1 ton PC üretiminde yaklaşık 115 kWh elektrik enerjisi ve 4 GJ yakıt enerjisi tüketilmekle birlikte, 1 ton PC üretimi ise yaklaşık 0.87 ton CO₂ emisyonu ile neticelenmektedir. Bu emisyonların yaklaşık yarısı, PC'nin üretiminde ham maddeolarak kullanılan kalkerli hammaddenin ısıl işlem sırasında ayrışmasından dolayı oluşmaktadır. Bu nedenle, çimento ve betonda mineral katkıların kullanılması daha az enerji tüketimi ve klinkerleme işlemi gerektirmedikleri için daha düşük sera gazı emisyonları ile sonuçlanır. Bu da mineral katkıları hem ekolojik yapmakta hem de üretilen çimento malzemesinin daha ekonomik olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, bu mineral katkıların çoğu endüstriyel yan ürünleri olmakla birlikte kullanılmadıklarında ciddi çevre kirliliğine neden olan atıklardır.

Mineral katkıları üç kategoriye ayrılabilir: (1) düşük reaktiviteli veya reaktivitetsiz malzemeler, (2) puzolanlar ve (3) gizli hidrolik malzemeler olmak üzere. Birinci kategoride yer alan öğütülmüş kireçtaşı, dolomit, kuvars ve hidratlı kireç gibi malzemeler, genellikle taze betonun

işlenebilirliğini artırmak amacıyla kullanılır, özellikle ince agrega içeriği yetersiz olan betonlarda. Bu tür betonlar ayrışma ve terleme eğilimindedir, bu nedenle iri agrega ve su tutma kapasiteleri (kohezivite) ince agrega içeriği artırılarak iyileştirilmelidir. Puzolanlar, ACI Komitesi 216 raporunda (2005) *"kendi başına bağlayıcı özelliği çok az olan veya hiç olmayan, ancak ince bölünmüş halde ve nem varlığında, çimentolu özelliklere sahip bileşikler oluşturmak için normal sıcaklıklarda kalsiyum hidroksit ile kimyasal olarak reaksiyona giren silisli veya alüminli bir malzeme"* olarak tanımlanır. Puzolanın kalsiyum hidroksit ile reaksiyonu puzolanik reaksiyon olarak adlandırılmakta olup, puzolanik malzeme amorf veya camsı yapıda olduğu zaman puzolanik reaksiyonlar gerçekleşmektedir ve bu durum Denklem 2.1 şeklinde yazılabilir:



Benzer şekilde, puzolan içindeki alümina, nemli ortamlarda kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek kalsiyum alüminat hidratları oluşturmaktadır. Bu durum Denklem 2.2'de verilmiştir.

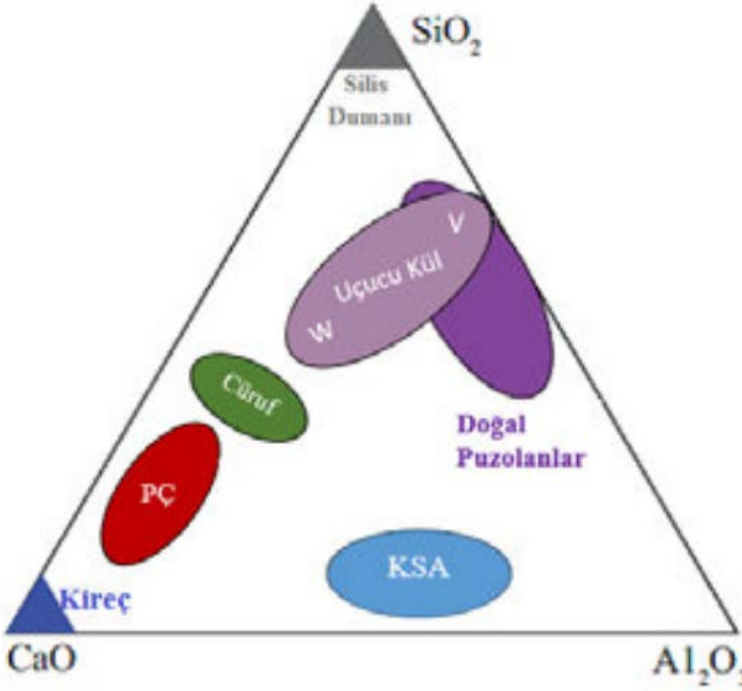


Bir puzolan doğrudan kalsiyum hidroksit ile karıştırılabilmekle birlikte, PC ile kullanıldığında ise PC'nin hidratasyonu sırasında oluşan $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girer. Puzolanik reaksiyonlar genellikle kademelidir. Silika veya alümina içeren çeşitli malzemeler puzolanik özelliklere sahiptir. Bunlar arasında volkanik küller, tüfler, diatomlu toprak ve pumisit gibi doğal malzemeler ile düşük kireçli UK, silika dumanı ve pirinç kabuğu külü gibi endüstriyel atıklar bulunabilmektedir. Doğal puzolanlar direkt kullanım için uygun olmadıklarından dolayı için genellikle kırma, öğütme ve bazen boyut ayırma işlemleri kullanılır. Killerin ve şeyllerin puzolanik özellik kazanabilmesi için termal olarak 600-900°C arasında aktive edilip ardından hızla soğutulması gerekmektedir. Bu şekilde mikro yapıları kristal yapıdan amorf yapıya dönüşür (Dong ve ark., 2023a; Garces-Vargas ve ark., 2024). Yan ürün malzemeler genellikle özel işlemlere ihtiyaç duymazlar, ancak bazen kurutma ve partikül boyutlarının daha da küçültülmesi gerekebilir.

Puzolanların betonda geniş kullanım alanları arasında işlenebilirliğin iyileştirilmesi, hidratasyon ısısının ve ısı oluşum hızının düşürülmesi, birçok dayanıklılık özelliğinin geliştirilmesi ve betonun ileri yaş dayanımına

katkıda bulunması bulunmaktadır. Ayrıca, puzolanlar ikincil hidrolik malzemeler olarak bilinirler; su ile reaksiyona girerek çimentolu ürünler oluşturma yeteneğine sahiptirler. Ancak bu reaksiyon, PC'den çok daha yavaş gerçekleşir ve genellikle alkali veya sülfat kökenli bir kimyasal aktivatör gerektirir (Villaquirán-Caicedo ve de Gutiérrez, 2021; Rojas-Martínez ve ark., 2024). Bu mineral katkı grubu granüle yüksek fırın cürufları ve yüksek kireçli UK'lardan oluşur. Granüle yüksek fırın cürufları, pik demir üretimi sırasında yan ürün olarak ortaya çıkar ve yüksek fırında eriyik halde terk edilir. Beton veya çimentoda kullanılabilmeleri için genellikle camsı bir fazda hızla soğutulmaları gerekmektedir. Yüksek kaliteli bir cürufun kristal içeriği genellikle %5'in altındadır ve cam fazı, kalsiyum, alüminyum ve magnezyum katyonlarını içeren silikat yapısına sahiptir (Khoshkbijari ve ark., 2024). Yüksek fırın cürufu en azından çimento inceliğine kadar öğütülmelidir. Yüksek kireçli UK'lar, linyitik ve alt-bitümlü kömürlerin yanmasıyla elde edilen termik santral yan ürünleridir. Bu malzemeler, %30-80 oranında silikat camı ve kalsiyum, magnezyum, alüminyum, sodyum ve potasyum iyonları içerir (Hamed ve ark., 2024). Kristal fazları teşkil eden hem kuvars hem de serbest kireç ve serbest magnezyum gibi

oksitler de bulunabilmektedir. Bu küller, yüksek sülfürlü kömürlerin yanması durumunda anhidrit içerebilir (Mehta ve Monteiro, 2013). Hem yüksek fırın cürufu hem de UK, gizli hidrolik ve puzolanik özelliklere sahiptir. Yaygın mineral katkıların $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ üçlü diyagramı, PC ile karşılaştırmalı olarak Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Mineral katkılarda oksit değişimi % kütlece (Tangüler ve Yaman, 2018).

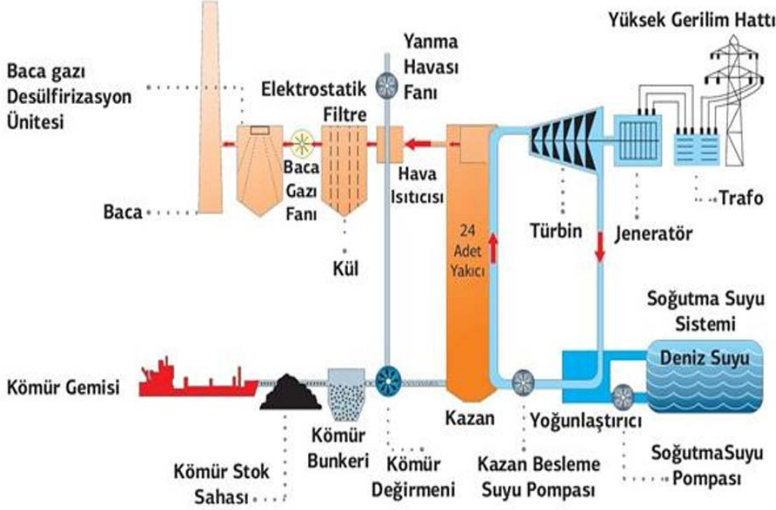
Dünya genelinde, elektrik üretimi için kömür, termik santrallerde ana yakıt olarak kullanılmaktadır. 21.

yüzyılın ilk on yılında, dünya genelinde üretilen elektriğin yaklaşık %40'ı kömürden elde edilmiştir. Termik santrallerde kömür, püskürtme yöntemiyle yakıldığında çeşitli kömür yanma ürünleri ortaya çıkarır; bunlar arasında UK, taban külü, kazan cürufu ve bacalardan çıkan kükürt giderme jipsi bulunur.

UK, kömür yakan termik santrallerin bir yan ürünü olarak ortaya çıkar ve buhar jeneratörlerini çalıştırmak için kullanılan pulverize kömür ile termal enerjiyi elektriğe dönüştürme işleminde kullanılır. Farklı kömür türleri arasında linyit, alt bitümlü, bitümlü ve antrasit bulunur ve bu kömürler karbon ve uçucu madde yanında kil, şeyl, kuvars ve feldispat gibi safsızlıklar içerir. Yanma sırasında bu safsızlıkların bir kısmı baca gazlarında asılı kalır ve taban külünü oluştururken, geri kalan kısmı gazlar tarafından taşınır ve mekanik ayırıcılar veya elektrostatik çökticiler tarafından toplanır; bu ikincisi UK olarak adlandırılır (Yao ve ark., 2015; Gollakota ve ark., 2019; Thomas ve ark., 2024).

Tipik bir termik santralin yanma sisteminin şematik olarak gösterimi Şekil 2.2'de verilmiştir. Kömürün yanması sonucu oluşan toplam kül miktarı, kullanılan kömürün kütle olarak %6 ile %40'ı arasında değişmektedir. Antrasit kömürler genellikle %6 ila %15

arasında küle sahipken, linyitler %20 ile %40 arasında küle sahiptir.



Şekil 2.2. Fosil yakıtlı bir termik elektrik santralinin işlem akış şeması (Tunçkaya, 2020).

Endüstriyel yan ürün olan UK, tane boyutu olarak 0.2-200 μm arasında değişkenlik gösteren çok ince taneli ve genel olarak küresel bir morfolojiye sahip olan katı bir malzemedir. UK'nin tane boyutu, büyük ölçüde hem santralde enerji kaynağı olarak kullanılan pülverize kömürün inceliğine hem de termik santraldeki toplama ekipmanının türüne bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Toplama ekipmanı itibarıyla elektrostatik çökticilerle toplanan UK, mekanik ayırıcılarla toplanan

UK'ye göre daha incedir. UK'nin rengi ise kimyasal bileşenleri olan yapısındaki minerallere göre değişkenlik göstermekle birlikte açık renkten kahverengi ve griye, hatta daha koyu tonlar olan siyaha doğru değişkenlik gösterebilmektedir. Genellikle yığın halinde gri renktedir ve yanmamış karbon miktarı arttıkça daha koyu bir renk alır. UK'nin kimyasal bileşimi, kullanılan kömürün mineral içeriği ve bu minerallerin göreceli oranlarına bağlıdır. Kimyasal kompozisyon olarak UK'lerin büyük bir çoğunluğu, %85'ten daha yüksek oranlarda SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO ve MgO içermektedir.

Linyit ve alt bitümlü kömürlerin yanmasından elde edilen UK, bitümlü kömürler ve antrasitten elde edilen UK ile kıyaslandığında genellikle daha yüksek kireç içeriğine sahiptir. Bu fark, farklı kömür türlerinin bileşiminden kaynaklanır. UK'lerin ince partikül boyutları ve amorf yapısı, onların genellikle tatmin edici olan puzolanik özelliklerine katkıda bulunur. Yüksek kireç içeriğine sahip UK hem puzolanik hem de gizli hidrolik özellikler sergileyerek inşaat malzemelerinde kullanılabilirliğini artırır. UK'nin puzolanik özellikleri, 1910'lara kadar uzanan ve 1914 tarihli tarihi kayıtlarda belgelenen bir geçmişe sahiptir, bu da 1930'larda beton üretiminde yaygın olarak kullanılmasının önünü açmıştır.

UK'lerin kimyasal, mineralojik ve fiziksel özellikleri, kömür kaynağı, yanma teknikleri, kullanılan ekipman ve termik santrallerde uygulanan kül toplama yöntemleri gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak büyük ölçüde değişkenlik gösterir. Bu nedenle, farklı termik santrallerden elde edilen UK'ler arasında, hatta aynı santralden farklı zaman dilimlerinde elde edilen küller arasında önemli farklılıklar görülebilmektedir.

UK'lerdeki bileşenler genellikle serbest oksit formunda bulunmasada oksit analizi geleneksel olarak kimyasal bileşimlerini tanımlamak için kullanılır. UK'lerin kimyasal bileşimi, (i) kömürde bulunan safsızlıkların türü ve miktarına, (ii) yakma yöntemine ve (iii) kül toplama sürecine bağlı olarak mineralojik bileşimlerinde farklılık gösterebilmektedir. Antrasit kökenli UK'ler kimyasal bileşen olarak genellikle SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 açısından zengindir. Öte yandan, linyit kökenli UK'ler ise bu bileşenlere ek olarak genellikle önemli miktarda CaO ve SO_3 içerebilmektedir. Bitümlü ve alt-bitümlü kömürler ise genellikle bu iki tip arasında bir bileşime sahip UK'ler oluşturur. MgO , MnO , TiO_2 , Na_2O , K_2O gibi diğer oksitler de UK'lerde daha küçük miktarlarda bulunabilir.

UK'ler, düşük kireçli ve yüksek kireçli olmak üzere iki temel grupta toplanmaktadır. Bu gruplar arasındaki

farklılık, genel olarak %10 CaO içeriğiyle belirlenir. Düşük kireçli UK'ler puzolanik özellik gösterirken, yüksek kireçli UK'ler puzolanik özelliklerinin yanı sıra belirli bir miktarda çimentolu değere, yani hidrolik bağlayıcılık özelliğine, sahiptir. Bu sınıflandırma, uluslararası standartlarda da yansıtılmaktadır; ASTM C 618 (2012) standartlarına göre, UK için Sınıf F ve Sınıf C olmak üzere iki grup UK tanımlanmaktadır. F Sınıfı küller genellikle antrasit veya bitümlü kömürlerden elde edilmekle birlikte, C Sınıfı UK ise genel olarak alt bitümlü kömürlerden veya linyitlerden elde edilmektedir. Kömür türüne bağlı olarak, F Sınıfı UK'lerdeki temel oksitler olan SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 içeriği toplamı genellikle %70 veya daha fazla olması gerekmektedir. C Sınıfı UK'lerde ise bu oran daha düşük olup, genellikle %50 veya daha fazla olması gerekmektedir. Avrupa çimento standardı EN 197-1 (2012) ise UK'leri, birçok yaygın çimentonun (PC klinkerinin yanı sıra) ana bileşeni olarak kabul eder. Bu standarda göre, UK'ler V tipi (silisli) ve W tipi (kalkerli) olarak sınıflandırılır; V tipi UK'ler en az %25 (kütlece) reaktif SiO_2 ve en fazla %10 reaktif CaO içermelidir, W tipi UK'ler ise %10'dan fazla reaktif CaO içerenlerdir ve reaktif silika içeriği %25'ten az olmamalıdır. Reaktif silika, UK'deki silika içeriğini belirten bir terimdir ve reaktif kireç, UK'de

bulunan CaCO_3 ve CaSO_4 kirecinden elde edilen toplam kireç içeriğini ifade etmektedir.

UK'nin inceliği genellikle elek analizi ile belirlenmekle birlikte farklı yöntemler de kullanılabilir. Bunlar, Blaine hava geçirgenliği, hidrometre analizi, nitrojen adsorpsiyonu ve lazer partikül boyutu dağılımıdır. Dünya çapında kabul gören standartlar genellikle UK'nin $45 \mu\text{m}$ 'lik bir elek üzerinde kalan maksimum miktarını belirtmekte olup, bu yöntem basit olmakla birlikte hem güvenilir hem de ekonomiktir. UK'nin spesifik yüzey alanı genellikle 250 ile $550 \text{ m}^2/\text{kg}$ arasında değişir. Genellikle UK'nin küresel partiküllerden oluştuğu kabul edilse de partikül morfolojisi büyük ölçüde kullanılan kömürün türüne, inceliğine, yanma koşullarına ve toplama yöntemine bağlı olarak değişir (Jiang ve ark., 2024). Partiküller küresel, köşeli veya düzensiz şekillerde olabilir ve yüzeyleri pürüzsüz, pürüzlü veya kaplanmış olabilir. Düşük kireçli UK'ler, yüksek kireçli olanlara göre genellikle daha homojen bir küresel parçacık yapısına sahiptir. UK'nin ortalama yoğunluğu 1900 - 2400 kg/m^3 arasında değişkenlik göstermekle birlikte, öğütüldüğünde ise içi boş parçacık kalmayana kadar yoğunluğu 2900 kg/m^3 'e kadar çıkabilmektedir. Farklı partikül boyut aralıkları, 500 ile

2600 kg/m³ arasında değişen çeşitli yoğunluklara sahip olabilmekte olup, daha yüksek yoğunluklar genellikle UK'deki artan demir oksit miktarıyla ilişkilendirilmektedir. Kuru UK'nin gevşek yığın birim ağırlığı ise 500 ile 900 kg/m³ arasında değişkenlik sergilemektedir.

UK ve diğer puzolanların kireç veya çimento ile reaktivitesi, kimyasal ve mineralojik bileşimleri, morfolojileri, incelikleri ve mevcut cam fazı miktarı gibi çeşitli içsel özelliklerinden etkilenmektedir (Yan ve ark., 2024b). Ayrıca, ısıt işlemler ve katkı maddeleri gibi dış faktörler de puzolanik reaktivitelerini etkilemektedir. ASTM gibi standart kuruluşları, UK'deki silika, alümina ve demirin birleşik içeriğinin önemini vurgulamaktadır. UK'lerdeki silika ve alümina içerikleri, uzun vadeli puzolanik aktivite ile güçlü bir şekilde ilişkilidir ve önemlerini vurgulamaktadır. Amorf silika ve alümina puzolanik aktiviteye katkıda bulunurken, UK'deki camsı fazların kristalleşmesinden kaynaklanan mullit ve kuvars gibi reaktif olmayan bileşikler reaksiyona katılmaz. Birçok UK'de, demir oksidin çoğu reaktif olmayan hematit ve manyetit olarak bulunur ve sadece cam fazındaki küçük bir kısmı puzolanik aktiviteyi olumsuz etkiler. Bu nedenle, UK'lerin kimyasal gereksinimlerini ve puzolanik

aktivitesini değerlendirmek için demiri silika ve alüminadan ayırmak gerekir. Bazı araştırmacılar, basınç dayanımı oranı (puzolanik aktivite indeksine göre) ile silisyum, alüminyum ve demir oksitlerin toplamı arasında sınırlı bir ilişki bulmuştur. Beklentilerin aksine, çalışmalar karbon içeriğinin basınç dayanımı oranına ilişkin puozolanik aktivite indeksini önemli ölçüde etkilemediğini göstermiştir. Puozolanik reaktiviteyi etkileyen fiziksel özellikler arasında UK'lerin inceliği çok önemlidir. UK'nin inceliğini değerlendirmek için kullanılan çeşitli yöntemler farklı sonuçlar vermiştir, bu da inceliğin puozolanik aktivite üzerindeki kesin etkisini belirlemeyi zorlaştırmaktadır.

Karıştırma işleminden sonraki ilk birkaç saat içinde çimento esaslı malzemenin sertleşme hızı, bir tür penetrometre testi (Vicat Seti) kullanılarak belirlenen ilk ve son priz süresi olarak ölçülür (Mohamed ve ark., 2024; Dong ve ark., 2023b). UK, çimentonun sertleşme hızını (mikro yapısal gelişimini) çeşitli nedenlerle etkileyebilir:

- a) Yüksek kalsiyumlu UK'nin kendisi bağlayıcı özelliklere sahip olabilir.
- b) UK, PC'ye eklenen alçıtaşına benzer şekilde çimento ile reaksiyona giren sülfatlar içerebilir.

- c) UK'nin varlığı, UK-çimento harcındaki su miktarını azaltarak sertleşme oranını etkileyebilir.
- d) UK, betonun reolojisini değiştirmek için eklenen yüzey aktif maddeleri (su azaltıcılar) emebilir ve bu da harcın sertliğini etkiler.
- e) UKpartikülleri, çimento hidrasyon ürünlerinin kristalleşmesi için çekirdek görevi görebilir.

PC hamurunun hidrasyonu veya prizi, taze betonda sıcaklık artışına neden olacak şekilde ısı açığa çıkarır. Çimentonun UK ile değiştirilmesi bu sıcaklık artışını azaltır. Bu durum özellikle kütle betonunda önemlidir. Çünkü büyük bir sıcaklık artışının ardından soğuma, çatlaklara yol açabilir. (Yun ve ark., 2024). UK'nin, eşdeğer miktarda PC'ye kıyasla erken yaşta ısı üretimine %15-30 oranında katkıda bulunduğu tahmin edilmektedir. Sıcaklık artışı, sadece ısı üretim hızına değil, aynı zamanda ısı kaybı hızına ve beton ile çevresinin termal özelliklerine bağlıdır.

Betonun dayanımını belirleyen temel faktörler çimento içeriği ve su-bağlayıcı oranıdır. Uygulamada, bu faktörler taze karışım halinde işlenebilirlik ile sertleşmiş durumda dayanım, dayanıklılık ve maliyet gereksinimlerini dengelemek için ayarlanır. UK'nin işlenebilirlik üzerindeki etkisi, aynı zamanda dayanım

gelişimini de önemli ölçüde etkiler. Daha önce belirtildiği üzere, betonda toplam su ihtiyacının azaltılmasını sağlayan UK, genellikle hedeflenen dayanım seviyelerine ulaşmak için istenen karışım oranlarının seçiminde sorun teşkil etmez. UK'li betonda dayanım gelişim hızını belirleyen karışım oranları ve işlenebilirlik dışındaki faktörlere göre değişkenlik sergilemektedir (Bhat ve ark., 2024; Li ve ark., 2024a). Bu faktörler, karışım oranlarının hedeflenen UK özelliklerini karşılamak için ayarlamayı amaçladığı değişkenleri içerir. UK'li betonun dayanım gelişimini etkileyen birçok değişken vardır, bunların en önemlileri ise şunlardır:

- UK'nin özellikleri
- Kimyasal bileşimi
- Parçacık boyutu
- Reaktivitesi
- Sıcaklık ve kürlenme koşulları

2.3.1. Uçucu kül katkılı çimento esaslı

malzemelerde yüksek sıcaklık etkisi

Çimento esaslı malzemeler, dayanıklılıkları ve maliyet etkinlikleri nedeniyle inşaat sektöründe büyük önem taşımaktadırlar. Özellikle üstün puzolanik

özelliklere sahip olan UK gibi mineral katkılı çimentoların kullanımı, betonun işlenebilirliğini, dayanıklılığını ve çevre dostu olmasını artırdığı için giderek daha yaygın hale gelmiştir. Ancak, bu malzemelerin yangınlar gibi yüksek sıcaklıklarda nasıl davrandığı dikkatlice incelenmelidir. Mevcut çalışma, UK içeren Çimento esaslı yapı malzemelerinin yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında gösterdiği performansı, fiziksel ve kimyasal özelliklerindeki değişikliklere odaklanarak araştırmak amacıyla litaretür taramasının mevcut bölümünde yer verilmiştir. UK içeren çimento esaslı malzemelerin yüksek sıcaklıklara maruz kalması halinde malzemede hem fiziksel hem de kimyasal olmak üzere karışım parametrelerine bağlı olarak pek çok değişim meydana gelmektedir (Khan ve ark., 2015; Li ve ark., 2024b; Akbulut ve ark., 2024).

