



Effect of design parameters on cement-based fiber reinforced composites exposed to elevated temperature

Serhat Demirhan^{1*}, Muhammed Yusuf Gözkaser¹, Berfin Ramazanoğlu¹, Necim Kaya²

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Batman University, 72060, Batman, Türkiye

²Department of Construction, Technical Sciences Vocational School, Batman University, 72060, Batman, Türkiye

Highlights:

- Cement-based fiber reinforced composite under high temperature
- Effect of design parameters
- Different curing regimes

Keywords:

- Compressive strength
- Ultrasonic pulse velocity
- Scanning electron microscopy
- High temperature
- Curing regime

Article Info:

Research Article

Received: 11.11.2023

Accepted: 09.02.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1389629

Acknowledgement:

The current research was financially supported by the Scientific Research Projects Division of Batman University (BTÜBAP) with the project ID of BTÜBAP-2022-YL-17. Financial support of BTÜBAP is gratefully acknowledged

Correspondence:

Author: Serhat Demirhan

e-mail:

serhat.demirhan@batman.edu.tr

phone: +90 488 217 4173

Graphical/Tabular Abstract