Fiziksel değişimler: Termal genleşme ve çatlama, UK içeren çimento bazlı malzemelerde gözlemlenen ve geleneksel betona benzer olgulardır. UK ilavesi, daha küçük partikül boyutları ve puzolanik aktivitesi sayesinde çatlama davranışını etkileme potansiyeline sahiptir (Tu ve ark., 2024) ve daha kompakt bir mikroyapısal düzenin oluşumuna katkıda bulunur. Bununla birlikte, 300°C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklara maruz kalmak, mikro

çatlakların oluşmasına neden olabilmektedir. Yüzey kırılması veya dökülmesi olarak tanımlanan dökülme (spalling), özellikle düşük geçirgenliğe sahip yüksek dayanımlı betonlarda önemli bir sorun olmaya devam etmektedir. UK'nin puzolanik aktivitesi nedeniyle içyapının daha kompakt hale gelmesi, nemi hapsederek dökülmenin artmasına yol açabilir, bu da aniden buharlaşarak genişler (Zaid ve ark., 2024). Renk değişiklikleri itibariyle UK içeren beton, geleneksel Portland çimentolu betonda gözlemlenen renk değişikliklerine benzer değişiklikler gösterebilir (Yadav ve ark., 2024). Ancak, UK'nın farklı kimyasal bileşimi nedeniyle bazen renk tonunu değiştirme potansiyeli vardır.

Kimyasal değişimler: 400°C ile 600°C arasındaki sıcaklıklarda, çimento hamurundaki kalsiyum hidroksitin dehidratasyonu gerçekleşir, bu da bağlı suyun serbest kalmasına ve malzemenin dayanımının azalmasına yol açar (Li ve ark., 2024d). UK ilavesi, puzolanik reaksiyonunda kalsiyum hidroksiti kullanarak ek C-S-H üretir ve böylece bu etkiyi kısmen azaltarak malzemenin dayanımını artırır. C-S-H ayrışması, 800°C'yi aşan sıcaklıklarda, beton karışımlarında temel bağlayıcı olarak önemli olan C-S-H jeli parçalanmaya başlar (Chen ve ark.,

2024b). UK eklemek, C-S-H'nin termal dayanıklılığını artırmak için ek silikat bileşenleri oluşturarak bu süreci güçlendirebilir. UK puzolanik reaksiyona girdiğinde, hidratasyon ürünlerini azaltır ve orta derecede yüksek sıcaklıklarda betonun genel dayanıklılığını artıracak ek hidratasyon ürünleri oluşturur.

Yüksek Sıcaklık Etkisi Altında Uçucu Kül İçeren Sistemlerde Performans ve Etki Azaltma Stratejileri: UK ilavesi, betonun mikroyapısal stabilitesini etkileyerek başlangıçta termal direnci artıracak daha sıkı bir mikroyapı oluşturur. Ancak, bu mikroyapısal bütünlüğün yüksek sıcaklıklarda korunması önemli bir zorluk oluşturur. Polipropilen lif gibi malzemelerin eklenmesi bu konuda yardımcı olabilir; buharın tahliyesi için kanallar sağlayarak dökülme riskini azaltır. Ayrıca, UK genellikle normal sıcaklık koşullarında betonun mekanik özelliklerini artırır. UK içeriğinin yüksek sıcaklıklarda bu özelliklerin korunmasındaki etkisi kritik öneme sahiptir ve genellikle çimento ağırlığına göre %20-30 gibi orta düzeyde ikame oranlarında en iyi sonuçlar elde edilir. UK'nin betona eklenmesi, PC'ye göre daha düşük ısı iletimine sahip olduğundan ısı yalıtımını artırabilir. Dolayısıyla, iyi tasarlanmış karışımlar daha iyi yangın direnci sunma potansiyeline sahiptir. Dayanıklılık artışı,

betona UK katılması, geçirgenliği azaltarak ve kimyasal saldırılara karşı direnci artırarak yüksek sıcaklıklarda dayanıklılığı iyileştirir. Bu şekilde, malzeme yangın ve diğer termal tehditlere karşı daha sağlam hale gelir.

UK içeren çimento bazlı malzemeler, yüksek sıcaklıklara karşı karmaşık bir tepki sergiler. UK, normal koşullar altında betonun çeşitli özelliklerini iyileştirirken, yüksek sıcaklıklarda etkileri farklılık gösterir. Bu etkilerin anlaşılması, yangına hassas bölgelerdeki beton yapıların verimliliğini ve güvenliğini artırmak için son derece önemlidir. Malzeme bilimi alanındaki süregelen araştırma ve geliştirme ilerlemeleri, yüksek sıcaklıkların oluşturduğu zorluklara dayanabilen hem güvenlik hem de uzun ömürlülük sağlayan çimento bazlı malzemelerin formüle edilme kapasitemizi sürekli olarak artırmaktadır.

2.3.2. Çimento esaslı uçucu kül katkı malzemelerde sülfat hücumu

Çimento bazlı malzemeler, yapıların güçlü ve uzun ömürlü olmasını sağlamak için inşaat alanında önemli bir rol oynar. Ancak, yüksek sülfat iyonu konsantrasyonlarına sahip ortamlarda etkinlikleri azalabilir. Sülfat saldırısı, beton yapılar için önemli ve tekrarlayan bir sorundur ve bozulmaya, kullanım ömrünün kısalmasına neden

olabilir. Araştırmalar (Abdun-Nur, 1961; Tokyay ve Erdoğdu 1998) mineral katkılar eklenmesinin, özellikle de UK'nin, betonun sülfat saldırısına karşı direncini artırabileceğini göstermiştir. Bu çalışmada, UK içeren çimento bazlı malzemelerin sülfat saldırısına nasıl tepki verdiğini, bozulma mekanizmalarını, UK'nin etkilerini ve dayanıklılığı artırma yöntemlerini incelemektedir.

Sülfat direncinde UK'nin rolü genel olarak şu şekilde özetlenebilir. Şöyle ki; geçirgenliğin azaltılması ile UK, kalsiyum hidroksit ile puzolanik reaksiyonlarla etkileşerek kılcal gözenekleri dolduran ve geçirgenliği azaltan ek C-S-H üretir, bu da sülfat iyonlarının nüfuzunu engeller. Kalsiyum hidroksit içeriğinde azalma ile UK, puzolanik reaksiyonunda kalsiyum hidroksiti kullanarak, sülfat iyonlarıyla reaksiyona girecek olan miktarını azaltır. Geliştirilmiş mikroyapı ile daha ince partiküllerin varlığı ve UK'nin puzolanik reaksiyonları, daha sıkı ve daha rafine bir mikroyapının oluşumuna katkıda bulunarak sülfat penetrasyonuna karşı direnci artırır. C₃A içeriğinin azaltılması ile UK genellikle daha düşük alümina seviyeleri gösterir, bu da etrenjit oluşma olasılığını azaltır.

Sülfat Etkisi Altında Uçucu Kül İçeren Sistemlerde Performans ve Etki Azaltma Stratejileri: UK'nin çimento ağırlığının genellikle %20-30'u arasında uygun seviyelerde

kullanılması, karışım tasarımlarını optimize edebilir ve sülfat saldırısına karşı direnci artırabilir. Daha şiddetli sülfat içeren ortamlarda ise daha yüksek ikame seviyeleri gerekebilir. UK'nin etkinliği, kalitesi, inceliği ve kimyasal bileşimine bağlıdır. Optimal sonuçlar elde etmek için düşük karbon içeriğine ve yüksek puzolanik aktiviteye sahip yüksek kaliteli UK kullanılması tavsiye edilir. UK'nin tam olarak hidratasyonunu ve sıkı bir mikro yapı oluşturulmasını sağlamak için doğru küreme uygulamaları önemlidir. Uzun süreli küreme işlemleri, sülfat direncini artırabilir. UK'nin yanı sıra, cüruf ve silis dumanı gibi ilave çimento katkı malzemelerinin kullanımı, bir arada kullanıldığında sülfat direncini artırmada ek faydalar sağlayabilir.

UK içeren çimentolu malzemeler, geliştirilmiş mikroyapısal özellikler ve azaltılmış geçirgenlik sayesinde sülfat saldırısına karşı daha dirençli hale gelir. UK'nin puzolanik reaksiyonu çimento matrisini güçlendirir ve sülfat kaynaklı bozulmaya neden olan reaktif elementlerin varlığını azaltır. Optimize edilmiş karışım tasarımları, sıkı kalite kontrol ve uygun küreme yöntemleriyle betonun sülfat içeren ortamlardaki dayanıklılığı önemli ölçüde artırılabilir. UK ve diğer katkı maddelerinin kullanımını iyileştirmeye yönelik devam eden araştırma ve geliştirme

çalışmaları, çimento bazlı malzemelerin zorlu koşullar altında uzun ömürlü ve güvenilir olmasını sağlamaktadır.

2.4. Kireçtaşı Formasyonları ve Nano Kalsit

Mineral katkılar, çimentonun veya agregaların bir kısmının yerine yer değiştirilmek amacıyla beton veya çimento üretiminde kullanılmaktadır. UK, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve kireçtaşı gibi mineral katkıların kullanımı, karbondioksit emisyonlarını azaltma ve kaynak tüketimini düşürme açısından etkili bir yöntem olarak değerlendirilmektedir (Das ve Tiwary, 2024). Ayrıca, birçok mineral katkının endüstriyel atıklardan elde edilmesi, bu yaklaşımı çimento veya beton üretiminde ekonomik ve çevre dostu bir seçenek haline getirmektedir (Li ve ark., 2024e). Özellikle kireçtaşı formasyonları, farklı tane boyutları (makro, mikro ve nano ölçekli ve kristal yapıları (kalsit, aragonit, vaterit ve amorf kalsiyum karbonat) nedeniyle mineral katkı ve dolgu maddesi (Ye ve ark., 2007) ve agrega (Alhozaimy, 2009) olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Cao ve ark., 2019).

Kireçtaşı; kalsit, aragonit, vaterit ve amorf kalsiyum karbonat gibi çeşitli mineraller içerebilir. En yaygın ve kararlı mineral olan kalsit, doğal kireçtaşının ana bileşenidir. Araştırmalar, kalsiyum karbonatın

eklenmesinin Çimento esaslı kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığını, aksine erken yaş dayanımını, hidrasyon, dayanıklılık ve mikro yapı üzerinde olumlu bir sinerjik etki sağladığını göstermiştir (Demirhan, 2022). Bu sebeple, kalsiyum karbonatın çimento hamuru, harç veya beton üzerindeki etkilerini anlamak amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Çimento esaslı kompozitlere kalsit gibi kireçtaşı formasyonların kalsiyum karbonat eklenmesiyle çimento hidrasyonu sırasında kalsiyum-karboalüminat oluşumu meydana gelmekte ve bu olaya kalsiyum karbonatın kimyasal etkisi denilmektedir (Demirhan, 2020). Daha sonraki çalışmalar bu bulguları desteklemiş olup, kalsiyum karbonatın çimento bazlı malzemelerdeki rolünü araştıran çok sayıda çalışma yapılmıştır (Monkman ve ark., 2022; Gebru ve ark., 2021). Kalsiyum karbonat eklenmesinin, dolgu etkisi sayesinde matris yoğunluğunu artırabileceği ve çekirdeklenme etkisi ile hidrasyon sürecini hızlandırabileceği yaygın olarak kabul edilmektedir. Kalsiyum karbonatın parçacık boyutu çimento tanelerinin boyutuna yakın olduğunda, seyreltme etkisi çimentonun işlenebilirliğini ve hidrasyon sürecini etkileyebilir. Ancak, bu etkiler birbirine bağlıdır ve genellikle parçacık boyutu, miktarı ve şekli gibi faktörlere

bağlı olarak çimento bazlı kompozitlerin mekanik özelliklerini, hidrasyon sürecini, işlenebilirliği ve dayanıklılığı üzerinde sinerjik bir etki gösterir (Cao ve ark., 2019).

Mikro kalsiyum karbonat (1 µm ile 1 mm arasında değişen boyutlarda), kireçtaşı formasyonu ve kireçtaşı tozu gibi materyallerle birlikte çimento üretiminde harmanlanmış veya ara öğütülmüş bir malzeme olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Hou ve ark., 2024). Puzolanik aktiviteye sahip olmamasına ve Ca(OH)_2 ile kalsiyum oksit (CaO) gibi alkali maddelerle reaksiyona girememesine rağmen, mikro kalsiyum karbonatın eklenmesi hidrasyon sürecinin fiziksel ve kimyasal yönlerini, taze karışımların işlenebilirliğini ve sertleşmiş çimentonun mekanik özelliklerini etkileyebilmektedir. Bu nedenle, mikro kalsiyum karbonatı yalnızca inert bir dolgu maddesi olarak değerlendirmek doğru değildir, özellikle partikül boyutu çimento tanelerinden daha küçük olduğunda veya UK ve metakaolin gibi mineral katkılar ile üçlü veya dörtlü karışımlarda kullanıldığında sinerji artmaktadır (Jin ve ark., 2024b; Amin ve ark., 2024; Li ve Cao., 2024). Bu durumlarda, mikro kalsiyum karbonat çimento hidrasyon sürecine aktif olarak dahil olabilir ve hidrasyon kinetiği ile mikro yapıyı

etkileyebilir (Wang, 2018; Vance ve ark., 2013; Medjigbodo ve ark., 2018).

Mikro kalsiyum karbonat olarak kireçtaşı tozu, makro kalsiyum karbonata göre daha yüksek bir yüzey alanı ve yüzey enerjisine sahiptir. Bu nedenle, kümülatif hidratasyon ısısı, hidratasyon ısısı salınım hızı ve çimentolu kompozitlerin hidratasyon ürünleri gibi çeşitli yönlerdeki etkileri makro kalsiyum karbonattan farklıdır (Cao ve ark., 2019). Bu etkiler, mikro kalsiyum karbonatın partikül boyutları, içeriği ve kristal yapısı gibi faktörlere bağlı olarak değişir. Ayrıca, kireçtaşı tozunun çimento hidratasyonundaki ana etki mekanizması da önemlidir. Genellikle, kireçtaşı tozu miktarının artması, C-S-H oluşumu ve kümülatif hidratasyon için daha fazla çekirdeklenme noktası sağlayarak ısı salınım hızının artmasına yol açar. Kireçtaşı tozu içeriği ile kimyasal etkiler arasındaki ilişki iki temel sebebiyle karmaşık olabilir: birincisi, hemikarboalüminat ve monokarboalüminat oluşumu, mevcut kalsiyum karbonat miktarından çok kinetik faktörlere bağlıdır; ikincisi, kalsiyum karbonatın çözünmesi sınırlıdır ve çimentodaki alüminat içeriği nispeten düşüktür (Demirhan, 2020). Öte yandan, farklı kristal yapılar taşıyan kireçtaşı tozlarının çimento hidratasyonu üzerinde çeşitli etkileri

olabilmektedir. Kalsit, hidrasyon sürecini önemli ölçüde hızlandırabilirken, aragonit aynı etkiyi göstermeyebilmektedir.

Kireçtaşı tozu içeren çimentolu kompozitlerin mekanik özellikleri, partikül boyutu, içerik ve morfoloji gibi faktörlerden etkilenir. Partikül boyutundaki azalma, genellikle sabit bir kireçtaşı tozu içeriğinde erken yaşta (7 günden önce) basınç dayanımını artırır. Ancak, uzun vadeli yaşlandırmada daha ince kireçtaşı tozları, seyreltme etkisinin dolgu veya çekirdeklenme etkilerini aşabilmesi nedeniyle basınç dayanımını azaltabilmektedir. Kireçtaşı tozu içeriğindeki artışla birlikte hem basınç hem de eğilme dayanımı genellikle azalır. Yüksek ikame seviyeleri çimento miktarını azaltarak mukavemet gelişimini olumsuz etkilemektedir. Çünkü kireçtaşı tozunun hidrolik bağlayıcılık özelliği yoktur. Ayrıca, yüksek ikame seviyeleri seyreltme etkisini artırarak daha yüksek bir etkin su-çimento oranına ve dolayısıyla azalan dayanım ile neticelenir.

Kireçtaşı tozunun çimentolu kompozitlere eklenmesi, yüksek sıcaklıkların etkisine karşı dayanıklılığı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olabilmektedir. Sıcaklık ve/veya kireçtaşı tozu içeriğindeki artış, özellikle 800°C ile 900°C arasında kalsiyum karbonatın ayrışması sonrasında

basınç dayanımında, ultrasonik darbe hızında (UPV) belirgin bir azalma ve ağırlık kaybında artışa neden olabilmektedir (Cao ve ark., 2019). Kireçtaşı tozunun, özellikle tozun inceliği ve kristal yapısı dikkate alındığında, yüksek sıcaklık etkisi altında çimento esaslı kompozitlerin özellikleri üzerindeki etkileri konusunda yeterli araştırma bulunmamaktadır. Bu konuda daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Genel olarak, mikro kalsiyum karbonat seyreltme, çekirdeklenme ve kimyasal etkileri yoluyla çimento hidratasyon sürecini etkiler. Bu etkiler özellikle partikül boyutu, içeriği ve kristal yapısından etkilenir. Taze karışımların işlenebilirliği de dolgu etkisi nedeniyle partikül boyutu ve içeriğinden etkilenir. Sonuç olarak, mekanik özellikler ve dayanıklılık, mikrokalsiyum karbonatın hidratasyon sürecini ve işlenebilirliği nasıl etkilediğinden etkilenir. Makro ve mikro kalsiyum karbonat arasındaki temel fark, mikro kalsiyum karbonatın, özellikle ince kireçtaşı tozu formunda, fiziksel etkilerinin yanı sıra çimento esaslı kompozitler üzerinde kimyasal bir etkiye sahip olmasında yatmaktadır.

Nanopartiküller genellikle 100 nm'nin altında boyutlara sahip malzemeler olarak tanımlanır (Demirhan, 2017) ve bu malzemeler, yığın malzemelerin özelliklerinde

köklü değişiklikler yapma yeteneğine sahiptirler (Gao ve ark., 2018). Nanopartiküllerin çimentolu kompozitlere eklenmesi, bu kompozitlerin mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını önemli ölçüde iyileştirme potansiyeline sahiptir (Sikora ve ark., 2018; Han ve ark., 2015). Bu nanopartiküller arasında nano-kalsiyum karbonat, inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan bir türdür. Mikro kalsiyum karbonat ile nano-kalsiyum karbonat arasındaki farkı belirtmek gerekirse, nano-kalsiyum karbonatın 100 nm'den daha küçük değil, 1 μ m'den daha küçük bir parçacık boyutuna sahip olarak tanımlandığı anlaşılmalıdır. Mikro kalsiyum karbonat ile karşılaştırıldığında, nano-kalsiyum karbonat daha ince bir partikül boyutu ve daha büyük bir spesifik yüzey alanına sahip olup, bu da küçük miktarlarda bile çimento esaslı kompozitlerin hidrasyon süreci, işlenebilirlik, mekanik özellikler ve dayanıklılık üzerinde daha belirgin bir etki oluşturmaktadır (Yang ve ark., 2009).

Nano-kalsiyum karbonatın çimento hidrasyonu süreci üzerindeki etkisi, konsantrasyonu, parçacık boyutu ve kristal yapısı gibi faktörlere bağlıdır. Sato ve Diallo (2010) yaptığı araştırmalar, nano-kalsiyum karbonatın içeriği ve parçacık boyutunun çimento hidrasyonu üzerindeki etkilerini incelemiştir. 50-120 nm boyut

aralığındaki nano-kalsiyum karbonat, çekirdeklenme etkileri sayesinde, özellikle trikalsiyum silikatın (C_3S) hidratasyonunun başlangıç aşamasında belirgin şekilde çimento hidratasyonunu hızlandırmada etkili olmaktadır. Ayrıca, kalsiyum karbonat içeriği arttıkça, nano-kalsiyum karbonatın hızlandırıcı etkisi de belirginleşir ve trikalsiyum alüminat (C_3A) ile tetrakalsiyum alüminoferritin (C_4AF) hidratasyon piklerinin yükselmesine neden olur. Ayrıca, nano-kalsiyum karbonat çözeltisindeki karbonat iyonları, C_3A ile reaksiyona girerek hemikarboalüminatlar ve monokarboalüminatlar üretebilmektedir (Demirhan, 2020; Wu ve ark., 2016). Ancak, nano-kalsiyum karbonat aynı zamanda C_3S ile etkileşime girerek C-S-H jeli ve $Ca(OH)_2$ oluşturabilir ve bu da daha erken ve yüksek hidratasyon ısısına katkıda bulunabilmektedir. Nano-kalsiyum karbonatın kristal yapısı da çimento hidratasyon süreci üzerinde etkili olabilmektedir. Yeşilmen ve arkadaşları (2015) tarafından yapılan bir çalışmada nano boyutlu aragonitin NC'ye kıyasen hidratasyonu hızlandırmada daha az etkili olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar mikrokalsiyum karbonat ile ilgili bulgularla da uyumludur. Bununla birlikte, $Ca(OH)_2$ içeriği zamanla karboalüminat ve karbonatlaşma nedeniyle azalmaktadır.

Nano-kalsiyum karbonat içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik özellikleri, içeriğine bağlı olarak önemli ölçüde değişir. Kalsit ve aragonit nano-kalsiyum karbonat arasında, kalsit daha etkili bir şekilde C-S-H oluşumunu teşvik ederek eğilme ve basınç özelliklerini iyileştirir. Basınç dayanımı açısından, nano-kalsiyum karbonat içeriği arttıkça dayanım önce artar, sonra azalır. Bu durum, nano-kalsiyum karbonatın belirli bir içeriğe kadar daha belirgin bir etkiyle C-S-H ve karboalüminatlar üretmek için C_3S ve C_3A ile reaksiyona girerek hidratasyon sürecini hızlandırmasından kaynaklanmaktadır. Ancak, çimentonun büyük bir kısmının nano-kalsiyum karbonat ile yer değiştirmesi, mikrokalsiyum karbonatla benzer şekilde önemli bir seyreltme etkisi ile neticelenir. Ayrıca, nano-kalsiyum karbonatın kümelenmesi, mikrokalsiyum karbonatın aksine, basınç dayanımını önemli ölçüde azaltabilir. Nano-kalsiyum karbonatın eklenmesi, daha yoğun bir matris oluşturarak hidratasyon ürünleri için mevcut alanı kısıtlayabilir. Genel olarak, nano-kalsiyum karbonatın eklenmesi erken yaş dayanımını artırır ve mineral katkılar uzun vadeli dayanımı iyileştirebilir. Bu nedenle, nano-kalsiyum karbonat ve özellikle alüminat fazı nispeten yüksek olan mineral katkıların birlikte kullanımı hem

erken yaş hem de uzun vadeli dayanım üzerinde sinerjik bir etki sağlamaktadır. Yüksek sıcaklık koşullarında, nano-kalsiyum karbonat çimento esaslı kompozitlerin tepe basınç gerilmesini, nihai basınç gerilmesini, basınç tokluğunu ve eğilme özelliklerini hem normal hem de yüksek sıcaklık koşullarında artırabilmektedir. Ancak, 800°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda, kalsiyum karbonatın parçalanması nedeniyle mukavemette kaçınılmaz bir hızlı düşüş yaşanır. Sonuç olarak, mikrokalsiyum karbonata benzer şekilde, nano-kalsiyum karbonat da hidrasyon sürecini, işlenebilirliği, mekanik özellikleri ve dayanıklılığı dolgu, seyreltme, çekirdeklenme ve kimyasal etkiler yoluyla etkiler. Bu etkiler, nano-kalsiyum karbonatın miktarı, parçacık boyutu ve kristal yapısı tarafından belirlenir. Nano-kalsiyum karbonatın etkileri genellikle mikrokalsiyum karbonata kıyasla daha belirgindir ve daha yüksek yüzey enerjisi ve daha büyük spesifik yüzey alanı nedeniyle aglomerasyonu da daha önemlidir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmanın bu üçüncü bölümünde kullanılan malzemeler detaylı bir şekilde incelenmiş, seçilen malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri ayrıntılı bir biçimde belirtilmiştir. Ayrıca, test edilmek üzere üretilmiş numunelerin üretim yöntemleri detaylandırılmış ve bu süreçte göz önünde bulundurulacak faktörler açıklanmıştır. Üretilen numunelerden elde edilmesi hedeflenen özelliklerin belirlenmesi için kullanılan test metotları ve bu metotların seçilme nedenleri ele alınmıştır.

3.1. Materyal

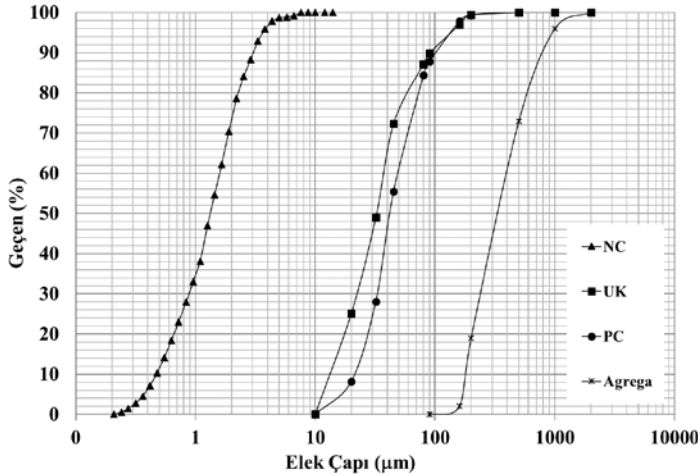
Bu başlık altında üretim aşamasında kullanılan malzemeler ile malzemelerin fiziksel özellikleri ve kimyasal bileşenleri açıklanmıştır.

3.1.1.Çimento

CEM I tipi Normal PC; kalker, marn, kil, demir cevheri, pirit külü, boksit gibi hammaddelerin uygun oranlarda karıştırılması, öğütülmesi ve pişirilmesi sonucu elde edilen klinkerin, bir miktar alçıtaşı ile birlikte

öğütülerek elde edilen bir hidrolik bir bağlayıcı olup, su ile karıştırıldıktan belirli bir süre sonra zamanla priz alarak dayanım kazanan bir üründür. Bu çimento tipi, genel olarak nispeten daha yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda, soğuk hava koşullarında dökülen betonlarda, prefabrik yapı projelerinde, tünel kalıp uygulamalarında ve temel beton uygulamalarında kullanılmaktadır.

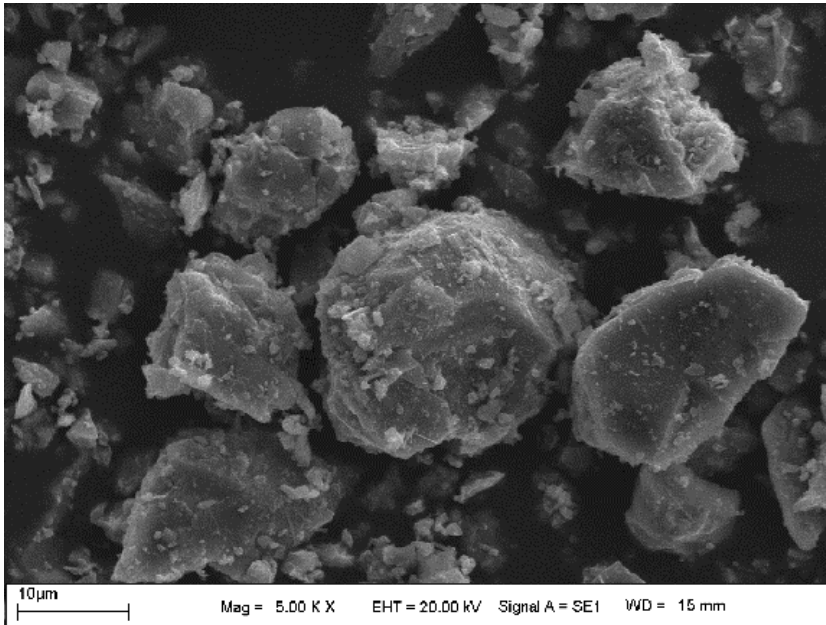
Çalışma kapsamında, temel bağlayıcı malzeme olarak TS EN 197-1'in (2012) minimum gereksinimlerini sağlayan CEM I 42.5 N Normal PCElâzığ Seza Çimento'dan temin edilmiştir. Çimentoya ait tane boyutu dağılımı, fiziksel ve kimyasal özellikleri ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri sırasıyla Şekil 3.1, Tablo 3.1 ve Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.1. PÇ, UK, agrega ve NC tane boyutu dağılımı.

Tablo 3.1.Bağlayıcıların kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri.

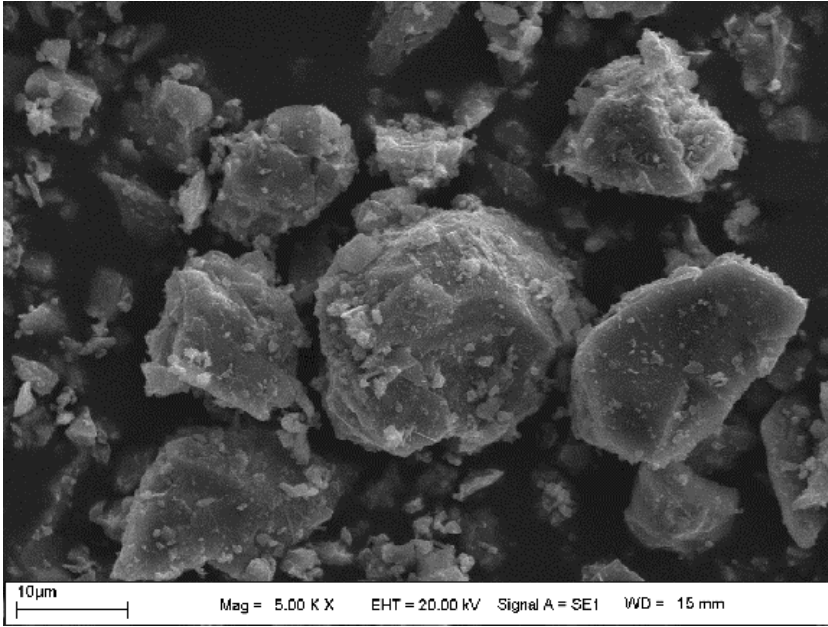
Kimyasal Kompozisyon, %	PC	NC	UK
SiO ₂	19.23	0.01	58.59
Al ₂ O ₃	4.51	0.02	20.91
Fe ₂ O ₃	3.76	-	10.99
MgO	1.82	0.55	2.25
CaO	62.90	55.92	2.08
SO ₃	2.91	0.05	0.25
Na ₂ O	0.41	-	1.10
K ₂ O	0.65	0.01	1.99
Kızdırma Kaybı	3.45	43.46	1.84
Fiziksel Özellikler			
Özgül ağırlık, gr/cm ³	3.12	2.69	2.38
Blaine, cm ² /gr	3850	-	3490
BET yüzey alanı, m ² /kg	-	7.63	-

**Şekil 3.2.**PC SEM görüntüsü (Elâzığ Seza Çimento' dan temin edilmiştir).

3.1.2. Uçucu kül

Uçucu kül (UK), termik santrallerde kömür yakılmasının ardından elde edilen endüstriyel bir yan üründür. UK, ince tane boyutuna sahip ve morfolojik olarak küresel şekilli olup, çimento esaslı kompozitlerin üretiminde yaygın olarak kullanılan pozolanik bir malzeme olmasını sağlayan çeşitli performans artırıcı özelliklere sahiptir. Bu özellikler arasında işlenebilirliği artırmak, hidratasyon ısını düşürmek ve çimento esaslı malzemelerin uzun vadeli dayanım ve dayanıklılığını geliştirmek yer almaktadır.

Çalışma kapsamında, çimento yerine ikame edilecek mineral katkı olarak kullanılmak üzere İskenderun Sugözü Termik Santralinden temin edilen ve CaO oranı %2.08 olan F Tipi UK kullanılmıştır. UK mineral katkısına ait tane boyutu dağılımı, fiziksel ve kimyasal özellikleri ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü sırasıyla Şekil 3.1, Tablo 3.1 ve Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Uçucu kül SEM görüntüsü (İskenderun Sugözü Termik Santralinden alınmıştır).

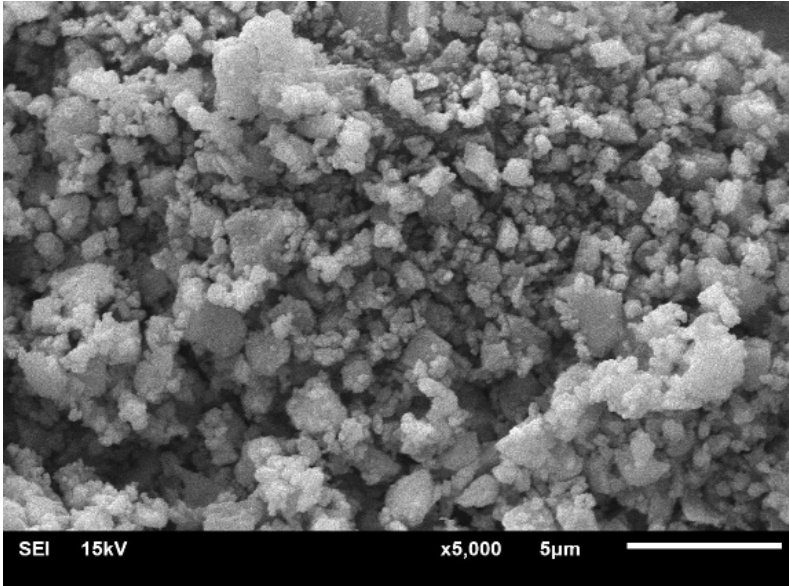
3.1.3.Nano kalsit

Kireçtaşı formasyonları genellikle kalsit, vaterit ve aragonit gibi üç temel türde bulunur. Bununla birlikte, daha az yaygın olarak, monohidratik kalsit, magnezyumlu kalsit, traverten, tuf ve litografik kireçtaşı gibi diğer çeşitler de mevcuttur. Bu formasyonlar, farklı jeolojik koşullarda oluşur ve çeşitli mineral bileşimlerine sahiptirler. Kireçtaşı formasyonları, içerdikleri yüksek orandaki CaCO_3 nedeniyle çimento esaslı malzemelerde çimento yerine %35'lere kadar (örneğin; CEM II/B-LL) ikame edilebilen bir malzeme olup, kristal yapı

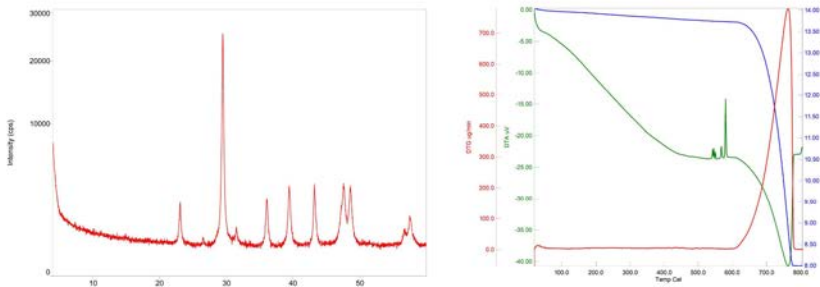
farklılığından kaynaklı olarak reaktiviteleri farklılık göstermektedir. Literatürde yapılan çalışmalar dikkate alındığında reaktivite olarak en yüksek performansın, kireçtaşı formasyonlarından olan kalsit ile elde edildiği tespit edilmiştir (Demirhan, 2022). Kireçtaşı formasyonları çimento esaslı sistemlerde kullanıldığında, çimento esaslı kompozitte C_3S 'nin hidratasyon mekanizması teşvik edilmekte ve etrenjit oluşumustabil hale gelmektedir (Demirhan, 2020). Bunun dışında, kireçtaşı formasyonlarının çimento matrisinde fiziksel olarak inert bir dolgu madde olarak davranması, parçacık paketlenme yoğunluğunu artırmakta ve dolayısıyla kompozitlerin basınç dayanımında iyileştirmektedir. NC, kalsitin nanometre ölçeğindeki partiküllerini ifade eder. Nanoteknolojinin gelişmesiyle, bu küçük boyutlu partiküllerin özellikle endüstriyel ve malzeme bilimi alanlarında çeşitli uygulamalara yönelik araştırmaları yapılmıştır.

Mevcut çalışma kapsamında çimento yerine %5 oranında ikame edilen nano boyutlu kalsit (NC), NiğTaş A.Ş.'den temin edilmiştir. NC'ye ait fiziksel ve kimyasal özellikler, taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü sırasıyla Tablo 3.1 ve Şekil 3.4'te verilmiştir. Ayrıca, NC'ye

ait XRD ve TGA/DTA analizi sonuçları Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Nano boyutlu kalsitin SEM görüntüsü (NiğTaş A.Ş.'den temin edilmiştir).



Şekil 3.5. NC XRD ve TGA/DTA analizi sonuçları (NiğTaş A.Ş.'den temin edilmiştir)

3.1.4. Agrega

Çalışma kapsamında yıkanmış dere kumu kullanılmış olup, 40x40x160 mm'lik prizmatik kalıplar kullanıldığı için liflerin öngörülen doğrultuda çalışabilmesi için en büyük agrega tane boyutu 2 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Dere kumunun özgül ağırlığı 2.60 gr/cm³ olup, agrega tane boyutu dağılımı Şekil 3.1'de verilmiştir.

3.1.5. Lif

Çimento esaslı lifli kompozitlerde lifler, malzemenin mekanik mukavemetini artırarak çekme, basınç ve eğilme yük etkisine karşı direncini artırır. Aynı zamanda çatlak oluşumunu kontrol etmekte, malzemenin dayanıklılığını artırmakta, termal etkiler altında performansı iyileştirmekte ve boyutsal kararlılığı yüksek seviyede geliştirmektedir. Lifler, çimento matrisin kimyasal direncini artırarak malzemenin servis ömrünü uzatmaktadır. Bu özellikler, çeşitli lif tiplerinin (cam lifi, karbon lifi ve polipropilen lifleri gibi) kullanılmasını teşvik eder, bu da malzemenin farklı uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılmasına olanak tanımaktadır. Örneğin, yangına karşı direnç gerektiren yerlerde polipropilen lifi gibi polimerik lifler tercih edilirken korozyonun yüksek

seviyede olduğu yapısal uygulamalarda ise çelik lif dışında korozyona daha da dirençli bir lif tercih edilebilmektedir.

Hedeflenen program doğrultusunda çimento esaslı lifli kompozitlerin üretimlerinde boyları aynı (6 mm) ve çapları sırasıyla 0.16 mm ve 0.30 mm olan pirinç kaplı çelik lif (BS) ve polipropilen lif (PP) kullanılmıştır. Çelik lif Bekaert işletmesinden temin edilirken polipropilen lifi ise Polyfibers işletmesinden temin edilmiştir. Hacimce toplam lif oranı %1.5 olacak şekilde lif kullanılmıştır. Liflere ait fiziksel ve mekanik özellikler Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2.Polipropilen ve pirinç kaplı çelik liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri.

Lif Görseli	Lif Tipi	Nominal Dayanım GPa	Elastisite Modülü GPa	Çap mm	Boy mm	Özgül Ağırlık gr/cm ³
	PP	0,5	5	30	6	0,9
	BS	3	200	16	6	7,8

3.1.6.Akışkanlaştırıcı

Beton ve benzeri çimento esaslı kompozitlerin işlenebilirliğini artırmak, çimento kullanım dozajını artırmak ve su-bağlayıcı oranını düşürmek amacıyla

kullanılan akışkanlaştırıcılar, malzemenin reolojik özelliklerini optimize ederek karışımın işlenebilirliğini iyileştirmektedir. Bu, çimento esaslı malzemenin kalitesini ve dayanıklılığını artırırken, aynı zamanda daha düşük su-çimento oranlarıyla daha yüksek dayanım elde etmeyi sağlamaktadır.

Bu amaç doğrultusunda, mevcut çalışmada, özgül ağırlığı 1.06 gr/cm^3 olan polikarboksilat eter bazlı yeni nesil yüksek oranda su azaltıcı hiperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi kullanılmış olup, Glenium 51 koduyla tüketiciye sunulan hiperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı BASF yapı kimyasalları şirketinden temin edilmiştir.

3.2. Yöntem

Hedeflenen program çerçevesinde karışım numuneleri Batman Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Laboratuvarında (Şekil 3.6) üretilmiş ve test yaşına kadar uygun koşullarda muhafaza edilmiş olup, test ve analizler ise hem İnşaat Mühendisliği Bölümü yapı malzemeleri laboratuvarı hem de Makine Mühendisliği Bölümü mekanik laboratuvarlarında yapılmıştır.



Şekil 3.6. İnşaat mühendisliği yapı malzemeleri laboratuvarı.

Önceki bölümlerde, çimento esaslı lifli kompozit karışımların üretim sürecinde kullanılacak malzemelerin hem fiziksel hem de kimyasal özellikleri ile ilgili detaylı bilgiler bulunmaktadır. Çalışma kapsamında çimento esaslı lifli kompozitlerin incelenmesi hedeflenen mekanik ve dayanıklılık özellikleri dikkate alınarak yeni karışımlar tasarlanmış olup, bu amaç doğrultusunda farklı bileşen ve karışım parametresi oranlarına sahip toplamda yirmi dört (24) adet karışım üretilmiştir. Tüm karışımlara ait bileşen oranları Tablo 3.3'te verilmiştir. Tablo 3.3'te görüldüğü üzere, UK ikame oranı bağlayıcı malzemenin en fazla %30'u kadardır (azami Uçucu Kül/Bağlayıcı=0.3). Lif türü ve diğer karışım parametrelerine bakılmaksızın UK/B oranının 0.0 (sadece PÇ'nin kullanıldığı karışımlar) ve UK/B oranının 0.3 (UK'nin kullanıldığı karışımlar) olduğu üretimler yapılmıştır. Ayrıca, tüm karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0.32 ve agrega/bağlayıcı oranı ise 1.15 olarak sabit tutulmuştur. İlk on iki karışım serisinde NC kullanılmamış olup, ikinci on iki karışım serisinde ise

bağlayıcı malzeme yerine ikame edilmek üzere bağlayıcı malzemenin %5'i oranında NC kullanılmıştır. Tüm karışımlarda toplam lif oranı hacimce %1.5 olarak belirlenmiştir. Her on ikilik karışım serisinin (1-12 ve 13-24 arası karışımları ifade etmektedir) ilk altı karışımları (ilk 12 karışım için 1-6 ve ikinci 12 karışım için ise 13-18 karışımları) BS lifi ile üretilirken ilgili serilerin diğer altı karışımlarında ise (ilk 12 karışım için 7-12 ve ikinci 12 karışım için ise 19-24 karışımları) hibrit (BS+PP) lif kullanılmıştır. Tüm karışımlar, harf ve rakamlardan oluşan notasyonlarla ifade edilmektedir. Karışım kodlarındaki BS ve H kodları sırasıyla karışımlarda %1.5 oranında pirinç kaplı çelik lif ve %1.2 oranında pirinç kaplı çelik lif + %0.3 oranında ise polipropilen lif kullanıldığını ifade etmektedir. FA0 ve FA30 kodları ise sırasıyla UK'nin hiç kullanılmadığı ve uçucu kül/bağlayıcı oranının 0.30 olduğu karışımları göstermektedir. Karışım kodlarındaki 0, 200 ve 500 olarak ifade edilen sayısal değerler ise karışımlara uygulanan sıcaklık değerlerini ifade etmektedir. 0, numunelerin test edildiği veya işlem gördüğü test yaşına kadar olağan kür koşullarında muhafaza edildiğini ifade ederken, 200 ve 500 değerleri ise numunelerin ilgili kür yaşlarında sırasıyla 200°C ve 500°C sıcaklığa maruz bırakıldığını

ifade etmektedir. Üretilen numunelerden BS_FA0_0, BS_FA30_0, H_FA0_0, H_FA30_0, BS_FA0_NC_0, BS_FA30_NC_0, H_FA0_NC_0, H_FA30_NC_0 kodlu karışımlar kontrol karışımları olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.3. Karışım Bileşenleri kg/m³

		PC	UK	Agrega (A)	Su	Lif		NC	UK/B	Su/B	A/B
						BS	PP				
1	BS_FA0_0	915		1051	290	117			0	0.32	1.15
2	BS_FA0_200	915		1051	290	117			0	0.32	1.15
3	BS_FA0_500	915		1051	290	117			0	0.32	1.15
4	BS_FA30_0	630	273	1035	293	117			0.3	0.32	1.15
5	BS_FA30_200	630	273	1035	293	117			0.3	0.32	1.15
6	BS_FA30_500	630	273	1035	293	117			0.3	0.32	1.15
7	H_FA0_0	915		1051	290	94	2.7		0	0.32	1.15
8	H_FA0_200	915		1051	290	94	2.7		0	0.32	1.15
9	H_FA0_500	915		1051	290	94	2.7		0	0.32	1.15
10	H_FA30_0	633	271	1041	290	94	2.7		0.3	0.32	1.15
11	H_FA30_200	633	271	1041	290	94	2.7		0.3	0.32	1.15
12	H_FA30_500	633	271	1041	290	94	2.7		0.3	0.32	1.15
13	BS_FA0_NC_0	880		1013	299	117		44	0	0.32	1.15
14	BS_FA0_NC_200	880		1013	299	117		44	0	0.32	1.15
15	BS_FA0_NC_500	880		1013	299	117		44	0	0.32	1.15
16	BS_FA30_NC_0	665	216	1015	292	117		44	0.3	0.32	1.15
17	BS_FA30_NC_200	665	216	1015	292	117		44	0.3	0.32	1.15
18	BS_FA30_NC_500	665	216	1015	292	117		44	0.3	0.32	1.15
19	H_FA0_NC_0	880		1013	299	94	2.7	44	0	0.32	1.15
20	H_FA0_NC_200	880		1013	299	94	2.7	44	0	0.32	1.15
21	H_FA0_NC_500	880		1013	299	94	2.7	44	0	0.32	1.15
22	H_FA30_NC_0	665	216	1016	292	94	2.7	44	0.3	0.32	1.15
23	H_FA30_NC_200	665	216	1016	292	94	2.7	44	0.3	0.32	1.15
24	H_FA30_NC_500	665	216	1016	292	94	2.7	44	0.3	0.32	1.15

Bu çalışma kapsamında ön görülen karışımların hazırlanmasında 100 lt kapasiteli tava tipi mikser (Şekil 3.7-a) kullanılmıştır. Karışım oranlarına göre tartılan malzemelerin karıştırılmasında ve lifsiz taze kompozitin üretilmesi aşamasına kadar şu yöntem takip edilmiştir; çimento, agrega ve UK (karışıma göre değişkenlik göstermektedir) gibi katı bileşenler kuru halde takriben 5 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra, NC içermeyen karışımlarda kimyasal katkının eklenmiş olduğu karma suyu kuru halde karıştırılan bileşenlere eklenip bu şekilde de takriben 5 dakika daha malzemeler karıştırılmıştır. Nano malzemelerin matris içinde homojen ve etkili bir şekilde dağıtılması çok büyük bir önem arz etmektedir. Nano taneciklerin etkili dağılımının sağlanmasıyla hidrasyonda artış meydana geldiğinden dolayı çalışma kapsamında kullanılan nano malzemelerin çimento esaslı malzeme matrisi içinde etkili dağılımının sağlanması için üretime geçmeden önce yani nano malzemeler çimento esaslı malzeme içerisinde kullanılmadan önce (bileşen olarak karışıma göre değişkenlik göstermekle birlikte) su, NC, süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ve UK ile birlikte bir blender cihazı ile yaklaşık 5 dakika karıştırılmış ve daha sonrasında kuru malzemeye eklenmiştir. Tüm bu aşamalardan sonra elde edilen lifsiz taze betonda liflerin

matris içinde homojen bir dağılım sergileyebileceği tahmin edilen bir işlenebilirliğe eriştiği ön görüldüğünde karışıma göre önce PP lifleri akabinde ise BS lifleri eklenmiştir. Lifler eklendikten sonra takriben 5 dakika ilave bir karışım ile taze lifli kompozit üretilmiştir. Üretilen numuneler boyutları 40x40x160 mm olan üç gözlü kalıplara eklenmiştir. Kalıplara eklenen karışımlar laboratuvar koşullarında 24 saat bekledikten sonra kalıptan çıkarılmış ve hava geçirimsiz poşetlerde işlem göreceği kür yaşına kadar bekletilmiştir (Şekil 3.8-b). 7, 28 ve 90 günlük kür yaşına ulaşan numuneler hava geçirimsiz poşetlerden çıkarılıp, kül fırınında (Şekil 3.7-b) üç saat boyunca 200°C ve 500°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Akademik araştırmalarda yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin sıcaklık işlemi sonrası soğutma işlemi için literatürde farklı metotlar takip edilmektedir (Krishna ve ark., 2019; Wang ve ark., 2019).

Yapılarda yangın sürecinde kendiliğinden soğuma durumuna kıyasen su ile müdahale yöntemi uygulamaya/sahaya hem daha uyumlu olduğundan hem de termal genleşme seviyesinin en yüksek olduğu şart olduğu için mevcut çalışmada bu soğutma yöntemi tercih edilmiştir (Şekil 3.8-d). Soğutulan numunelerin yüzeyleri kurutulduktan sonra numunelerde meydana gelen

boyutsal değişimler fotoğraflarla kayıt altına alınmıştır. Mevcut çalışmada hem yüksek sıcaklık etkisi hem de sülfat etkisi ayrı ayrı incelendiğinden dolayı, her karışım için üretilen numuneler iki kısma ayrılmış olup, bir kısmı yüksek sıcaklık etkisinin incelenmesi diğer kısmı ise yüksek sıcaklık etkisi sonrası sülfat etkisinin incelenmesi için değerlendirilmiştir. Numuneler yüksek sıcaklık sonrası toplamda üç gün sülfat hücumuna tabi tutulmuş olup (Şekil 3.8-e), bu süreç sonrası her bir karışım için sırasıyla ultrases dalgası hızı (UPV) değerleri belirlenmiş (Şekil 3.8-f) ve üç noktalı eğilme testi yapıldıktan sonra (Şekil 3.8-i) eğilme etkisiyle iki parçaya ayrılan numuneler için basınç dayanımı testi yapılmıştır (Şekil 3.8-j). Gerçekleştirilen deney, analiz ve diğer ölçümler için numune boyutu, referans alınan kür yaşı, numune sayıları, elde edilen veriler üzerinden değerlendirme yapılmıştır. İlgili açıklamalar Tablo 3.4'te verilmiştir.



a)



b)

Şekil 3.7. Tava tipi mikser ve kül fırını.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



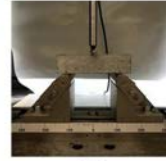
(f)



(g)



(h)



(i)



(j)

Şekil 3.8. Numune üretim, test ve analiz süreci.

Çimento esaslı lifli kompozitlerin hem yüksek sıcaklık hem de sülfat etkisi gibi ikili dayanıklılık problemleri etkisi altındaki temel mühendislik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Mevcut çalışmada, farklı kür yaşları ve karışım parametrelerine bağlı olarak mekanik özelliklerin belirlenmesinde;

- a) Basınç Dayanımı,
- b) Ultrases Dalgası Hızı,
- c) Eğilme Dayanımı olmak üzere temel mühendislik özellikleri incelenmiştir.

Tablo 3.4. Testler, analizler ve diğer bilgiler.

Deney Yöntemi	Numune Boyutları		Numune Test Yaşı, Gün	Numune Adedi (Her yaş için)
Basınç Dayanımı		40x40x40 mm	7, 28 ve 90	4
Eğilmede Çekme Dayanımı		40x40x160 mm		2
UPV		40x40x160 mm		2

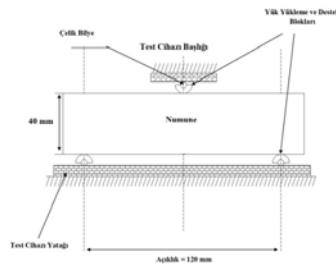
3.2.1. Eğilme dayanımı

Her bir karışım için üretilmiş olan kiriş numunelerinin üç noktalı eğilme testi, Japonya menşeli

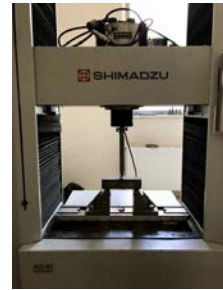
Shimadzu marka AG-IC serisi kapalı devre elektromekanik üniversal test cihazı ile (Şekil 3.9-a) numune yükleme hızı 1.78 kN/sn. olacak şekilde gerçekleştirilmiş olup, numunelerin eğilmede çekme dayanımı değerlerinin belirlenmesi adına 40x40x160 mm geometrik boyutlarındaki prizmatik kiriş numuneleri kullanılmıştır. Test için kür yaşı gelmiş olan numunelerin kenar kısımlarındaki fazla malzemeler temizlendikten sonra Şekil 3.9-b’de belirtilen şekilde mesafeler ayarlandıktan sonra üç noktalı eğilme testi numunelere uygulanmıştır (Şekil 3.9-c). Test sırasında cihaz tarafından hassas bir şekilde elde edilen yük ve orta açıklık sehim değerleri Excel aracılığıyla Eğilme Dayanımı-Birim Şekil Değiştirme grafiğine dönüştürülmüş ve elde edilen veriler aracılığıyla eğilme dayanımı değerleri hesaplanmıştır.



a)



b)



c)

Şekil 3.9. Üç noktalı eğilme testi deney düzeneği.

3.2.2. Basınç dayanımı

Üretilen prizmatik çimento esaslı lifli kompozit kırış numuneleri üç noktalı eğilme testine tabi tutulduktan sonra ikiye ayrılan numuneden elde edilen iki adet numuneara aparatlar aracılığıyla 40x40 mm²'lik bir alan oluşturularak basınç dayanımı testi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.10-b). Her kür yaşı için toplamda dört numune test edilmiş olup, numuneler Shimadzu marka AG-IC serisi kapalı devre elektro-mekanik universal test cihazı ile test edilmiştir (Şekil 3.10-a). 7, 28 ve 90 günlük kür yaşları için basınç dayanımı testi gerçekleştirilmiştir. Aynı karışımdan elde edilen ve basınç dayanımı için test edilen numunelerin sonuçlarının ortalaması alınarak basınç dayanımı belirlenmiştir. Çelik lifli kompozit numunelerinin eğilme testine tabi tutulduktan sonra, aynı numune parçalarının basınç testine tabi tutulması durumunda oluşabilecek performans kaybı çeşitli faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Genel olarak, çelik lifli betonların eğilme dayanımı yüksek olmakla birlikte, basınç testinden sonra bu dayanımda azalma meydana gelebilir. Numuneler birbirleriyle kıyas edildiğinden bu kayıp göz ardı edilmiştir.



a)



b)

Şekil 3.10. Basıncı dayanımı testi deney düzeneği.

3.2.3. UPV

Ultrasound wave velocity (UPV) test, material properties such as density and homogeneity like micro structural integrity and micro structural changes in value evaluation for construction engineering structure materials area as a non-destructive test methods from one of the evaluation techniques. This test, materials sound wave propagation principle based. As a procedure, 20 kHz to 50 kHz frequency range of ultrasonic waves production contains and these are used by a transmitter to the material. These waves, cracks and voids like boundaries or defects as far as they encounter the material from the inside they are reflected and here a receiver (transducer) is used. The waves pass through the material for the waves to pass through the material.

kaydedilir ve dalga hızının hesaplanması sağlanır. UPV test prosedürü birkaç adımdan oluşmaktadır.

- a) Malzeme yüzeyinin uygun temas ve temizlik sağlamak için hazırlanması,
- b) Transdüserler malzemenin karşılıklı iki tarafına yerleştirilir ve jel gibi malzemeler kullanılarak akustik bağlantı artırılır,
- c) Enstrüman kalibre edilir ve ultrasesdalgası üretilir ve alınır. Geçiş süresi kaydedilir.

Elde edilen verilerin analizi, dalga hızının hesaplanmasını ve malzeme kalitesini değerlendirmek için belirlenmiş kriterler(Demirhan, 2020) veya standartlarla karşılaştırılmasını içerir.

Mevcut çalışma kapsamında üretilen 40x40x160 mm boyutlarındaki çimento esaslı lifli kompozitler her kür yaşı için belirtilen prosedüre tabi tutularak her bir karışım için kür yaşı bazlı UPV değerleri belirlenmiştir (Şekil 3.10-b). Mevcut çalışmada Proceq marka Pundit+ modeli kullanılmıştır (Şekil3.11-a).



a)



b)

Şekil 3.11.UPV cihazı test cihazı ve düzeneği.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Mevcut çalışma kapsamında elde edilen verilerin değerlendirilmesi ve işlenmesi adına Araştırma Sonuçları ve Tartışma bölümü üç alt bölümden oluşmaktadır.

Birinci Bölüm’de oda sıcaklığına, 200⁰C ve 500⁰C sıcaklığa maruz kalmış olup, sülfat çözeltisine maruz bırakılmamış numunelerin sadece sıcaklık etkisinden dolayı karışım parametreleri dikkate alınarak basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve UPV değerlerindeki değişimlere değinilmiştir. İkinci Bölüm’de yüksek sıcaklık sonrası sülfat çözeltisine üç gün boyunca maruz bırakılmış numunelerin sadece sülfat etkisinden dolayı karışım parametrelerine bağlı olarak basınç ve eğilme dayanımları ve UPV değerlerindeki değişimlerine değinilmiştir.

4.1. Yüksek Sıcaklık Etkisi

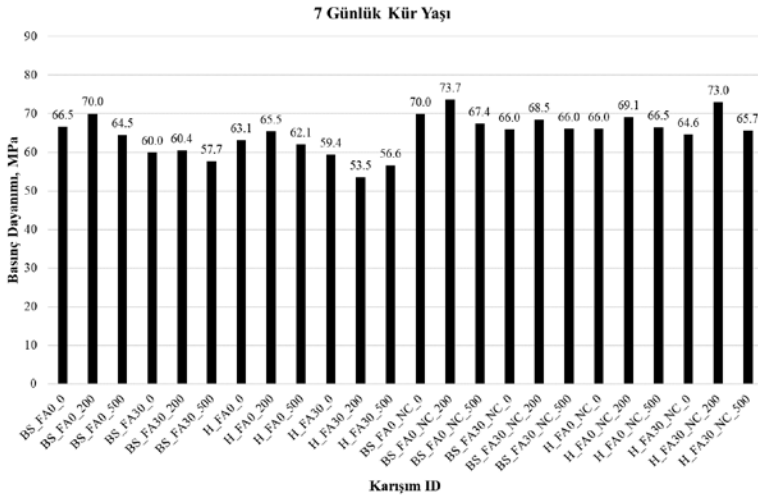
Mevcut alt bölümde, ÇELK’lerde yüksek sıcaklık etkisinin; basınç dayanımı, UPV ve Eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini araştıran deneysel sonuçlar ve bu bulguların analizi sunulmaktadır.

4.1.1. Basınç dayanımı

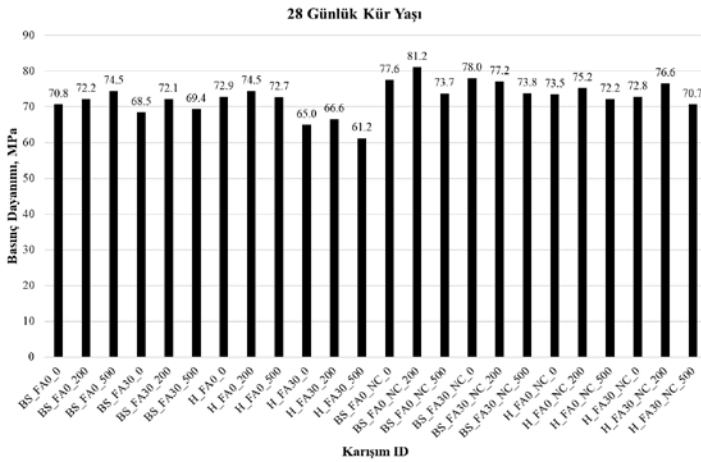
Bilindiği üzere basınç dayanımı, çimento esaslı malzemelerin dayanım özelliklerini ölçmek için sıkça kullanılan tahribatlı bir test yöntemidir. Bu teknik, malzemenin yük taşıma kapasitesini değerlendirmekte ve çeşitli mühendislik uygulamalarında büyük önem taşımaktadır. Basınç dayanımı testi, malzemeye uygulanan basınç yükü altında malzemenin kırılma veya deformasyon noktasını belirlemektedir. Bu özellik, malzemenin yoğunluğu, gözenekliliği ve bileşimindeki diğer faktörlere bağlıdır. Basınç dayanımı, malzemenin içyapısındaki boşluklar, çatlaklar veya diğer zayıflıkların etkilerini yansıtarak, malzemenin genel dayanıklılığı ve güvenilirliği hakkında bilgi vermektedir. Buna binaen, çimento esaslı malzemelerin dayanım ve dayanıklılığı, inşaat mühendisliği alanında büyük bir önem taşır ve çevresel koşulların bu dayanıklılık üzerindeki etkilerinin anlaşılması, yapıların güvenliği ve uzun ömürlülüğü açısından kritik ve kilit bir rol oynamaktadır. Çimento esaslı kompozitlerin performansı, maruz kaldığı çevresel koşullara bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Özellikle en yıpratıcı dayanıklılık problemlerinden biri olan yüksek sıcaklık gibi zorlu çevresel koşullar etki düzeylerine göre çimento esaslı

malzemenin mikro yapısında ve dolayısıyla mekanik özelliklerinde önemli değişimlere neden olabilmektedir. Çalışmanın mevcut alt bölümünde, yüksek sıcaklık etkisinin çimento esaslı lifli kompozitlerin mikro yapısal değişimleri üzerindeki etkisini incelemek için karışım parametrelerinin her biri değerlendirilmiştir. Böylece, 7, 28 ve 90 günlük kür yaşları için her numunenin basınç dayanımı ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar bilimsel çalışmalarla karşılaştırılarak tartışılmıştır.

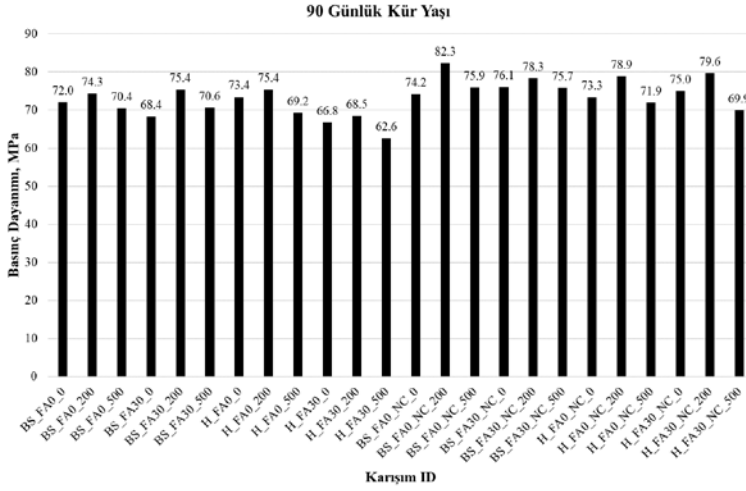
Tablo 3.3'teki karışım parametreleri baz alınarak tasarlanmış çimento esaslı lifli kompozitler 7, 28 ve 90 günlük kür yaşları geldiğinde 3 saat boyunca 200°C ve 500°C yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış ve soğutma işlemi sonrasında her bir numunenin basınç dayanımı testi yapılmış ve değerlerin ortalaması alınmıştır. 7, 28 ve 90 günlük kür yaşları için elde edilen deneysel sonuçların grafikleri için sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.1. 7 günlük kür yaşı basınç dayanımı değerleri.



Şekil 4.2. 28 günlük kür yaşı basınç dayanımı değerleri.



Şekil 4.3. 90 günlük kür yaşı basınç dayanımı değerleri.

7 günlük erken kür sürecinde, çimento hidratasyonu devam ettiği için mikro yapısal oluşum tam olarak gelişmemiştir. Bu dönemde C-S-H jeli ve kalsiyum hidroksit (CH) gibi hidratasyon ürünleri oluşmaya başlamış olsa da süreç halen devam ettiğinden dolayı mikro yapıdaki boşluklar ve çatlaklar tamamen doldurulmamıştır. Bu durumun bir neticesi olarak, şekillerde görüldüğü üzere, 7 günlük kür yaşında mikro yapısal dayanım gelişim sürecinin devam ettiğini görebilmekteyiz. 28 ve 90 günlük kür yaşlarında ise dayanım gelişiminin nispeten çok daha fazla geliştiğini görmekteyiz. Karışımlarda tercih edilen su/bağlayıcı oranı 0.32 olduğundan ve özellikle numuneler hava

geçirimsiz poşetlerde kendi nemlerinde kür edildiğinden dolayı 28 ve 90 günlük kür yaşlarında nispeten daha kararlı bir mikro yapısal oluşumun belirginleştiğini görmekteyiz. Bu durumun bir neticesi olarak, her iki kür yaşındaki aynı karışım bazlı dayanım değerleri neredeyse aynı veya birbirine çok yakın olarak tespit edilmiştir.

Kür yaşı fark etmeksizin, tüm kür yaşlarında sıcaklık derecesinin hidrasyon sürecinde farklı etki oluşturduğunu görmekteyiz. Tüm kür yaşlarında, genel olarak, laboratuvar koşullarında hava geçirimsiz poşette kür edilen numunelere kıyasen 200°C ve 500°C sıcaklıklarda mikro yapısal gelişimin farklılık gösterdiği tespit edilmiş olup, en yüksek değerler 200°C sıcaklığın uygulandığı numunelerde gözlemlenmiş ve en düşük değerler ise 500°C sıcaklığın uygulandığı numunelerde elde edilmiştir. Bu durum, 200°C sıcaklığın çimento esaslı malzemelerin hidrasyon mekanizmasını karışım parametrelerine bağlı olarak farklı seviyelerde arttırdığı ve 500°C sıcaklığın ise yüksek sıcaklık nedeniyle teşvik edilmiş hidrasyon mekanizmasından dolayı oluşan mikro yapısal gelişimden daha fazla bir mikro yapısal hasar oluşturduğunu göstermiştir. Gözkeser (2024) tarafından 250°C sıcaklık etkisi ve kür koşullarının incelendiği yüksek lisans tezinde özellikle hem sıcaklık

seviyesi hem de poşette kür edilen karışımlarda benzer sonuçlar elde etmiştir.

Mikro çelik ve polipropilen liflerin çimento esaslı kompozitlerde ayrı ayrı ve birlikte kullanımı, yüksek sıcaklıklarda farklı basınç dayanımı olarak toplam performansa katkı sağlarlar. Mikro çelik lifler, düşük ve orta sıcaklıklarda çatlak kontrolü sağlayarak basınç dayanımını artırırken, çok yüksek sıcaklıklarda oksitlenerek mekanik özelliklerini yitirir ve bu da dayanımı düşürür. Polipropilen lifler ise düşük sıcaklıklarda mikro çatlakları önleyerek dayanımı artırırken, genel olarak 160°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda eriyip buhar basıncını azaltır ama öte yandan dayanımı zayıflatır. Hibrit lif kullanımında ise düşük ve orta sıcaklıklarda sinerjik etki ile ideal dayanımı sağlarken, yüksek sıcaklıklarda polipropilen liflerin yüksek sıcaklık etkisiyle oluşan buhar kaçışını kolaylaştırması ve mikro çelik liflerin başlangıçtaki dayanımını koruması nedeniyle daha dengeli ve dayanıklı bir performans elde edilir. Bu minvalde kür koşulları ve lif dışındaki diğer parametrelerin sabit olduğu koşullar incelendiğinde, genel olarak, en yüksek dayanım değerlerinin pirinç kaplı çelik liflerin kullanıldığı karışımlarda elde edilmiş olup, hibrit lif donatılı karışımlarda polipropilen lif kullanılmasında

dayanım değerinde düşüş beklenmesine rağmen dayanım düşüşü çok daha düşük seviyelerde gözlemlenmiştir. Hibrit lifli karışımlardaki bu durumun temel nedeni, kullanılan lif oranlarının %1.2 çelik lif ve %0.3 polipropilen lif olmasından yani polimerik lifin oranının düşük olmasından ve dolayısıyla mikro yapısal davranışın daha çok çelik lifli matris gibi davranması ile neticelendiğinden dolayıdır. Buna binaen, polipropilen lif kullanımından kaynaklı oluşan dayanım kaybı seyrek ve düşük bir etki olarak kendini göstermiştir.

Mevcut deneysel çalışma, bir önceki paragraflarda belirtilen parametrelere ilave olarak çimento esaslı lifli kompozit numunelerdeki UK'nın basınç dayanımına olan etkisini de değerlendirmektedir. Şekillerde görüldüğü üzere, elde edilen sonuçlar, UK'nın erken dönemde, özellikle 7 günlük kür yaşında, puzolanik reaksiyonlarının henüz tam olarak oluşmamış olmasından dolayı dayanıma önemli bir katkı sağlayamadığını göstermektedir. Hatta bu dönemde, UK'nın dayanıma olan etkisinin neredeyse ihmal edilebilir düzeyde olduğu gözlemlenmektedir. Öte yandan, ilerleyen dönemlerde, 28 ve 90 günlük kür yaşlarında, UK'nın dayanıma katkı sağladığı görülmektedir. Bu durum, puzolanik reaksiyonların zamanla artmasıyla ilişkilendirilmektedir.

Bununla birlikte, hidratasyon dolayısıyla puzolanik reaksiyonları teşvik eden yüksek sıcaklık etkisi altında UK'nın reaksiyon hızını artırdığı ve dolayısıyla numunelerin basınç dayanımına daha fazla katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Özellikle 200°C sıcaklığa maruz kalan numunelerde, UK'nın dayanıma olan etkisinin 500°C sıcaklığa nispeten daha fazla arttığı deneysel sonuçlarla elde edilmiştir. Bu durum, yüksek sıcaklığın reaksiyon hızını artırıcı etkisinin yanı sıra, puzolanik reaksiyonların oluşum sürecini hızlandırarak UK'nın dayanıma olan katkısını artırmasıyla ilişkilendirilmektedir. Bu bulgular, çimento esaslı lifli kompozit malzemelerde UK'nın katkısının zaman ve sıcaklık gibi faktörlere duyarlılığını vurgulamaktadır. Sonuç olarak, kür yaşı artışıyla birlikte UK'nın sıcaklık etkisine bağlı olarak performans artırıcı olarak katkı sağladığı tespit edilmiştir.

NC, C-S-H jelleri üretmek için puzolanik özelliklere sahip olmasa da fiziksel olarak inert bir filler malzemesi gibi davranıp matriste parçacık dolgusunun yoğunluğunu ve dolayısıyla kompozitlerin basınç dayanımını artırmakta olup, (i) C_3S 'nin hidratasyon mekanizmasını teşvik etmek, (ii) karboalüminat oluşumunu sağlayarak ilave hidratasyon ürünü oluşturup mikro yapısal gelişime katkı sağlamak ve (iii) etrenjit oluşumunu stabilize etmek gibi

çimento esaslı kompozitlerin pek çok mühendislik özelliklerini geliştirmektedir. NC'nin bu imtiyazlı özelliğinin bir neticesi olarak, kür yaşına ve diğer karışım parametrelerine bakılmaksızın, UK'nın ve NC'nin beraber kullanıldığı çimento esaslı sistemlerde, belirtilen mikro yapısal performans artırıcı katkıların ve dolayısıyla gelişen mikro yapının bir neticesi olarak lifli sistemlerde yüksek sıcaklığa da daha fazla performans katkısı elde edilmiştir. Öte yandan, NC ve UK'nın kullanımı filler görevi de gördüğü için her iki mineralin kullanımı ile daha yoğun bir matris elde edilmekte ve her kür yaşı için bu iki ürünün birlikte kullanılmasından dolayı nispeten daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir. Ayrıca, şekillerden de görüldüğü üzere, tüm kür yaşlarında nispeten daha kararlı ve istikrarlı/stabil bir mikro yapı ve bunun bir neticesi olarak daha yüksek bir dayanım değeri NC'nin kullanıldığı karışımlarda elde edilmiştir.

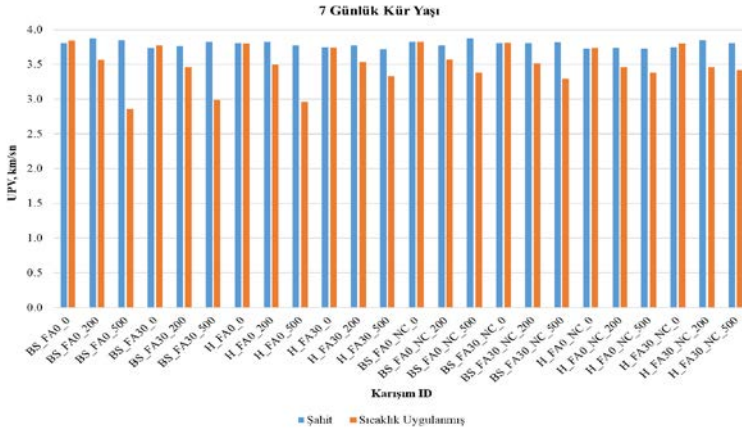
4.1.2. Ultrases dalgası hızı (UPV)

Ultrases dalgası hızı (Ultrasound Pulse Velocity, UPV), çimento esaslı malzeme gibi sertleşmiş malzemelerin içyapısını incelemek ve mikro yapısal özelliklerini belirlemek amacıyla kullanılan tahribatsız bir yöntemdir. Bu teknik, yapısal sağlamlık analizi, malzeme

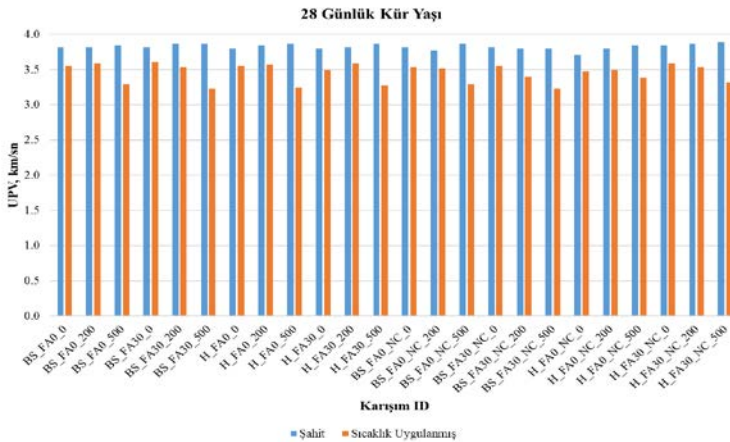
kalitesinin kontrolü ve çeşitli endüstriyel kullanımlarda yaygın olarak kullanılır. Ultrases dalgaları, yüksek frekanslı ses dalgalarıdır ve çeşitli malzemelerin içinden belirli bir hızda hareket ederler. Bu hız, genellikle malzemenin fiziksel özelliklerine, özellikle de yoğunluğuna ve elastikiyetine bağlıdır. Malzemenin içinden geçerken, ultrases dalgaları hızlarında değişikliklere neden olabilmektedir. Bu değişiklikler, materyalin içindeki boşluklar, çatlaklar veya diğer anormallikler kaynaklı olabilmektedir. Dolayısıyla, ultrases dalgalarının hızı, materyalin homojenliği, yoğunluğu ve elastikiyet modülü gibi özellikleri hakkında bilgi sağlayabilir. Çalışmanın mevcut bölümünde, yüksek sıcaklık etkisinden dolayı karışım parametrelerinin her birinin çimento esaslı lifli kompozitlerin mikro yapısal değişimindeki etkisini incelemek amacıyla 7, 28 ve 90 günlük kür yaşları için her bir numunenin ultrases dalgası hızı ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar bilimsel çalışmalar ışığında tartışılmıştır.

Tablo 3.3'te verilen karışım parametreleri referans alınarak üretilen numuneler üç ana kategoride değerlendirilmiştir. Her karışım için birer numune sıcaklığa maruz bırakılmadan laboratuvar koşullarında hava geçirimsiz poşette bekletilmiş, kür yaşı geldikten

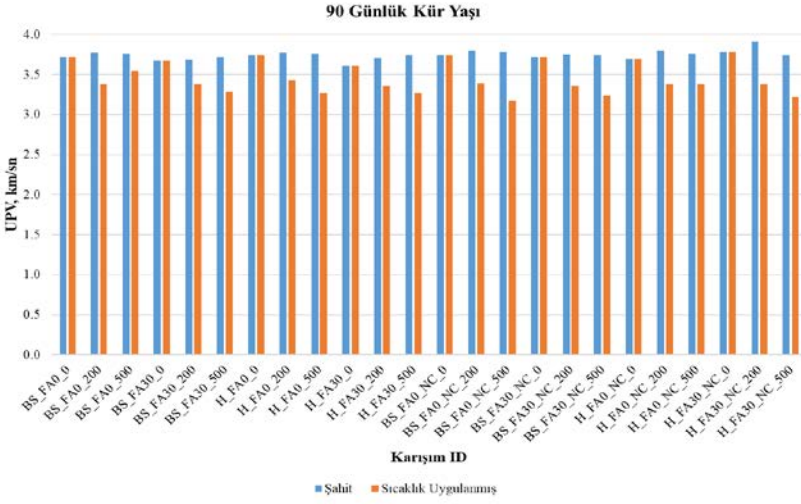
sonra üç saat boyunca 200⁰C sıcaklığa maruz bırakılmış ve üçüncü numune ise benzer şekilde üç saat boyunca 500⁰C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. 7, 28 ve 90 günlük kür yaşları için yüksek sıcaklık sonrası numunelerde ölçülen UPV değerleri sırasıyla Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.4. 7 günlük kür yaşı UPV değerleri.



Şekil 4.5. 28 günlük kür yaşı UPV değerleri



Şekil 4.6. 90 günlük kür yaşı UPV değerleri.

Şekillerde görüldüğü üzere, kür yaşına bakılmaksızın, şahit numunelerin UPV değerleri birbirine çok yakın olup, ihmal düzeyinde bir farklılık bulunmaktadır. 7 günlük kür yaşında nispeten daha fazla düzeyde devam eden hidratasyon reaksiyonlarının bir neticesi olarak 7 günlük kür yaşında mikro yapısal gelişim halen devam ettiğinden dolayı UPV değerleri arasındaki farklılık en fazla 7 günlük kür yaşında tespit edilmiştir. 28 ve 90 günlük kür yaşlarında ise nispeten daha yakın değerler gözlemlenmiştir. Hem 200°C hem de 500°C'lik sıcaklık etkilerinden dolayı mikro yapıda meydana gelen farklı düzeylerdeki kusurlardan dolayı UPV değerlerinde düşüş tespit edilmiştir. Artan sıcaklık etkisinden dolayı

daha yüksek değişimler oluştuğundan dolayı 500⁰C'lik sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde en düşük UPV değerleri tespit edilmiştir. şekillerde görüldüğü üzere, sıcaklık etkisinden dolayı elde edilen bu azalış değeri düşük olarak elde edilmesinin temel nedenlerinden biri su/bağlayıcı oranının çok düşük sečilmesinden dolayı yüksek bir doluluk oranının oluşmasından ve liflerin kullanımından dolayı nispeten daha kararlı bir mikro yapı tesis edildiğinden azalma olmasına rağmen bu azalma düşük seviyelerde kalmıştır. Özellikle 28 ve 90 günlük kür yaşında nispeten daha kararlı bir hidrasyon süreci temin edildiğinden bu fark daha da azalmıştır. Buna ilave olarak, numuneler çok düşük su/bağlayıcı oranıyla tasarlandığından ve numunelerin test edileceği kür yaşına kadar numuneler hava geçirimsiz poşetlerde kendi tasarım suyu ile kür edildiğinden 28 ve 90 günlük kür yaşlarında mikro yapısal durumun çok benzer ve kararlı olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, yüksek sıcaklığa maruz kalan çimento esaslı malzemelerde nem durumu hayati öneme sahiptir ve bu, malzemelerin performansını olumsuz etkilemektedir. Çimento esaslı malzemeler neme doygun veya belirli bir nem seviyesine sahipken, yüksek sıcaklık altında su buharlaşmaya başlamakta ve bu buharlaşma, malzeme içinde dâhili buhar basıncı

oluşturarak mikro çatlakların meydana gelmesine veya mevcut çatlakların genişlemesi ile neticelenmektedir (Zhang ve ark., 2015; Duran-Herrera ve ark., 2016; Van Der Heijden ve ark., 2007). Bu durum, malzemenin mekanik dayanıklılığını azaltır ve yapısal bütünlüğünü zedeler. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda, tasarımda tercih edilen 0.32 gibi çok düşük su/bağlayıcı oranının bir neticesi olarak nispeten çok daha düşük buhar basınçları çimento esaslı numunelerin matrisinde meydana geldiğinden dolayı UPV değerlerindeki değişim de çok kısıtlı kalmıştır.

UK 14 ile 150 günlük süre zarfından pozolanik reaksiyonlara dâhil olmakta ve mikro yapısal iyileşmeye katkı sağlamaktadır. Karışım parametreleri fark etmeksizin, UK içeren karışımlarda erken dönemde pozolanik reaksiyonlardan dolayı ilave hidrasyon ürünleri oluşmadığından dolayı mikro yapısal iyileşmede kayda değer sonuçlar elde edilmemiştir. Bunun bir sonucu olarak 7 günlük kür yaşında sıcaklık etkisinden dolayı artan sıcaklık ile birlikte UPV değerlerinde düşüş elde edilmiştir. Öte yandan, 28 ve 90 günlük kür yaşlarında pozolanik reaksiyonlar neticesinde artan hidrasyon ürünlerinin bir neticesi olarak mikro yapıda belirgin seviyede iyileşmeler elde edilmiş olup, sıcaklık etkisinden

dolayı daha az hasar gözlemlenmiştir. Bunlara ilave olarak, UK ve NC kullanıldığı karışımlarda mineral katkının alüminat fazı ile NC'nin karbonatlı bileşiklerinin kimyasal reaksiyonları neticesinde ilave hidratasyon ürünü olan karboalüminatlar oluştuğundan dolayı mikro yapıda iyileşmeler meydana geldiğinden bu iki bileşenin kullanıldığı karışımlarda sıcaklık etkisinden dolayı UPV değerlerinde nispeten daha düşük azalışlar gözlemlenmiştir. Çekirdeklenme etkisi nedeniyle hidratasyon mekanizmasını hızlandıran NC parçacıklarının varlığında C-S-H oluşumu desteklenir. Ayrıca NC, C_3S ile reaksiyona girer ve C-S-H jelleri, CH ve kalsiyum karbosilikat hidratlar üretir. NC ayrıca kimyasal etki olarak bilinen alüminat fazı ile reaksiyona girer ve CH'nin hemikarboalüminatlar tarafından tüketildiği yerde hemikarboalüminatlar ve monokarboalüminatlar üretilir. Normal PC'de alüminat fazı sınırlı yani nispeten düşük olduğundan, UK ve NC'den dolayı elde edilen katkı UK'sız karışımlarda nispeten daha düşük olduğundan, NC'nin (bu kimyasal etki sonucu oluşan ilave hidratasyon ürünleri açısından) katkısı da sınırlıdır. Alüminat fazının ilave yüksek kaynağı yani UK gibi herhangi bir ilave çimentolu malzeme ile ilave hidratasyon ürünleri oluşmakta ve birleşik koşulların (normal

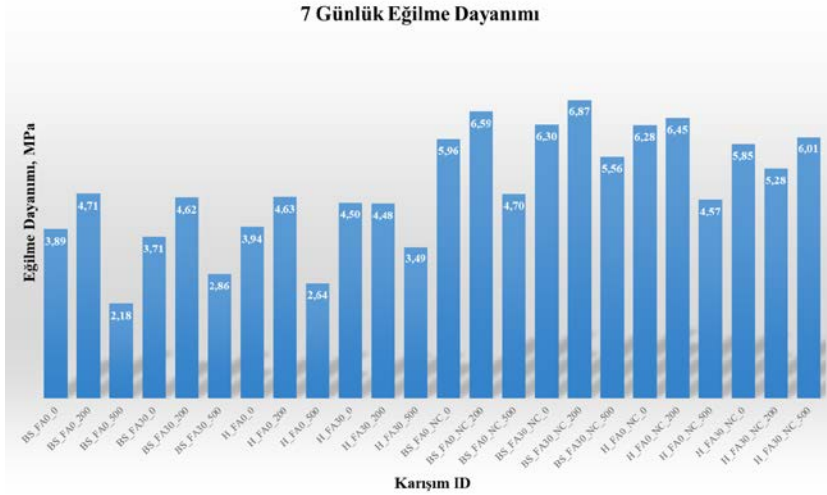
PC+NC+alüminat fazı) varlığında daha fazla katkı elde edilmektedir. Yüksek hacimli uçucu UK'lı çimento bazlı malzemenin varlığında NC'nin önemli katkısı, daha yüksek ve dikkat çekici erken yaş performans özellikleri olarak bilinmektedir. Nitekim 7 günlük kür yaşında bunun etkisini görebilmekteyiz. NC'nin hidrasyon mekanizması üzerindeki kimyasal etkisi hem parçacık boyutuna hem de ilave çimentolu malzeme yani alümina içeriği ile sinerjik etkiye bağlıdır.

Çimento esaslı lifli kompozitlerde mikro çelik lifler ve polipropilen liflerin yüksek sıcaklıklara maruz kalmaları durumunda, her iki lif türünün de malzemenin performansını önemli ölçüde iyileştirmektedir. Mikro çelik lifler, yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılık ve çimento matrisine sağladıkları çekme dayanımı ile öne çıkarak çatlak yayılmasını önlemekte olup, kompozitin genel mekanik dayanımını artırmaktadır. Çelik liflerin 400-600°C aralığında mekanik özelliklerini koruması, bu liflerin yüksek sıcaklık dayanımında kritik bir rol oynadığını göstermekte olup, 600°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda oksidasyon nedeniyle mekanik özelliklerinde düşüş yaşanmaktadır. Öte yandan, polipropilen lifler yaklaşık 160-170°C'de erimeye başlayarak daha yüksek sıcaklıklarda bozulup eriyerek matris içinde mikro

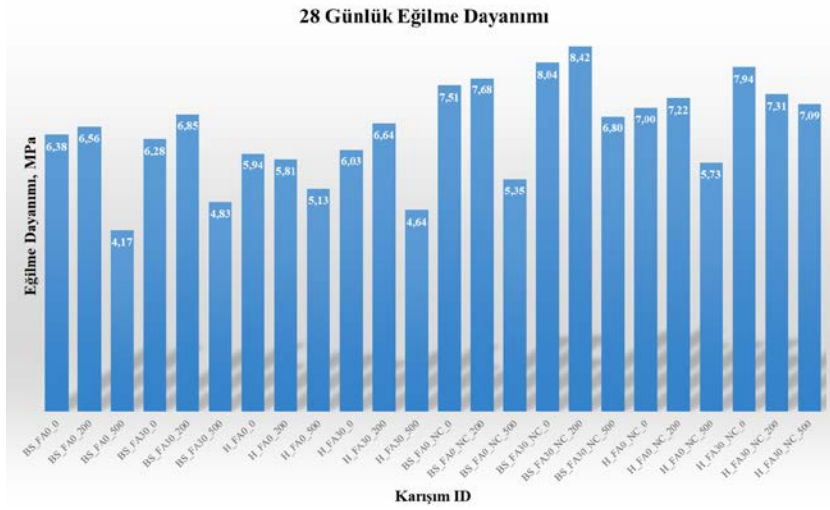
kanallar oluşturmaktadır. Bu mikro kanallar, yüksek sıcaklıklarda buhar basıncını düşürerek patlama riskini azaltmada etkili olmaktadır. Polipropilen lifler erime sıcaklığına kadar kompozitin çatlama direncini artırsa da erime sonrası ilk direnç kaybı gözlemlenir. Hibrit kompozitlerde ise mikro çelik ve polipropilen liflerin birlikte kullanılması, her iki lifin avantajlarını birleştirerek çeşitli sıcaklık aralıklarında mekanik özelliklerin korunmasını ve çatlak direncinin optimize edilmesini sağlar. Polipropilen lifler düşük sıcaklıklarda, çelik lifler ise yüksek sıcaklıklarda dayanıklılığı sağlayarak yangın dayanımı gibi kritik performans gereksinimlerini karşılamaktadır. Mikro yapısal değişimler temelinde, polipropilen liflerin erimesiyle oluşan boşluklar buhar basıncını azaltarak patlama riskini düşürürken, çelik lifler matrisin mekanik bütünlüğünü korur ve 600°C'ye kadar dayanım sağlar (bu değer uyguladığımız sıcaklığın üstünde bir değerdir). Bu minvalde elde edilen sonuçlara bakıldığında, kür yaşına bakılmaksızın, %0.3 oranında polipropilen lifinin kullanımı ile yapılan lif hibritlemesinde hibrit lifli sistemlerde belirgin seviyede bir düşüş tespit edilmemiş olup, genel olarak, benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, lifler arasındaki sinerjiyi teyit etmektedir.

4.1.3. Eğilme dayanımı

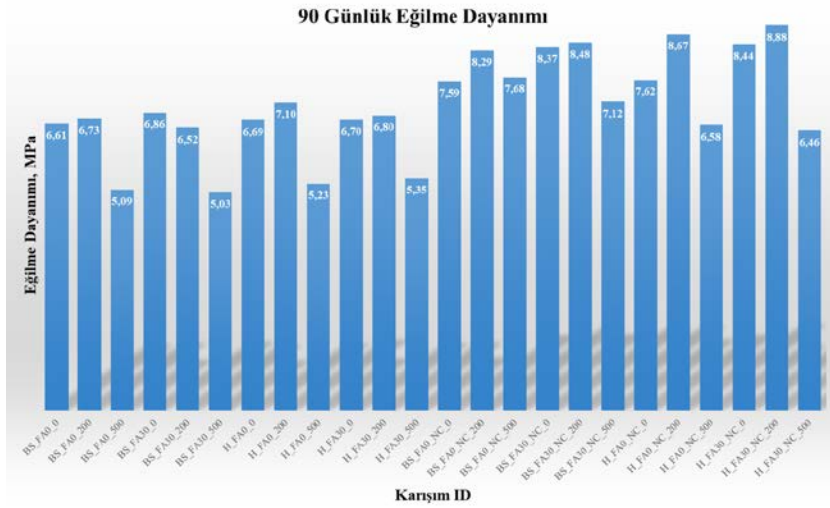
Farklı değişkenlere göre tasarlanmış olan karışımlar 7, 28 ve 90 günlük kür yaşlarında 200°C ve 500 °C sıcaklıklara tabi tutulmuştur. Su ile soğutma işlemine tabi tutulan numunelerin sıcaklığı oda sıcaklığına eriştikten sonra üç noktalı eğilme dayanımı testine tabi tutulmuş olup, böylece çimento esaslı lifli kompozitlerin yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında eğilme dayanımlarındaki değişiklikler incelenmiştir. Elde edilen verilen 7, 28 ve 90 günlük kür yaşları için sırasıyla Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.7. 7 günlük kür yaşı eğilme dayanımı değerleri.



Şekil 4.8. 28 günlük kür yaşı eğilme dayanımı değerleri.



Şekil 4.9. 90 günlük kür yaşı eğilme dayanımı değerleri.

Kür yaşına bakılmaksızın, numunelere etki eden 500°C sıcaklık derecesi hem mikro yapısal değişim hem de özellikle çimento esaslı lifli kompozitlerin eğilme

performansını etkileyen lif-matris ara yüz özellikleri olumsuz yönde etkilendiğinden dolayı 500⁰C sıcaklığın uygulandığı numunelerin eğilme dayanımında düşüş elde edilmiştir. Bu değişim, daha önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere benzer şekilde eğilme dayanımında da tespit edilmiştir. 7 günlük kür yaşında nispeten daha düzensiz bir değişim gözlemlenmiş olup, 90 günlük kür yaşında daha yüksek eğilme dayanımı değerleri elde edilmiş olup, genel olarak, 28 ve 90 günlük kür yaşlarında değerler birbirine çok yakın tespit edilmiştir. Yine daha önceki basınç dayanımı ve UPV değerlerinin değerlendirildiği bölümlerde de belirtildiği üzere yüksek bağlayıcı dozajı ve düşük su/bağlayıcı oranı nedeniyle ileriki kür dönemlerinde eğilme dayanımının davranışı da basınç dayanımı gibi tespit edilmiştir. Bunların dışında, basınç dayanımı bölümünde de belirtildiği üzere, 200⁰C’de nispeten daha düşük mikro yapısal hasarlar elde edildiği ve özellikle hidrasyon reaksiyonları 200 ⁰C sıcaklıkta daha çok teşvik edildiği için 200⁰C sıcaklığa kadar işlem gören numunelerde basınç dayanımı değerlerinde artış elde edilmiştir. Bunlara ilave olarak, eğilme dayanımında da bu duruma benzer sonuçlar kontrol karışımına kıyasen daha yüksek olarak gözlemlenmiş olup, 200⁰C’lik ısıtıl işlem gören

numunelerin eğilme dayanımı kontrol numunelerine kıyasen daha yüksek ama 500⁰C'ye kadar ısı işlem gören numunelerin eğilme dayanımı ise genel olarak en düşük olarak elde edilmiştir. Basınç dayanımı ve eğilme dayanımındaki bu benzerliğin temel nedeni eğilme dayanımında yüklerin daha çok lif-matris ara yüz özelliklerinden etkileniyor olması ve 200⁰C sıcaklığın lif-matris ara yüz özelliklerini kimyasal aderans sağlayan ilave ürünlerle teşvik ediyor olmasındandır.

Mikro çelik lif içeren kompozitler, yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında eğilme dayanımında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma, nispeten daha yüksek sıcaklıkların çelik liflerin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkileyerek lif-matris ara yüzeyinde zayıflamaya neden olması ile açıklanabilir. Çelik liflerin yüksek sıcaklıklarda mekanik performansını kaybetmesi, kompozitin genel mekanik performansını olumsuz yönde etkilemiştir. Öte yandan, hibrit lif içeren kompozitler daha farklı bir davranış sergilemiştir. Polipropilen liflerin düşük erime sıcaklığına rağmen, bu liflerin mikro çelik liflerle birlikte kullanımı, yüksek sıcaklıkların etkilerini kısmen dengelemiştir. Polipropilen liflerin erimesi sonucu oluşan boşluklar, mikro çelik liflerin stres transferini ve enerji absorbsiyonunu artırarak

kompozitin yüksek sıcaklıklarda eğilme dayanımını korumasına katkıda bulunmuştur. Bu sinerjik etki, hibrit lifli kompozitlerin yüksek sıcaklık koşullarında daha iyi performans sergilemesine olanak tanımıştır. Genel olarak, yüksek sıcaklık etkisi altında mikro çelik lif ve hibrit lif içeren kompozitlerin eğilme dayanımı değerlendirildiğinde, hibrit lif kullanımının daha avantajlı olduğu tespit edilmiştir. Hibrit liflerin, yüksek sıcaklıklarda çelik liflerin performans kaybını azaltarak kompozitin eğilme dayanımını daha yüksek seviyelerde tutabildiğini göstermiştir.

Lifli kompozitlerin eğilme performansını etkileyen en önemli parametrelerden biri de lif-matris ara yüz özelliklerini iyileştiren mineral katkı veya nano malzemelerin çimento esaslı sistemlerde kullanılmasıdır. Lif-matris ara yüz özelliklerinin fiziksel (filler görevi gören mineral katkılar veya nano malzemeler) veya kimyasal (genel hidratasyon ürünleri veya ilave hidratasyon ürünleri oluşumu gibi) etkilerle geliştirilmesi, kompozitlerin mekanik performansını doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Bu durumun bir neticesi olarak, kür yaşına bakılmaksızın, bu iki mineral katkı maddesinin kullanıldığı karışımlarda, lif-matris ara yüz özelliklerindeki iyileşme nedeniyle daha yüksek eğilme

dayanımları elde edilmiştir. UK puzolanik reaksiyonlarla ilave hidratasyon ürünü oluşturarak kimyasal ve reaksiyona girmeyen bileşenleri ile de fiziksel olarak filler görevi görerek lif-matris ara yüz özelliklerini iyileştirdiği için özellikle 28 ve 90 günlük kür yaşlarında eğilme dayanımında belirgin bir iyileşme elde edilmiştir. Benzer şekilde, NC’de, hem filler görevi hem de karboalüminatlar gibi ilave hidratasyon ürünü oluşturarak kimyasal aderansı iyileştirip numunelerin eğilme dayanımında artış ile neticelenmiştir. Öte yandan, şekillerde görüldüğü üzere, UK ve NC’nin kullanıldığı sistemlerde kayda değer artışlar elde edilmiş olup, daha kararlı bir mikro yapı elde edilmiştir.

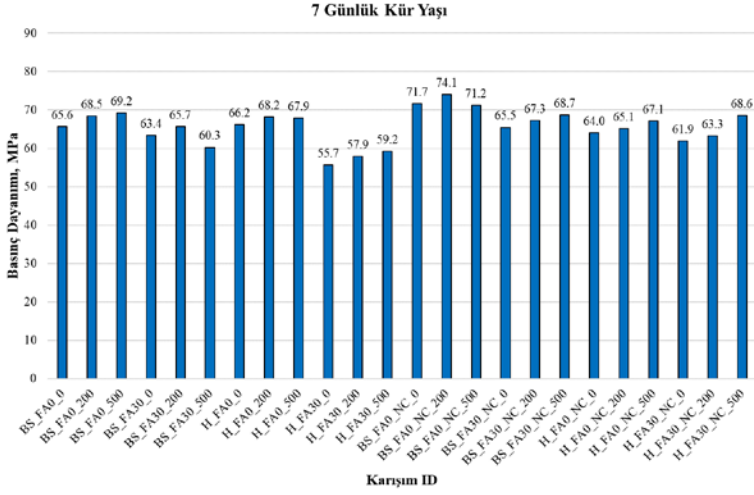
4.2. Sülfat Etkisi

Mevcut alt bölümde, ÇELK’lerde yüksek sıcaklık uygulamasından sonra üç günlük sülfat hücumu sonrası; basınç dayanımı, UPV ve Eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini araştıran deneysel sonuçlar ve bu bulguların analizi sunulmaktadır.

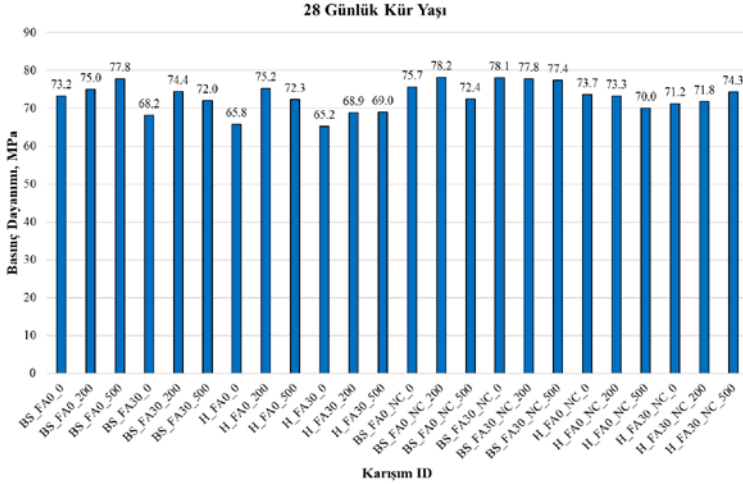
4.2.1. Basınç dayanımı

Tasarlanmış çimento esaslı lifli kompozitlerin 7, 28 ve 90 günlük kür yaşları sonrası yüksek sıcaklık

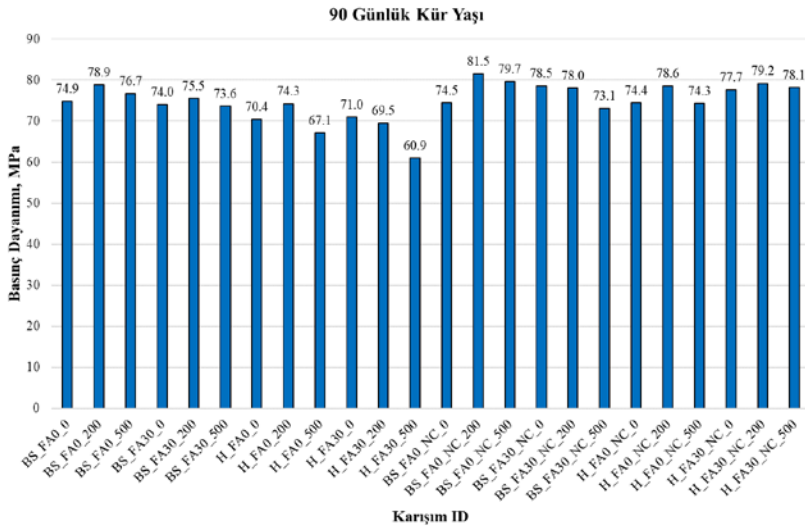
uygulamasından sonra üç günlük sülfat hücumu sonrası test edilen numunelerin basınç dayanımları ortalaması Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.10. 7 günlük kür yaşı basınç dayanımı değerleri.



Şekil 4.11. 28 günlük kür yaşı basınç dayanımı değerleri.



Şekil 4.12. 90 günlük kür yaşı basınç dayanımı değerleri.

Çimento esaslı kompozitlerin erken dönemde dayanım kazanımları ve mikro yapısal karakteristiği hidrasyon süreçlerinin ilerleyişi ile doğrudan ilişkilidir. Çimento tanecikleri ve su arasında gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar olan hidrasyon mekanizmasına bağlı olarak süreç sonunda iki temel ürün olan C-S-H jel yapısı ve CH (sönmüş kireç) meydana gelir. Şekil 4.10'da görüldüğü üzere, 7 günlük kür yaşı erken dönem olmasına rağmen yüksek bağlayıcı dozajı ve düşük su/bağlayıcı oranının bir neticesi olarak erken dönemde yüksek dayanım elde edilmiştir. İlgili kür yaşında mikro yapısal karakteristik gelişmeye devam ettiğinden dolayı karışım parametrelerine göre farklı dayanım değerleri elde

edilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinden dolayı hem 200°C hem de 500°C sıcaklık uygulamasından sonra meydana gelen mikro çatlaklardan matris içine geçen kür suyunun yarım kalan veya başlamamış hidrasyon reaksiyonlarını teşvik etmesiyle sıcaklık uygulanmış numunelerde, genel olarak, nispeten daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Genel olarak, çimento hamuru yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, mikro yapıyı oluşturan bileşenlere bağlı olarak çeşitli düzeylerde fiziko-kimyasal reaksiyonlar meydana gelir. Bağlı suyun buharlaşması, CH ve C-S-H'nin ayrışması sırasıyla yaklaşık 100, 500 ve 700°C'de gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonlar, çimento hamurunun mekanik özelliklerinin zarar görmesine neden olur (Luccioni ve ark., 2003; Pasztetnik ve Wróblewski, 2021; Türkmenve Fındık, 2013). Etrenjitte ayrışma, sıcaklık etkisi altında 50 ile 110 derece arasında meydana gelirken (Alhamad ve ark., 2022), çimento hamurundaki hasar özellikle 400°C derecenin üzerindeki sıcaklıklarda tespit edilir (Pasztetnik ve Wróblewski, 2021). Bu bilgiler göz önüne alındığında dayanıma katkı sağlayan temel hidrasyon ürünlerinden herhangi bir bozulma veya değişim meydana gelmediğinden ve özellikle yüksek sıcaklık sonrası numuneler susuz bir şekilde sülfat çözeltisine eklendiğinden dolayı mikro yapıya alınan

nemin de teşvikiyle hidrate olmamış çimento partikülleri de reaksiyon süreçlerine başlamıştır. Böylece, dayanımda artış elde edilmiştir. 7 günlük kür yaşına nispeten daha ileri düzeyde devam etmiş olan hidratasyon reaksiyonlarının bir neticesi olarak 28 ve 90 günlük kür yaşlarında ise daha yüksek ve daha kararlı bir dayanım değeri elde edilmiştir. Bir önceki bölümde yüksek sıcaklık etkisi nedeniyle detaylandırılan numunelerdeki basınç dayanımı değerleri ile sülfata maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları arasında kritik düzeyde bir fark tespit edilmemiş olup, bu durum sülfat hücumu için numunelerin kısıtlı üç günlük süre zarfında çözeltide bırakılmasındadır. İlk doksan günlük kür süreçlerine kadar (Lv ve ark., 2022) sülfatlı çözeltilerde bırakılan numunelerde bu sürelerle kadar dayanımda artış elde edilirken sonrasında ise farklı seviyelerde bir dayanım kaybı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla referans alınan sülfatlı süreç basınç dayanımını artıran düzeyde bir süreç olup, sülfat etkisinden dolayı sadece basınç dayanımı artışı elde edilmiştir denilebilir.

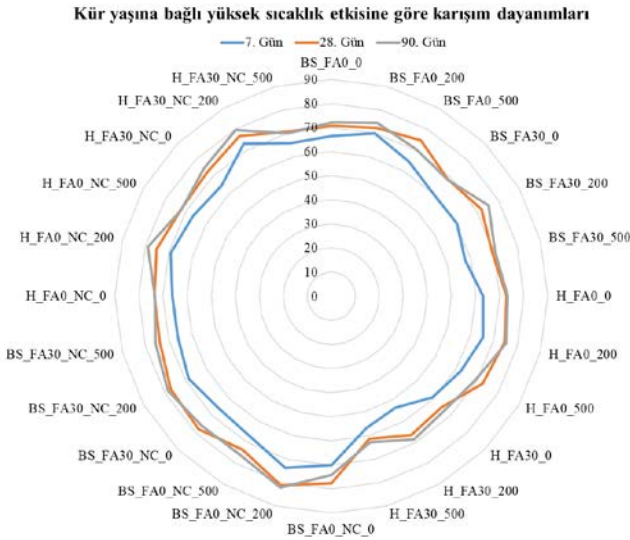
UK'lı sistemlerde, UK erken dönemde mikro yapısal gelişime kayda değer bir surette katkı sağlamamışken ileriki dönemlerde (28 ve 90 günlük kür yaşları) ise belirgin düzeyde dayanıma katkı sağlamıştır.

Bir önceki bölümde NC ve UK arasındaki sinerjinin bir benzerine bu şartlarda da rastlanılmış olup, UK ve NC içeren karışımlarda artan olağan ve ilave hidrasyon ürünlerindeki artış ve filler görevi de gören bu ürünlerin daha yoğun bir matris oluşturmasının bir sonucu olarak dayanım değerlerinde belirgin seviyede artışlar elde edilmiştir.

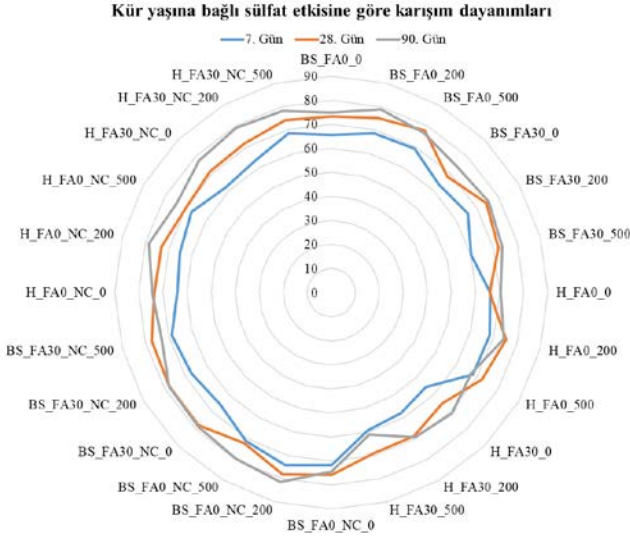
En düşük dayanım değerleri hibrit lif türlerinin kullanıldığı sistemlerde gözlemlenmiş olup, en yüksek değerler ise mikro çelik liflerin kullanıldığı karışımlar olarak tespit edilmiştir. Polimerik lifler kimyasal olarak reaktif olmamalarına rağmen, yüksek sıcaklıklarda eriyerek oluşturdukları mikro kanallar sülfatların çimento esaslı kompozitlerin içine daha kolay nüfuz etmesine yol açabilir. Nitekim kür yaşına bakılmaksızın, genel olarak, polimerik liflerin kullanıldığı sistemlerde ısı işlem görmemiş karışıma kıyasen en yüksek dayanım değerleri ısı işlem görmüş olan numunelerde elde edilmiştir. Bu durum, sıcaklık etkisi nedeniyle oluşan mikro kanallardan geçen sülfat iyonları veya normal suyun hidrasyon süreçlerine katkı sağlamalarıdır.

Hem yüksek sıcaklık hem de sülfat etkisi ile ilgili basınç dayanımı değerlendirmesi için paylaşılan verilerinden farklı olarak Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'te de

görüldüğü üzere, hem yüksek sıcaklık hem de sülfat etkilerine bağlı olarak şimdiye kadar paylaşılan veriler ve değerler dikkate alındığında yüksek bağlayıcı dozajı, düşük su/bağlayıcı oranı, boyutsal kararlılığı sağlayan liflerin varlığı ve mikro yapısal karakteristiği iyileştiren ve geliştiren UK mineral katkısı ve NC mineralinin toplam sinerjisinin bir neticesi olarak tasarlanan karışımlarda hem yüksek sıcaklık hem de sülfat etkisine karşı belirgin düzeyde bir iyileşmenin elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4.13. Kür yaşına bağlı yüksek sıcaklık etkisine göre karışım dayanımları.



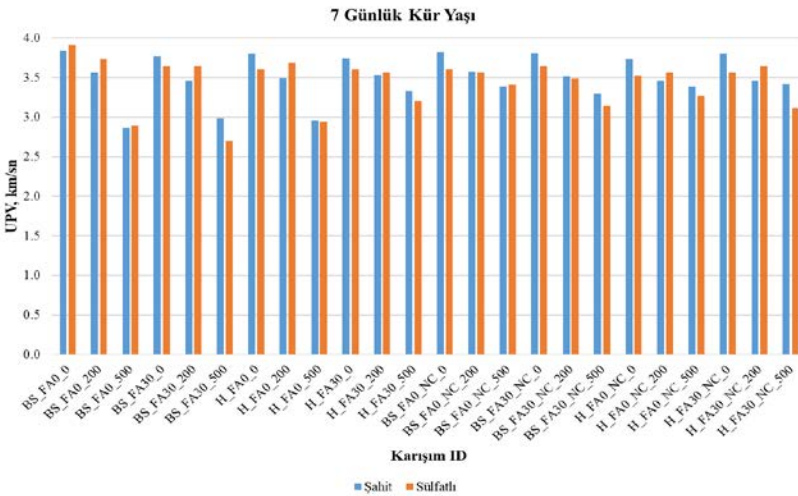
Şekil 4.14. Kür yaşına bağlı sülfat etkisine göre karışım dayanımları.

4.2.2. UPV değerleri

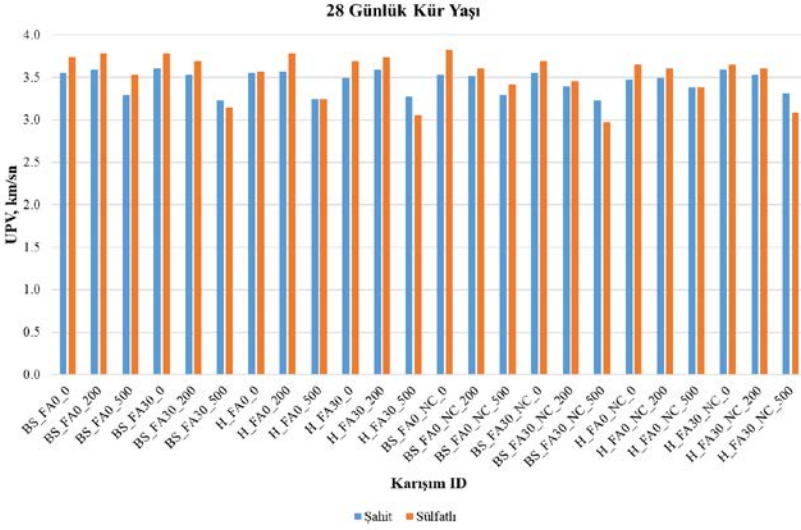
Mevcut çalışmanın alt bölümünde, sülfat etkisinin çimento esaslı lifli kompozitlerin mikro yapısal değişimleri üzerindeki etkisini incelemek amacıyla bir önceki bölümde paylaşılan yüksek sıcaklık parametresine ilave olarak mevcut bölümde de sülfat etkisinin farklı karışım parametrelerine bağlı olarak çimento esaslı lifli kompozitlerin mikro yapısal özellikleri üzerine olan etkisi değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında, sülfat maruziyetine tabi tutulan numunelerin 7, 28 ve 90 günlük kür yaşlarında UPV değerleri ölçülmüştür. Elde edilen veriler, önceki çalışmalarda tespit edilmiş bulgularla karşılaştırılarak değerlendirilmede bulunulmuş

ve çalışma kapsamında takip edilen metot ve yöntem esaslı sülfat etkisinin mikro yapısal değişimlere olan etkisi ve katkısı incelenmiştir.

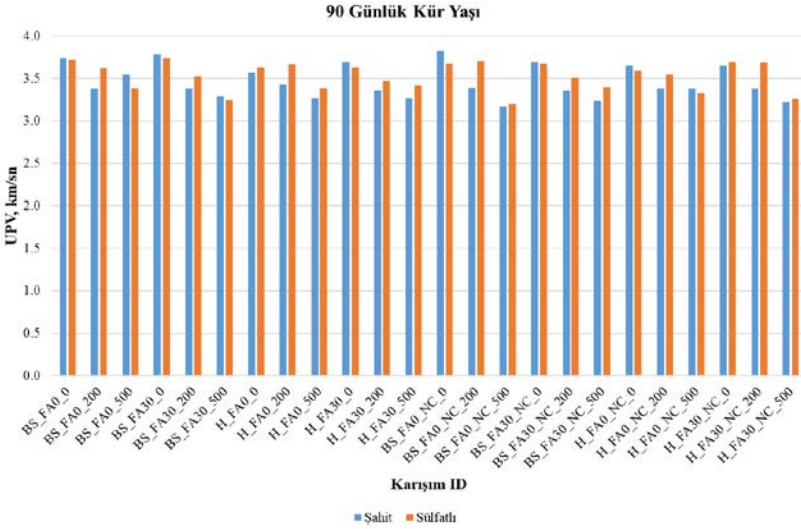
Benzer şekilde, Tablo 3.3'te verilen karışım parametreleri referans alınarak üretilen numuneler 7, 28 ve 90 günlük kür yaşlarının her birinde 200⁰C ve 500⁰C'lik bir sıcaklığa üç saat boyunca maruz bırakıldıktan sonra üç gün boyunca sülfatlı çözeltide bekletilen numunelerden UPV değerleri alınarak sülfat etkisinden dolayı karışım bazlı meydana gelen değişimler değerlendirilmiştir. 7, 28 ve 90 günlük kür yaşları için üç günlük sülfat etkisi sonrası numunelerde ölçülen UPV değerleri sırasıyla Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17'de verilmiştir.



Şekil 4.15. 7 günlük kür yaşı UPV değerleri.



Şekil 4.16. 28 Günlük Kür Yaşı UPV Değerleri



Şekil 4.17. 90 günlük kür yaşı UPV değerleri.

Şekillerde görüldüğü üzere, kür yaşına bakılmaksızın, her bir karışım için sülfat öncesi ve sonrası UPV değerleri birbirine çok yakın olup, ihmal düzeyinde

bir farklılık bulunmaktadır. Bir önceki bölümde de belirtildiği üzere 28 ve 90 günlük kür yaşlarına kıyasen 7 günlük kür yaşında hidrasyon reaksiyonları daha yüksek seviyede devam ettiğinden ve mikro yapısal kararlılık henüz sağlanmamış olduğundan dolayı karışım bazlı UPV değerleri arasındaki farklılık en fazla 7 günlük kür yaşında tespit edilmiştir. 28 ve 90 günlük kür yaşlarında ise nispeten daha yakın değerler gözlemlenmiş olmakla birlikte 7 ve 28 günlük kür yaşlarına kıyasen 90 günlük kür yaşında değerler nispeten daha stabil ve kararlı bir seviyeye ulaşmıştır. 7 günlük kür yaşında daha belirgin olmakla birlikte 28 ve 90 günlük yaşları da dahil tüm kür yaşlarında hem 200⁰C hem de 500 ⁰C'lik sıcaklık etkilerinden dolayı mikro yapıda meydana gelen farklı düzeylerdeki mikro yapısal kusurlardan dolayı UPV değerlerinde düşüş tespit edilmiştir. 500⁰C'lik sıcaklığa maruz kalan numunelerde, artan sıcaklığın etkisiyle meydana gelen daha büyük değişimler nedeniyle en düşük UPV değerleri bulunmuştur. Yalnız, UPV değerinde düşüş olarak meydana gelen bu değişim sülfat etkisinden dolayı olmamakla birlikte olağan sıcaklık etkisinden dolayıdır. Her ne kadar yüksek sıcaklık etkisinden dolayı numunelerin mikro yapısında farklı seviyelerde mikro yapısal hasarlar meydana gelmiş olsa

da yüksek sıcaklık sonrası sülfat etkisine üç gün boyunca maruz bırakılan numunelerde sülfat etkisi kaynaklı bir değişim tespit edilmemiştir. Özellikle devam eden hidratasyon reaksiyonlarından oluşan sönmüş kireç kaynaklı sülfat etkisinin erken dönem 7 günlük kür yaşında çok daha düşük olacağını da dolaylı olarak göstermektedir. Bu durumu teyid eder nitelikte literatürde yapılan bazı çalışmalar karışım parametreleri ve diğer koşullara da bağlı olarak ilk bir ay (Yuan ve ark., 2010) ve ilk dokuz ay (Lv ve ark., 2022) oluşan etrenjit ve diğer hidratasyon ürünlerinden dolayı sülfat etkisinin artış ile neticelendiğini göstermiştir. Bu ilk uzun dönemlerde mekanik dayanımlardaki artış, sülfat etkisinden dolayı oluşan yeni ürünlerin mikro çatlakları ve gözenekleri doldurarak çimento esaslı malzemelerin kompaktlığını arttırması olasılığına bağlanabilir. Şekillerde görüldüğü üzere, yüksek sıcaklık etkisi sonrası sülfat etkisine maruz bırakılan numunelerin 7 günlük kür yaşı için sıcaklık derecesine bağlı olarak farklılık net olmasına rağmen 28 ve 90 günlük kür yaşında nispeten daha kararlı bir hidratasyon süreci temin edildiğinden bu fark daha da azalmıştır.

Mineral katkı olarak çimento yerine ikame edilen F tipi UK, ilk iki hafta ile beş aylık süre zarfında puzolanik

reaksiyonlara katılarak C-S-H ve CH ilave hidratasyon ürünlerinin oluşumu ile neticelenen reaksiyonlar ile sonuçlandığından dolayı mikro yapısal iyileşmeye katkıda bulunmaktadır. Buradan yola çıkarak, karışım parametreleri fark etmeksizin, UK içeren karışımlarda erken dönemde puzolanik reaksiyonlar sonucu ek hidratasyon ürünleri oluşmadığı için mikro yapısal iyileşmede önemli bir ilerleme kaydedilememiştir. Bu nedenle, 7 günlük kür yaşında sülfat etkisinden öte sülfat öncesi uygulanan yüksek sıcaklıktan dolayı UPV değerlerinde sıcaklık artışıyla birlikte bir düşüş gözlemlenmiştir. Diğer yandan, 28 ve 90 günlük kür yaşlarında, puzolanik reaksiyonlar sonucunda artan hidratasyon ürünleri, özellikle sönmüş kireç varlığından dolayı, sülfat etkisinden dolayı etrenjit ve diğer formasyonların oluşmasıyla mikro yapıda belirgin iyileşmeler görülmüş ve sülfat etkisi nedeniyle daha yoğun bir matris elde edildiğinden UPV sonuçlarında okunan değerler daha yüksek tespit edilmiştir. 7 günlük kür yaşına kıyasen 28 ve 90 günlük kür yaşlarında UPV artışıyla neticelenen bu etkiyi daha net görebilmekteyiz. Ayrıca hem UK hem de NC'nin hibritlendiği sistemlerde, UK'daki alüminat fazı ile NC'nin karbonat bileşiklerinin kimyasal reaksiyonları sonucunda ek hidratasyon ürünü

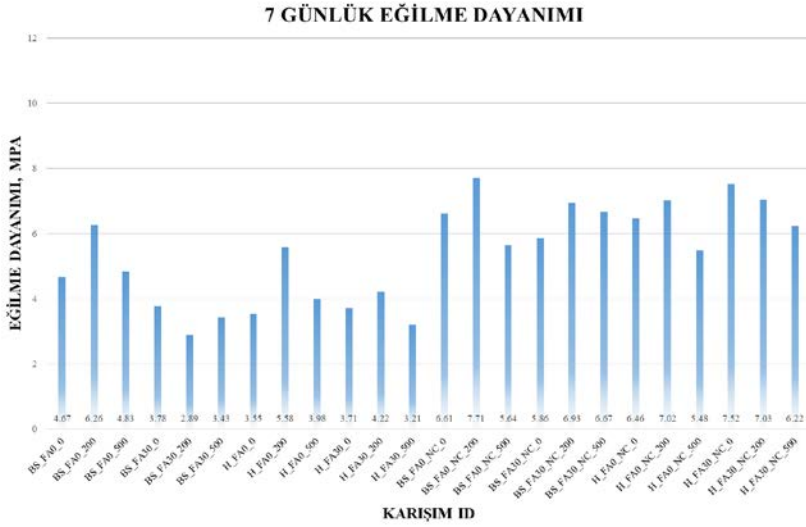
olan karboalüminatlar oluştuğundan, bu iki bileşenin bulunduğu karışımlarda mikro yapıda iyileşmeler gerçekleşmiş ve UPV değerlerinden kür yaşı artışıyla birlikte artış elde edilmiştir. Bir önceki bölümde de belirtildiği üzere, NC parçacıklarının varlığı, çekirdeklenme etkisiyle hidrasyon mekanizmasını hızlandırarak C-S-H oluşumunu teşvik ettiğinden UPV sonuçlarında 90 günlük kür yaşına doğru iyileşmeler gözlemlenmiştir.

Genel olarak, mikro çelik lifler, yüksek sıcaklıklara dayanıklılık sağlar ve çimento matrisine çekme dayanımı ekleyerek çatlak yayılmasını önlemekte olup, polipropilen lifler ise yaklaşık 160-170°C'de erimeye başlar ve daha yüksek sıcaklıklarda eriyerek matris içinde mikro kanallar oluşturur. Polipropilen liflerin kullanıldığı hibrit lifli karışımlarda eriyen polipropilen liflerin açtığı kanallar aracılığıyla daha fazla sülfat çözeltisinin matris içine girmesi ve kür yaşına bağlı olarak farklı etkiler oluşturması beklenirken UK ve NC gibi mineral katkıların kullanılması ve özellikle numune üretimlerinde çok düşük bir su/bağlayıcı oranı tercih edildiğinden dolayı sülfat solüsyonunun matris içine üç günlük süreçte çok az geçtiği ve/veya sınırlı bir etkiye sahip olduğunu söyleyebiliriz. Normal şartlar altında yüksek sıcaklık

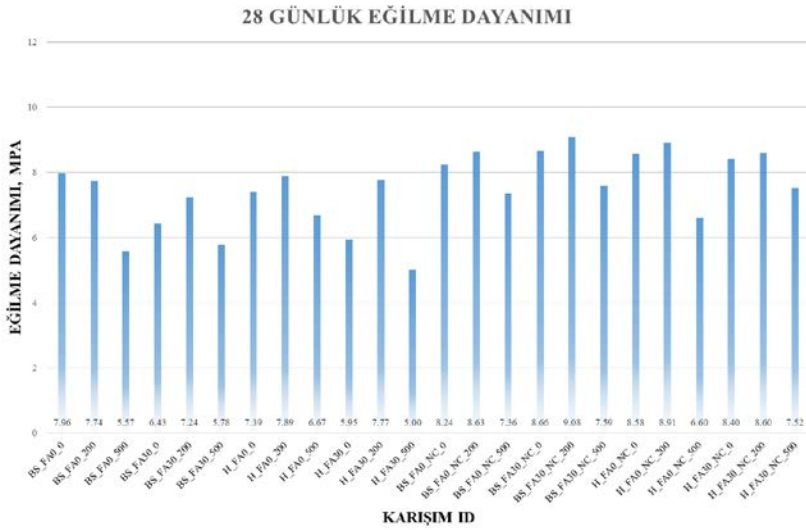
sonrası mikro yapısal hasar alan ve fırın kurusu olan çimento esaslı bir malzemeden çok yüksek oranda bir iyonik taşıma beklenmektedir. Yalnız, mevcut mikro yapısal yoğunluk nedeniyle karışımların boyutsal kararlılık sağladığı ve yüksek sıcaklık etkisi sonrası sülfat etkisinden dolayı göz ardı edilebilir seviyede bir değişim tespit edilmiştir. Bu bulgulara göre, kür yaşına bakılmaksızın, %0.3 oranında polipropilen lifinin kullanımıyla yapılan lif hibritlemesinde belirgin bir azalma gözlenmemiş ve genel olarak benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, lifler arasındaki sinerjiyi doğrulamaktadır.

4.2.3. Eğilme dayanımı

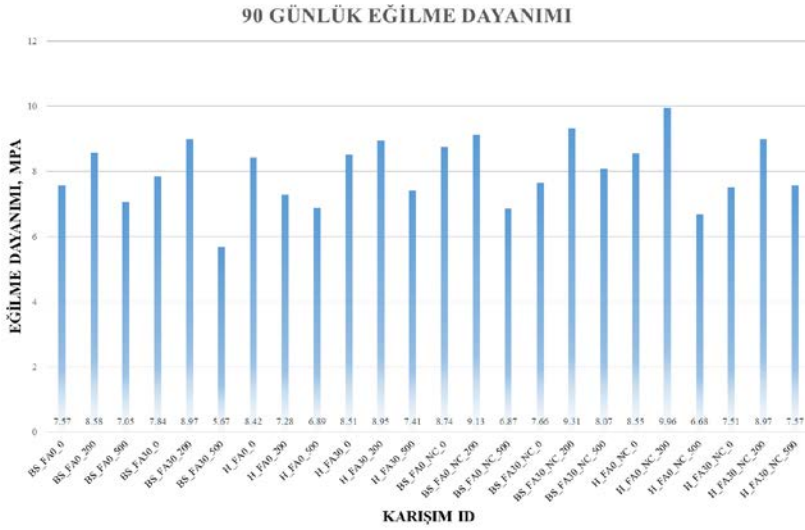
Bu çalışma kapsamında hedeflenen sonuçlara ulaşmak için pek çok karışım parametresine göre üretilmiş olan numuneler farklı sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra tüm numuneler üç günlük sülfat etkisine maruz bırakılmıştır. Sülfat etkisi sonrası 40x40x160 mm boyutlarında üretilen kiriş numuneleri üç noktalı eğilme dayanımı testine tabi tutulmuştur. Test sonrası elde edilen veriler 7, 28 ve 90 günlük kür yaşları için değerlendirilmiş olup, deney sonuçları Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.18. 7 günlük kür yaşı eğilme dayanımı değerleri.



Şekil 4.19. 28 günlük kür yaşı eğilme dayanımı değerleri.



Şekil 4.20.günlük kür yaşı eğilme dayanımı değerleri.

Kür yaşı dışındaki tüm parametreler sabit tutulduğunda numunelerin kür yaşı ile birlikte eğilme dayanımlarında artış elde edildiği tespit edilmiştir. Artış ile neticelenen bu durum daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere devam eden hidrasyon reaksiyonları sonucunda oluşan ürünlerin lif matris ara yüz özelliklerinde oluşturduğu kimyasal bağ/aderans ve/veya filler görevi gören veya reaksiyona girmeyen bileşenlerin fiziksel etkiden kaynaklı lif-matris arayüz özelliklerinde sağlamış olduğu ilave aderanstan kaynaklı olduğu söylenebilir. 7 günlük kür yaşı için numunelerin ara yüz özelliklerinde, 28 ve 90 günlük kür yaşlarına kıyasen, mikro yapısal gelişim devam ettiği için

numunelerin 28 ve 90 günlük kür yaşlarına kıyasen eğilme dayanımı değerlerinde daha düşük değerler elde edilmiştir. Her ne kadar 90 günlük kür yaşında en yüksek eğilme dayanımı elde edilmiş olsa da 28 günlük kür yaşında elde edilen sonuçlara çok yakın olduğu tespit edilmiş olup, bu durum yine daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere, numunelerin poşette kür edilmesi ve dolayısıyla nem eksikliği nedeniyle reaksiyona girmeyen bileşenlerin lif-matris ara yüz özelliklerine ön görülen düzeyde katkı sağlamamasına dayandırılabilir. Bunun bir netice olarak, en iyi mikro yapısal kararlılık 90 günlük kür yaşında elde edilirken nispeten daha düşük değerler ise sırasıyla 28 ve 7 günlük kür yaşlarında gözlemlenmiştir. Özellikle 7 günlük kür yaşında çok düşük lif-matris karakteristiği gelişmeyen mikro yapısal kararlılığın bir sonucu olduğundan dolayı, 7 günlük kür yaşında tüm karışımlarda sonuçlar birbirinden düzensiz ve farklı olarak elde edilirken, 28 ve 90 günlük kür yaşlarında nispeten birbirine daha yakın ve daha kararlı bir mikro yapı elde edilmiş ve bu durum daha yüksek ve birbirine daha yakın eğilme dayanımları ile neticelenmiştir.

Sülfat etkisine maruz bırakılan numunelerin sülfat etkisi öncesi bir kısmı laboratuvar sıcaklığında bekletilirken diğer iki kısmı ise 200°C ve 500°C'lik

sıcaklığa maruz bırakılmıştı. Kür yaşına ve diğer karışım parametrelerine bakılmaksızın 500°C'lik sıcaklığın lif-matris ara yüz özelliklerini olumsuz etkilediği ve 200°C'lik sıcaklık ise artan ilave hidratasyon ürünlerinin bir sonucu olarak lif-matris arasındaki kimyasal aderansı artırdığı için eğilme dayanımında, genel olarak, en yüksek sonuçlar elde edilmiştir.

UK mineral katkı olarak kullanılması lif matris ara yüz özelliklerine iki yönden katkı sağlamaktadır. Birincisi ve en önemlisidir ki puzolanik reaksiyonlarla ilave hidratasyon ürünü oluşturup kimyasal aderansa katkı sağlarken, reaksiyona girmeyen bileşenler ise lif-matris ara yüz özelliklerine fiziksel katkı sağlayarak kenetlenmeye katkı sağladığından dolayı erken dönemden ziyade ileriki dönemde lif-matris ara yüz özelliklerine katkı sağladığı gözlemlenmiştir. UK'nın eğilme performansına olan katkısını 28 ve 90 günlük kür yaşlarında belirgin bir şekilde görebilmekteyiz. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere, NC gibi kireçtaşı formasyonları hem çimento hem de mineral katkıdaki alüminat fazı ile reaksiyona girerek ilave hidratasyon ürünü olan karboalüminatlar ile neticelenmektedir. Böylece, kimyasal aderansa katkı sağlarken, reaksiyona girmeyen NC mineralleri ise lif-matris ara yüz

özelliklerine fiziksel olarak katkı sağlamaktadır. Bu durumun bir neticesi olarak, tüm kür yaşlarında NC'nin münferit veya UK ile hibritlendiği karışımlarda daha yüksek eğilme dayanımları elde edilmiştir.

Yukarıda belirtilen karışım parametrelerine ilave olarak lif türünün etkisi de incelenmiş olup, şekillerde görüldüğü üzere liflerin farklı seviyelerde eğilme performansına katkı sağladığı tespit edilmiştir. Etki eden sıcaklığa bakılmaksızın en iyi eğilme performansı çelik lifli karışımlarda elde edilmiş olup, hibrit lif kullanımında ise eğilme performansında kısmi bir düşüşün olduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak, sıcaklık artışı ile birlikte polimerik lif olan polipropilen lifi erirken çelik lifler ise mikro yapısal bağ direncinde kararlılığını koruduğundan dolayı çelik lifli karışımların eğilme performansı daha yüksek elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu başlık altında, test sonuçları Yüksek Sıcaklık Etkisi ve Sülfat Etkisi alt başlıklarında ayrı ayrı yorumlanmıştır. Ayrıca ileriki akademik çalışmalar ve endüstriyel uygulamalar için öneriler sunulmuştur.

5.1. Sonuçlar

Sonuçlar bölümü Yüksek Sıcaklık Etkisi ve Sülfat Etkisi olmak üzere iki alt başlıkta değerlendirilecektir.

5.1.1. Yüksek sıcaklık etkisi

- ✓ 7 günlük kür yaşında, hidrasyon devam ettiği için mikro yapısal oluşum olağan özellikler itibariyle tam olarak gerçekleşmemiş olup, bu sürecin erken evrelerinde mikro yapıdaki boşluklar ve çatlaklar tamamen doldurulamamıştır. 28 ve 90 günlük kür yaşlarında, daha kararlı bir mikro yapısal oluşum gözlemlenmiş olup, basınç dayanımı değerleri belirgin şekilde artmıştır.
- ✓ Farklı sıcaklık seviyelerinde (200°C ve 500°C) yapılan testler, yüksek sıcaklığın çimento esaslı malzemelerin mikro yapısında ve mekanik

özelliklerinde önemli değişimlere neden olduğunu göstermiştir. Genel olarak, 200°C sıcaklıkta malzemelerin hidratasyon mekanizmasının arttığı ve mikro yapısal gelişimin teşvik edildiği gözlemlenmiştir. Öte yandan 500°C sıcaklıkta ise, malzemelerde daha fazla mikro yapısal hasar meydana gelmiş olup, basınç dayanımı değerlerinde düşüşler gözlemlenmiştir.

- ✓ Mikro çelik ve polipropilen liflerin çimento esaslı kompozitlerde münferit veya birlikte kullanımı, farklı sıcaklıklarda basınç dayanımına farklı katkılar sağlamıştır. Mikro çelik lifler genel olarak çatlak kontrolü sağlayıp performansa katkı sağlarken, hibrit lif kullanımında ise, çelik ve polipripilen lifler arasındaki sinerjik etki ile çelik liften düşük ama kısmi bir dayanım azalması ile optimum dayanımı sağlarken, yüksek sıcaklıklarda daha dengeli bir performans sunmuştur.
- ✓ UK, erken dönemde (7 gün) dayanım üzerinde önemli bir etki göstermemiş olup, ilerleyen kür yaşlarında (28 ve 90 gün) dayanımı artırmıştır. Yüksek sıcaklık etkisi altında UK'nın puzolanik reaksiyonları teşvik edilmiş ve oluşan ilave

hidratasyon ürünleri ile basınç dayanımına katkı sağlanmıştır.

- ✓ NC'nin hem fiziksel hem de kimyasal özelliklerinden dolayı mikro yapısal performans artırıcı katkı sağlamış olup, çimento esaslı kompozitlerin basınç dayanımını genel olarak artırmıştır. Öte yandan, NC ve UK'nın birlikte kullanıldığı sistemlerde, daha yoğun bir matris oluşumu ve yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Tüm kür yaşlarında, NC kullanılan karışımlarda daha kararlı ve yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir.
- ✓ Kür yaşına bakılmaksızın, şahit numunelerin UPV değerleri birbirine oldukça yakındır. Ancak 7 günlük kür yaşında devam eden hidratasyon reaksiyonları nedeniyle UPV değerleri arasında daha belirgin farklılıklar tespit edilmiştir. 28 ve 90 günlük kür yaşlarında, daha kararlı ve homojen bir mikro yapı oluşmuş olup, UPV değerleri daha yakın seviyelerde gözlemlenmiştir.
- ✓ Hem 200°C hem de 500°C sıcaklık etkisinden dolayı mikro yapıda meydana gelen kusurlar nedeniyle UPV değerlerinde düşüşler tespit edilmiştir. 500°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde en düşük

UPV değerleri tespit edilmiş olup, su/bağlayıcı oranının düşük olması ve tüm karışımlarda farklı kombinasyonlarla liflerin kullanımı sayesinde bu azalma sınırlı seviyede kalmıştır.

- ✓ Yüksek sıcaklıklarda, çimento esaslı malzemelerdeki suyun buharlaşması sonucu oluşan dahili buhar basıncı, mikro çatlakların oluşmasına ve mevcut çatlakların genişlemesine neden olarak malzemenin mekanik dayanıklılığını olumsuz etkilemiştir.
- ✓ Erken dönemde (7 gün) UK içeren karışımlarda puzolanik reaksiyonların henüz tamamlanmamış olması nedeniyle mikro yapısal iyileşmede kayda değer bir katkı sağlanmamıştır. 28 ve 90 günlük kür yaşlarında, UK'nın puzolanik reaksiyonları nedeniyle artan hidrasyon ürünleri mikro yapıda iyileşmeler ile neticelenmiş olup, UPV değerlerinde daha az düşüşler gözlemlenmiştir.
- ✓ UK ve NC'nin birlikte kullanıldığı karışımlarda oluşan ilave hidrasyon ürünleri, mikro yapısal iyileşmelerle neticelenmiş olup, sıcaklık etkisi altında UPV değerlerinde nispeten daha düşük azalışlar gözlemlenmiştir.

- ✓ NC, çimento esaslı kompozitlerin mikro yapısal gelişimini teşvik etmiş ve basınç dayanımını artırmıştır.
- ✓ Mikro çelik ve polipropilen liflerin birlikte kullanılması, çimento esaslı kompozitlerin yüksek sıcaklıklara karşı performansını artırmıştır. Mikro çelik lifler, yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılık ve çekme dayanımı sağlayarak çatlak yayılmasını önlemiş ve kompozitin mekanik dayanımını artırmıştır. Hibrit lifin kullanıldığı karışımlarda ise mekanik özelliklerin korunması sağlanmış ve çatlak direnci optimize edilmiştir.
- ✓ 500°C sıcaklığa maruz kalan numunelerde, mikro yapısal değişim ve lif-matris ara yüz özelliklerinin olumsuz etkilenmesi nedeniyle eğilme dayanımında düşüş gözlemlenmiştir. 200°C sıcaklığa kadar olan ısı işlem gören numunelerde, hidrasyon reaksiyonlarının teşviki nedeniyle daha yüksek eğilme dayanımları elde edilmiştir.
- ✓ 7 günlük kür yaşında daha düzensiz bir değişim gözlemlenirken, 28 ve 90 günlük kür yaşlarında eğilme dayanımı değerleri birbirine oldukça yakın bulunmuştur.

- ✓ Tüm lif türlerinde, yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında eğilme dayanımında belirgin bir azalma göstermiştir.
- ✓ UK ve NC, genel olarak, lif-matris ara yüz özelliklerini iyileştirerek eğilme dayanımında artış sağlamıştır. UK, hem puzolanik reaksiyonlarla ilave hidrasyon ürünü oluşturarak hem de filler görevi görerek lif-matris ara yüz özelliklerini iyileştirmiştir.
- ✓ NC, hem filler görevi görmüş hem de karboalüminatlar gibi ilave hidrasyon ürünleri oluşturarak kimyasal aderansı artırmıştır.
- ✓ Hem UK hem de NC'nin kullanıldığı sistemlerde, özellikle 28 ve 90 günlük kür yaşlarında, daha yüksek ve kararlı eğilme dayanımı değerleri elde edilmiştir.

5.1.2.Sülfat etkisi

- ✓ Sülfat etkisi uzun vadede etkisini daha belirgin bir şekilde gösteren bir dayanıklılık problemi olup, mevcut çalışmada referans alınan üç günlük sülfat etkisi sonrası yıpratıcı düzeyde bir değişim, genel olarak, tespit edilmemiştir.

- ✓ Numuneler 500°C'ye kadar farklı sıcaklık seviyelerine bırakıldıktan sonra sülfat etkisine maruz bırakılmasına rağmen çimento esaslı sistemde hem lif kullanılması hem de düşük su/bağlayıcı oranının tasarımda referans alınması nedeniyle sülfattan dolayı yıpratıcı bir değişim tespit edilmemiştir.
- ✓ Sülfat etkisi öncesi yüksek sıcaklık uygulandığından dolayı mikro çatlaklar oluşmuş olup, bu çatlaklar aracılığıyla sülfat bazlı kür suyunun içeri girmesi ve hidrate olmamış çimento partiküllerinin reaksiyona girmesiyle, sıcaklığın uygulandığı numunelerde genel olarak daha yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir.
- ✓ Sülfat hücumuna maruz kalan numunelerde, sülfat çözeltisinin mikro yapıya nüfuz etmesiyle ilave hidratasyon reaksiyonları teşvik edilmiş ve dayanımda artış sağlanmıştır.
- ✓ Üç günlük sülfat hücumu süresince, yüksek sıcaklık sonrası sülfat çözeltisine maruz kalan numunelerde basınç dayanımı artışı gözlemlenmiş, ancak bu artış kritik düzeyde bir fark oluşturmamıştır. Bu durum, 7 günlük kür yaşında sülfat hücumu sonrası dayanım artışı daha belirgin iken, 28 ve 90 günlük

kür yaşlarında sülfat hücumunun etkisi sınırlı kalmıştır.

- ✓ UK, erken dönemde mikro yapısal gelişime kayda değer katkı sağlamazken, 28 ve 90 günlük kür yaşlarında belirgin düzeyde dayanıma katkı sağlamıştır.
- ✓ NC ve UK içeren karışımlarda, artan hidrasyon ürünleri ve filler etkisiyle daha yoğun bir matris oluşmuş ve bu da dayanım değerlerinde belirgin artışlar sağlamıştır.
- ✓ Polimerik lifler, yüksek sıcaklıklarda eriyerek oluşturdukları mikro kanallar aracılığıyla sülfatların çimento esaslı kompozitlerin içine daha kolay nüfuz etmesine yol açmış, bu da sülfat hücumu sonrası dayanım artışına katkı sağlamıştır.
- ✓ 7, 28 ve 90 günlük kür yaşlarında ölçülen UPV değerleri, sülfat etkisinin mikro yapısal özellikler üzerinde önemli bir değişim yaratmadığını göstermiştir.
- ✓ Numunelerin 500°C'lik sıcaklığa maruz bırakılması sonrası üç gün süfatlı çözeltide bekletilmesiyle elde edilen veriler, sülfat öncesi ve sonrası UPV değerlerinin birbirine çok yakın olduğunu ve

sıcaklık etkisinin daha belirgin olduğunu ortaya koymuştur.

- ✓ 7 günlük kür yaşında hidrasyon reaksiyonları daha aktif olduğundan, sülfat ve yüksek sıcaklık etkisiyle mikro yapısal değişiklikler daha belirgin olmuştur. 28 ve 90 günlük kür yaşlarında ise mikro yapısal kararlılık artmış ve UPV değerleri daha stabil hale gelmiştir.
- ✓ UK ve NC gibi mineral katkılar, puzolanik reaksiyonlarla mikro yapısal iyileşmelere katkıda bulunmuştur. Özellikle 28 ve 90 günlük kür yaşlarında, bu katkılar sayesinde mikro yapı daha kompakt hale gelmiş ve UPV değerlerinde artış gözlemlenmiştir.
- ✓ Kür yaşı arttıkça numunelerin eğilme dayanımlarında belirgin bir artış tespit edilmiştir. Bu artış, devam eden hidrasyon reaksiyonları sonucu oluşan ürünlerin lif-matris ara yüz özelliklerinde sağladığı kimyasal bağ ve fiziksel katkılardan kaynaklanmaktadır. 7 günlük kür yaşında düşük, 28 ve 90 günlük kür yaşlarında ise yüksek eğilme dayanımları elde edilmiştir.
- ✓ Sülfat etkisine maruz bırakılan numunelerde, 500°C'lik sıcaklık lif-matris ara yüz özelliklerini

olumsuz etkilerken, 200°C'lik sıcaklık artan hidrasyon ürünlerinin bir sonucu olarak eğilme dayanımını artırmıştır. En yüksek eğilme dayanımı, 200°C'lik sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde gözlemlenmiştir.

- ✓ UK, puzolanik reaksiyonlarla ilave hidrasyon ürünleri oluşturarak ve reaksiyona girmeyen bileşenler sayesinde lif-matris ara yüz özelliklerine fiziksel katkı sağlayarak eğilme dayanımını artırmıştır. Bu etki, özellikle 28 ve 90 günlük kür yaşlarında belirgin hale gelmiştir. NC ise kimyasal ve fiziksel katkılarıyla tüm kür yaşlarında eğilme dayanımını artırmıştır.
- ✓ Çelik liflerin kullanıldığı karışımlar, tüm sıcaklık koşullarında en yüksek eğilme dayanımını göstermiştir. Polipropilen liflerin kullanıldığı hibrit lifli karışımlarda ise, polipropilen liflerin erimesi sonucu eğilme dayanımında kısmi bir düşüş gözlemlenmiştir.

5.2. Öneriler

Öneriler bölümü, sonuçlar bölümünde değerlendirildiği şekliyle *Yüksek Sıcaklık Etkisi* ve *Sülfat Etkisi* olmak üzere iki alt başlıkta değerlendirilecektir.

5.2.1.Yüksek sıcaklık etkisi

- ✓ Yüksek sıcaklık etkisi altında hem boyutsal kararlılığın sağlanması hem de toplam mekanik özelliklerin minimum düzeyde etkilenmesini sağlamak için yüksek sıcaklık potansiyeline sahip uygulamalarda özellikle hibrit lif kullanımının tercih edilmesi tavsiye edilmektedir.
- ✓ Hem UK hem de NC gibi mineral katkılar hem mikro yapısal kararlılığı teşvik ettiklerinden hem de fiziksel/kimyasal etkilerle basınç ve eğilme dayanımlarını iyileştirdiklerinden dolayı bu iki mineralin çimento esaslı sistemlerde kullanımlarının teşvik edilmesi önerilmektedir. Özellikle UK'nın, uzun vadede basınç dayanımını artırdığı göz önünde bulundurularak, çimento esaslı kompozitlerde kullanımının teşvik edilmesi önerilir.
- ✓ Çimento esaslı kompozitlerin mikro yapısal gelişimini teşvik etmek için, uygun karışım parametrelerinin ve katkı maddelerinin kullanılması önemlidir.
- ✓ NC, hem mikro yapı gelişimini hem de eğilme dayanımını artırdığı için önemli bir bileşen olarak değerlendirilmelidir. Ayrıca, NC, lif-matris ara yüz

özelliklerini de iyileştirerek eğilme dayanımını da artırdığı için çimento esaslı malzemelerin üretiminde önemli bir bileşen olarak değerlendirilmelidir.

5.2.2.Sülfat etkisi

- ✓ Yüksek sıcaklık ve sülfat etkisinin ikili olduğu koşullarda mikro yapının yoğun tasarlanması ve liflerin kullanılması toplam performansı artırdığı için bu tür dayanıklılık problemlerinin olduğu sistemlerde kullanılması önerilmektedir.
- ✓ Polimerik liflerin kullanımı, yüksek sıcaklık sonrası oluşabilecek sülfat hücumunun etkilerini *erken dönemde* azaltabilir ve mikro kanallar aracılığıyla ilave hidrasyon reaksiyonlarını teşvik edebilir.
- ✓ UK ve NC'nin birlikte kullanımı, çimento esaslı kompozitlerde münferit ve ikili etkili dayanıklılık problemlerinde toplam performans artışını sağlamak için ideal bir kombinasyon olarak değerlendirilmelidir.
- ✓ Çimento esaslı kompozitlerin lif-matris ara yüz özelliklerini iyileştirmek için mineral katkıları ve nano malzemeler kullanılması önerilir.

KAYNAKLAR

- Abdun-Nur, E. A. (1961) "Fly Ash in Concrete: An Evulation", *Highway Research Board Bulletin*, No.28, 138 s, Washington D.C.
- ACI Committee 116 (ACI 116R-00), (2005). Cement and Concrete Terminology: American Concrete Institute
- Akbulut, Z. F., Guler, S., Osmanoglu, F., Kivanç, M. R., & Khan, M. (2024). Evaluating sustainable colored mortars reinforced with fly ash: a comprehensive study on physical and mechanical properties under high-temperature exposure. *Buildings*, 14(2), 453.
- Akeed, M. H., Qaidi, S., Ahmed, H. U., Faraj, R. H., Mohammed, A. S., Emad, W., ... & Azevedo, A. R. (2022). Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. Part IV: Durability properties, cost assessment, applications, and challenges. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01271.
- Al Ghali, A. E., El Ezz, N. E., Hamad, B., Assaad, J., & Yehya, A. (2023). Comparative study on shear strength and life cycle assessment of reinforced concrete beams containing different types of fibers. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02497.
- Alhamad, A., Yehia, S., Lublóy, É., & Elchalakani, M. (2022). Performance of Different Concrete Types Exposed to Elevated Temperatures: A Review. *Materials*, 15(14), 5032.

- Alhozaimy, A. M. (2009). Effect of absorption of limestone aggregates on strength and slump loss of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31(7), 470-473.
- Ali, B., Qureshi, L. A., & Kurda, R. (2020). Environmental and economic benefits of steel, glass, and polypropylene fiber reinforced cement composite application in jointed plain concrete pavement. *Composites Communications*, 22, 100437.
- Ali, M., Elsayed, M., Tayeh, B. A., Maglad, A. M., & El-Azim, A. A. (2024). Effect of hybrid steel, polypropylene, polyvinyl alcohol, and jute fibers on the properties of ultra-high performance fiber reinforced concrete exposed to elevated temperature. *Structural Concrete*, 25(1), 492-505.
- Amin, M. S., Selim, F. A., Ramadan, M., Mohsen, A., Abu-Dief, A. M., Ahmed, H. A., & Hashem, F. S. (2024). Evaluation of mechanical performance, corrosion behavior, texture characterization and aggressive attack of OPC-FMK blended cement pastes modified with micro Titania. *Construction and Building Materials*, 416, 135261.
- Ayawanna, J., & Poowancum, A. (2024). Enhancing flexural strength of metakaolin-based geopolymer reinforced with different types of fibers. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 37, 101439.
- Aydoğan, O. G., Akca, A. H., Bilici, S., Öztürk, H., Dilber, A. A., & Özyurt, N. (2024). Microstructural examination of black seawater mixed sulfate-resistant cement concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(1), 04023502.

- Bhat, R., Han, T., Sant, G., Neithalath, N., & Kumar, A. (2024). A comprehensive analysis of hydration kinetics and compressive strength development of fly ash-Portland cement binders. *Journal of Building Engineering*, 88, 109191.
- Blazy, J., & Blazy, R. (2021). Polypropylene fiber reinforced concrete and its application in creating architectural forms of public spaces. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00549.
- Cao, M., Ming, X., He, K., Li, L., & Shen, S. (2019). Effect of macro-, micro-and nano-calcium carbonate on properties of cementitious composites – A review. *Materials*, 12(5), 781.
- Chen, M., Yang, F., Zhang, T., & Zhou, L. (2024a). Effect of elevated temperatures on behaviour of recycled steel and polypropylene fibre reinforced ultra-high performance concrete under dynamic splitting tension. *Journal of Building Engineering*, 84, 108586.
- Chen, W., Liu, Y., & Yan, P. (2024b). Effect of temperature rising inhibitor on the early hydration of blended cements containing fly ash and ground granulated blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 417, 135165.
- Chin, C. S., & Xiao, R. Y. (2012). Experimental and nonlinear finite element analysis of fiber-cementitious matrix bond-slip mechanism. In *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6: HPFRCC 6*, Dordrecht: Springer Netherlands, 145-152.

- Das, D. K., & Tiwary, A. K. (2024, June). Mechanical and durability properties of concrete containing nano mineral admixtures: A review. *In AIP Conference Proceedings* (Vol. 3100, No. 1). AIP Publishing.
- Demir Şahin, D., & Eker, H. (2024). Effects of Ultrafine Fly Ash against Sulphate Reaction in Concrete Structures. *Materials*, 17(6), 1442.
- 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. (2022). Effect of different nanosized limestone formations on fiber-matrix interface properties of engineered cementitious composites. *Structural Concrete*, 23(3), 1890-1906.
- Demirhan, S. (2017). Nano malzemeler ile modifiye edilmiş yüksek performanslı hibrid lif donatılı betonlar (Doctoral dissertation, Doktora tezi), *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, Türkiye.
- Demirhan, S., Yıldırım, G., Banyhussan, Q. S., Koca, K., Anıl, Ö., Erdem, R. T., & Şahmaran, M. (2020). Impact behaviour of nanomodified deflection-hardening fibre-reinforced concretes. *Magazine of Concrete Research*, 72(17), 865-887.
- Dong, D., Huang, Y., Pei, Y., Zhang, X., Cui, N., Zhao, P., ... & Lu, L. (2023a). Effect of spherical silica fume and fly ash on the rheological property, fluidity, setting time, compressive strength, water resistance and drying shrinkage of magnesium ammonium

- phosphate cement. *Journal of Building Engineering*, 63, 105484.
- Dong, Y., Liu, Y., & Hu, C. (2023b). Towards greener ultra-high performance concrete based on highly-efficient utilization of calcined clay and limestone powder. *Journal of Building Engineering*, 66, 105836.
- Duran-Herrera, A., Campos-Dimas, J. K., Valdez-Tamez, P. L., & Bentz, D. P. (2016). Effect of a micro-copolymer addition on the thermal conductivity of fly ash mortars. *Journal of building physics*, 40(1), 3-16.
- Eid, N., Zaid, W., & GÜNAL, A. Y. (2024). Strengthening Concrete Characteristics through Fiber Additives: A Comprehensive Review. *International Journal of Innovative Research in Engineering and Management*, 11(3), 49-59.
- Erdem, T. K., Demirhan, S., Yıldırım, G., Banyhussan, Q. S., Şahin, O., Balav, M. H., & Şahmaran, M. (2020). Effects of mixture design parameters on the mechanical behavior of high-performance fiber-reinforced concretes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(12), 04020368.
- Farhan, K. Z., Megat, A. M. J., & Demirboğa, R. (2023). Performance of polypropylene fiber reinforced GGBFS-based alkali activated composites under sulfate and freeze-thaw conditions. *Materials and Structures*, 56(2), 44.
- Gamage, N., Patrisia, Y., Gunasekara, C., Law, D. W., Houshyar, S., & Setunge, S. (2024). Shrinkage induced crack control of concrete integrating synthetic textile and natural cellulosic fibres:

- Comparative review analysis. *Construction and Building Materials*, 427, 136275.
- Gao, D., Zhao, L., & Chen, G. (2018). Flexural behavior of fiber and nanoparticle reinforced concrete at high temperatures. *Fire and Materials*, 42(7), 725-740.
- Garces-Vargas, J. F., Díaz-Cardenas, Y., & Martirena Hernandez, J. F. (2024). Evaluation of the Durability of Concrete with the Use of Calcined Clays and Limestone in Salinas, Ecuador. *Minerals*, 14(5), 460.
- Gebbru, K. A., Kidanemariam, T. G., & Gebretinsae, H. K. (2021). Bio-cement production using microbially induced calcite precipitation (MICP) method: A review. *Chemical Engineering Science*, 238, 116610.
- Gencel, O., Brostow, W., Datashvili, T., & Thedford, M. (2011). Workability and mechanical performance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete with fly ash. *Composite interfaces*, 18(2), 169-184.
- Gollakota, A. R., Volli, V., & Shu, C. M. (2019). Progressive utilisation prospects of coal fly ash: A review. *Science of the Total Environment*, 672, 951-989.
- Gözkeser, M. Y.,(2024). Yüksek sıcaklığa maruz kalan çimento esaslı lifli kompozitlerin temel mühendislik özellikleri,Yüksek Lisans Tezi,Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Batman, 20-28.
- Hamed, Y. R., Elshikh, M. M. Y., Elshami, A. A., Matthana, M. H., & Youssf, O. (2024). Mechanical properties of fly ash and silica fume based geopolymer concrete made with magnetized water activator. *Construction and Building Materials*, 411, 134376.

- Han, T., Wang, H., Jin, X., Yang, J., Lei, Y., Yang, F., ... & Liu, L. (2015). Multiscale carbon nanosphere-carbon fiber reinforcement for cement-based composites with enhanced high-temperature resistance. *Journal of Materials Science*, 50, 2038-2048.
- Hossain, M. T., Shahid, M. A., Mahmud, N., Habib, A., Rana, M. M., Khan, S. A., & Hossain, M. D. (2024). Research and application of polypropylene: a review. *Discover Nano*, 19(1), 2.
- Hou, W., Zhang, Q., Zhuang, Z., & Zhang, Y. (2024). Sustainable reusing marble powder and granite powder in cement-based materials: a review. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12(7), 2484-2510.
- Jiang, H., Zhang, H., Zhang, X., Zhang, J., & Jiang, Y. (2024). Experimental study on the influence of content and fineness of fly ash on the mechanical properties of grouting slurries. *Deep Underground Science and Engineering*.
- Jin, H., Zheng, C., Liu, J., Zhu, J., Liu, W., Xing, F., & Tang, L. (2024b). Effects of limestone calcined clay, fly ash and seawater on early hydrating behavior, mechanical properties, microscopic performance and sustainability of eco-friendly cement-based pastes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149(5), 2087-2107.
- Jin, J., Liu, T., Li, M., Qin, Z., Chen, Y., Liu, Q., ... & Zuo, S. (2024a). Influence of biomass fly ash on durability of self-consolidating cement-tailings grout: resistance to freeze-thaw cycles and sulfate attack. *Journal of Building Engineering*, 109842.

- Ju, Y., Zhang, H., Wang, D., Kong, X., Ma, Y., Zhang, X., & Bai, J. (2024). Effect of mineral admixtures on the resistance to sulfate attack of reactive powder concrete. *Journal of Cleaner Production*, 440, 140769.
- Karasin, A., Hadzima-Nyarko, M., Işık, E., Doğruyol, M., Karasin, I. B., & Czarnecki, S. (2022). The effect of basalt aggregates and mineral admixtures on the mechanical properties of concrete exposed to sulphate attacks. *Materials*, 15(4), 1581.
- Khan, M. S., & Abbas, H. (2015). Effect of elevated temperature on the behavior of high volume fly ash concrete. *KSCE journal of civil engineering*, 19, 1825-1831.
- Khoshkbijari, R. K., Farahmandfar, A., Zehni, N. Z., & Samimi, M. F. (2024). Properties of ground granulated blast-furnace slag-based geopolymer mortars containing glass powder, feldspar, and metakaolin under different curing conditions. *Construction and Building Materials*, 435, 136753.
- Krishna, D. A., Priyadarsini, R. S., & Narayanan, S. (2019). Effect of elevated temperatures on the mechanical properties of concrete. *Procedia Structural Integrity*, 14, 384-394.
- Li, L., Feng, T., Li, Y., Zhang, Y., Sun, W., & Liu, Z. (2024a). Evaluating the effect of high fly ash content and low curing temperature on early hydration heat of blended cement based on isothermal calorimetric method. *Construction and Building Materials*, 430, 136110.

- Li, L., Wang, Z., Wu, J., Du, X., Wang, H., & Liu, W. (2024d). Comparative analysis of dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced concrete under ambient temperature and after exposure to high temperatures. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02778.
- Li, Q., Ren, Z., Su, X., Feng, Y., Xu, T., Zheng, Z., ... & Li, P. (2024e). Improving sulfate and chloride resistance in eco-friendly marine concrete: Alkali-activated slag system with mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 411, 134333.
- Li, X., & Cao, M. (2024). Recent Developments on the Effects of Micro-and Nano-Limestone on the Hydration Process, Products, and Kinetics of Cement. *Materials*, 17(9), 2133.
- Li, Y., Xu, W., Zhu, J., & Yang, L. (2024b). Effect of fly ash content on the performance of hardened cement-based materials suffered from high temperatures. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e03217.
- Li, Y., Yang, E. H., & Tan, K. H. (2020). Flexural behavior of ultra-high performance hybrid fiber reinforced concrete at the ambient and elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 250, 118487.
- Li, Y., Zuo, M., Deng, Q., Lin, Y., Mai, Z., Lin, S., ... & Li, W. (2024c). Temperature-dependent strength modeling of fiber-reinforced composites considering critical properties evolution. *International Journal of Mechanical Sciences*, 272, 109168.
- Liu, Y., Wang, L., Cao, K., & Sun, L. (2021). Review on the Durability of Polypropylene Fibre-Reinforced

- Concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1), 6652077.
- Luccioni, B. M., Figueroa, M. I., & Danesi, R. F. (2003). Thermo-mechanic model for concrete exposed to elevated temperatures. *Engineering structures*, 25(6), 729-742.
- Ly, X., Yang, L., Li, J., & Wang, F. (2022). Roles of fly ash, granulated blast-furnace slag, and silica fume in long-term resistance to external sulfate attacks at atmospheric temperature. *Cement and Concrete Composites*, 133, 104696.
- Machello, C., Bazli, M., Santos, J., Rajabipour, A., Arashpour, M., & Hassanli, R. (2024). Tensile strength retention of fibre-reinforced polymer composites exposed to elevated temperatures: A meta-analysis review. *Construction and Building Materials*, 438, 137150.
- Malhotra, S., Kanoungo, A., & Goyal, A. (2024). Influence of Metal, Glass, Synthetic and Natural Fibers on Fiber-Reinforced Concrete–A Review. *Latest Trends in Engineering and Technology*, 451-462.
- Manzoor, T., Bhat, J. A., & Shah, A. H. (2024). Performance of geopolymer concrete at elevated temperature– A critical review. *Construction and Building Materials*, 420, 135578.
- Medjigbodo, G., Rozière, E., Charrier, K., Izoret, L., & Loukili, A. (2018). Hydration, shrinkage, and durability of ternary binders containing Portland cement, limestone filler and metakaolin. *Construction and Building Materials*, 183, 114-126.

- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. (2013). *Concrete, 4th Ed.*, McGraw-Hill, New York.
- Mohamed, O. A., Najm, O., & Zuaiter, H. A. (2024). Setting time, sulfuric acid resistance, and strength development of alkali-activated mortar with slag & fly ash binders. *Results in Engineering*, 21, 101711.
- Monkman, S., Sargam, Y., & Raki, L. (2022). Comparing the effects of in-situ nano-calcite development and ex-situ nano-calcite addition on cement hydration. *Construction and Building Materials*, 321, 126369.
- Muñoz Pérez, S. P., Santisteban Purizaca, J. F., Castillo Matute, S. M., García Chumacero, J. M., Sánchez Diaz, E., Diaz Ortiz, E. A., ... & Briceño Mendoza, Y. M. (2024). Glass fiber reinforced concrete: overview of mechanical and microstructural analysis. *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(4), 116.
- Ni, Z., Yu, G., Chen, Y., Xue, B., Deng, Y., Ma, W., ... & Song, Y. (2024). Experimental and numerical analysis of CMCs mechanical properties under high-temperature thermal gradient environment. *Ceramics International*, 50(4), 7132-7149.
- Pasztetnik, M., & Wróblewski, R. (2021). A literature review of concrete ability to sustain strength after fire exposure based on the heat accumulation factor. *Materials*, 14(16), 4719.
- Qin, Y., Liu, J., Xu, C., Dang, F., Zhou, H., & Shi, L. (2023). Experimental study and evaluation of bonding properties between fiber and cement matrix under sulfate attack. *Journal of Building Engineering*, 76, 107306.

- Ren, J.,& Lai, Y. (2021). Study on the durability and failure mechanism of concrete modified with nanoparticles and polypropylene fiber under freeze-thaw cycles and sulfate attack. *Cold Regions Science and Technology*, 188, 103301.
- Richardson, A.,& Heather, M. (2013). Improving the performance of concrete using 3D fibres. *Procedia Engineering*, 51, 101-109.
- Rojas-Martínez, A. E., González-López, J. R., Guerra-Cossío, M. A., & Hernández-Carrillo, G. (2024). Sulphate-based activation of a binary and ternary hybrid cement with portland cement and different pozzolans. *Construction and Building Materials*, 421, 135683.
- Saha, A., Tonmoy, T. M., Sobuz, M. H. R., Aditto, F. S., & Mansour, W. (2024). Assessment of mechanical, durability and microstructural performance of sulphate-resisting cement concrete over portland cement in the presence of salinity. *Construction and Building Materials*, 420, 135527.
- Sajid, H. U.,& Kiran, R. (2024). Effect of fiber reinforcement, mineral admixtures, and air entrainment on the fire performance of concrete in bridges: A review. *Construction and Building Materials*, 430, 136420.
- Sato, T.,& Diallo, F. (2010). Seeding effect of nano- CaCO_3 on the hydration of tricalcium silicate. *Transportation Research Record*, 2141(1), 61-67.

- Sikora, P., Abd Elrahman, M., & Stephan, D. (2018). The influence of nanomaterials on the thermal resistance of cement-based composites – a review. *Nanomaterials*, 8(7), 465.
- Singh, R., Haq, M., & Khan, R. A. (2024). Influence of industrial waste and mineral admixtures on durability and sustainability of high-performance concrete. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(17), 25567-25588.
- Sobuz, M. H. R., Datta, S. D., & Akid, A. S. M. (2023). Investigating the combined effect of aggregate size and sulphate attack on producing sustainable recycled aggregate concrete. *Australian Journal of Civil Engineering*, 21(2), 224-239.
- Solanki, A., Singh, L. P., Karade, S. R., & Sharma, U. (2023). A Review of C3A Hydration with Admixtures and Its Role in Sulfate Attack. *Advances in Civil Engineering Materials*, 12(1), 58-77.
- Sonar, K., & Sathe, S. (2024). Exploring fiber reinforcements in concrete and its challenges: a comprehensive review. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 1-33.
- Tangüler, M., & Yaman, İ. Ö. (2018). Calcium Sulfoaluminate Cement: State of the Art Review, *Çimento ve Beton Dünyası*, 132.
- Thomas, B. S., Dimitriadis, P., Kundu, C., Vuppaladadiyam, S. S. V., Raman, R. S., & Bhattacharya, S. (2024). Extraction and Separation of Rare Earth Elements from coal and coal fly ash: A review on fundamental understanding and on-going

- engineering advancements. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 112769.
- Tokyay, M.,& Erdoğan, K. (1998). Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, TÇMB AR-GE/Y 98.3, Ağustos.
- TS EN 197-1, (2012). Genel çimentolar. Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Kabul Tarihi: 21.02.2012
- Tu, W., Fang, G., Dong, B., Hu, Y., & Zhang, M. (2024). Behaviour of alkali-activated fly ash-slag paste at elevated temperatures: An experimental study. *Cement and Concrete Composites*, 147, 105438.
- Tunçkaya, Y. (2020). Bir Termik Enerji Santralinde Ana Buhar Sıcaklığı Parametresinin YSA ve ARIMA Yöntemleriyle Modellenmesi ve Kestirim Performanslarının Araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(2), 237-249.
- Turker, K.,& Torun, I. B. (2020). Flexural performance of highly reinforced composite beams with ultra-high performance fiber reinforced concrete layer. *Engineering Structures*, 219, 110722.
- Türkmen, İ.,& Findık, S. B. (2013). Several properties of mineral admixed lightweight mortars at elevated temperatures. *Fire and materials*, 37(5), 337-349.
- Uysal, M.,& Sumer, M. (2011). Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. *Construction and Building materials*, 25(11), 4112-4120.

- Van Der Heijden, G. H. A., Van Bijnen, R. M. W., Pel, L., & Huinink, H. P. (2007). Moisture transport in heated concrete, as studied by NMR, and its consequences for fire spalling. *Cement and concrete research*, 37(6), 894-901.
- Vance, K., Aguayo, M., Oey, T., Sant, G., & Neithalath, N. (2013). Hydration and strength development in ternary portland cement blends containing limestone and fly ash or metakaolin. *Cement and Concrete Composites*, 39, 93-103.
- Villaquirán-Cacedo, M. A., & de Gutiérrez, R. M. (2021). Comparison of different activators for alkaline activation of construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials*, 281, 122599.
- Wang, D., Zhang, Y., Liu, C., & Liu, Z. (2024a). A mechanistic model of the degradation of cement-based materials subjected to sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 421, 135654.
- Wang, L., & Lu, X. (2024). A review of the influence of aluminum phases from cement, SCMs and external aluminum phases on the thaumasite sulfate attack in cement-based materials. *Journal of Building Engineering*, 94, 109966.
- Wang, X. Y. (2018). Analysis of hydration and strength optimization of cement-fly ash-limestone ternary blended concrete. *Construction and Building Materials*, 166, 130-140.
- Wang, Y., Liu, F., Xu, L., & Zhao, H. (2019). Effect of elevated temperatures and cooling methods on strength of concrete made with coarse and fine

- recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 210, 540-547.
- Wang, Y., Qiao, P., Sun, J., & Chen, A. (2024b). Influence of fibers on tensile behavior of ultra-high performance concrete: a review. *Construction and Building Materials*, 430, 136432.
- Wang, Y., Shao, X., Cao, J., Zhao, X., & Qiu, M. (2021b). Static and fatigue flexural performance of ultra-high performance fiber reinforced concrete slabs. *Engineering Structures*, 231, 111728.
- Wang, W., Shen, A., Lyu, Z., He, Z., & Nguyen, K. T. (2021a). Fresh and rheological characteristics of fiber reinforced concrete-A review. *Construction and Building Materials*, 296, 123734.
- Wei, J., Teng, L., & Khayat, K. H. (2024). Coupled effect of fiber type and reinforcement ratio on flexural behavior of reinforced beams cast with super workable concrete. *Construction and Building Materials*, 438, 137039.
- Wu, Z., Shi, C., Khayat, K. H., & Wan, S. (2016). Effects of different nanomaterials on hardening and performance of ultra-high strength concrete (UHSC). *Cem. Concr. Compos.* 70, 24-34.
- Xie, L., Sun, X., Yu, Z., Lian, H., He, H., Wang, L., ... & Xu, X. (2024). Effects of nano-silica on fracture properties and mechanism analysis of basalt fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 439, 137375.

- Yadav, H., Kumar, S., & Rai, B. (2024). Durability and fire resistance of high-performance fiber reinforced concrete with fly ash. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 9(1), 2262249.
- Yahya, Z., Razak, R. A., & Muhammad, K. (2024, April). A review on the concrete durability exposed to different wet-dry cycles conditions. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2799, No. 1). AIP Publishing.
- Yan, J., Zhu, Z., Liu, R., Chen, M., Shao, C., Zhang, C., & Li, X. (2024b). A multi-perspective study on the influence of physical and chemical properties of 5 types of fly ash on the performance of high-volume blended fly ash cementitious slurry. *Construction and Building Materials*, 411, 134301.
- Yan, S., Dong, Q., Chen, X., Li, J., Wang, X., & Shi, B. (2024a). An experimental and numerical study on the hybrid effect of basalt fiber and polypropylene fiber on the impact toughness of fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 411, 134270.
- Yang, H., Liu, C., Yang, D., Zhang, H., & Xi, Z. (2009). Comparative study of cytotoxicity, oxidative stress and genotoxicity induced by four typical nanomaterials: the role of particle size, shape and composition. *Journal of applied Toxicology*, 29(1), 69-78.
- Yang, J., Zhang, Y., & Huang, J. (2024). The strengthening theory of steel fiber reinforced concrete and its application in tunnel engineering: A review. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 19, 155892.
- Yang, Z., Zhang, W., Zhu, H., Chen, Y., Xu, L., Wang, P., & Lai, Y. (2023). Thaumasite form of sulfate attack in

- ettringite rich-ternary systems: Effects of limestone filler, etching solutions and exposure temperature. *Developments in the Built Environment*, 15, 100208.
- Yao, Z. T., Ji, X. S., Sarker, P. K., Tang, J. H., Ge, L. Q., Xia, M. S., & Xi, Y. Q. (2015). A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-science reviews*, 141, 105-121.
- Ye, G., Liu, X., De Schutter, G., Poppe, A. M., & Taerwe, L. (2007). Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 29(2), 94-102.
- Yeşilmen, S., Al-Najjar, Y., Balav, M. H., Şahmaran, M., Yıldırım, G., & Lachemi, M. (2015). Nano-modification to improve the ductility of cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, 76, 170-179.
- Yin, G. J., Wen, X. D., Miao, L., Cui, D., Zuo, X. B., & Tang, Y. J. (2023). A Review on the Transport-Chemo-Mechanical Behavior in Concrete under External Sulfate Attack. *Coatings*, 13(1), 174.
- Yu, Y., Zhang, C., Xie, X., Yousefi, A. M., Zhang, G., Li, J., & Samali, B. (2023). Compressive strength evaluation of cement-based materials in sulphate environment using optimized deep learning technology. *Developments in the Built Environment*, 16, 100298.
- Yuan, X., Li, B., Cui, G., Zhao, S., & Zhou, M. (2010). Effect of fly ash and early strength agent on durability of concrete exposed to the cyclic sulfate environment. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 25, 1065-1069.

- Yun, H. D., Park, W. S., Jang, Y. I., & Kim, S. W. (2024). Prediction of the heat of hydration of fly ash concrete by adiabatic temperature rise test and regression analysis. *Magazine of Concrete Research*, 1-24.
- Yön, M. Ş., & Karataş, M. (2024). Resistance to magnesium sulphate attack of binary and ternary cementless self-compacting alkali-activated mortar. *Journal of Building Engineering*, 109988.
- Zaid, O., Althoey, F., Abuhussain, M. A., & Alashker, Y. (2024). Spalling behavior and performance of ultra-high-performance concrete subjected to elevated temperature: A review. *Construction and Building Materials*, 411, 134489.
- Zhang, J., Guan, Y., Fan, C., Cao, G., & Liu, J. (2024). Experimental and theoretical investigations on the damage evolution of the basalt fiber reinforced concrete under freeze-thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 422, 135703.
- Zhang, P., Yang, Y., Wang, J., Hu, S., Jiao, M., & Ling, Y. (2020). Mechanical properties and durability of polypropylene and steel fiber-reinforced recycled aggregates concrete (FRRAC): A review. *Sustainability*, 12(22), 9509.
- Zhang, W., Min, H., Gu, X., Xi, Y., & Xing, Y. (2015). Mesoscale model for thermal conductivity of concrete. *Construction and Building Materials*, 98, 8-16.
- Zhao, C., Wang, Z., Zhu, Z., Guo, Q., Wu, X., & Zhao, R. (2023). Research on different types of fiber reinforced

concrete in recent years: An overview. *Construction and Building Materials*, 365, 130075.

YÜKSEK SICAKLIK VE SÜLFAT ETKİSİNDE ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLER

yaz
yayınları

YAZ Yayınları

M.İhtisas OSB Mah. 4A Cad. No:3/3

İscehisar / AFYONKARAHİSAR

Tel : (0 531) 880 92 99

yazyayinlari@gmail.com • www.yazyayinlari.com

ISBN: 978-625-5838-45-2



9

786255

838452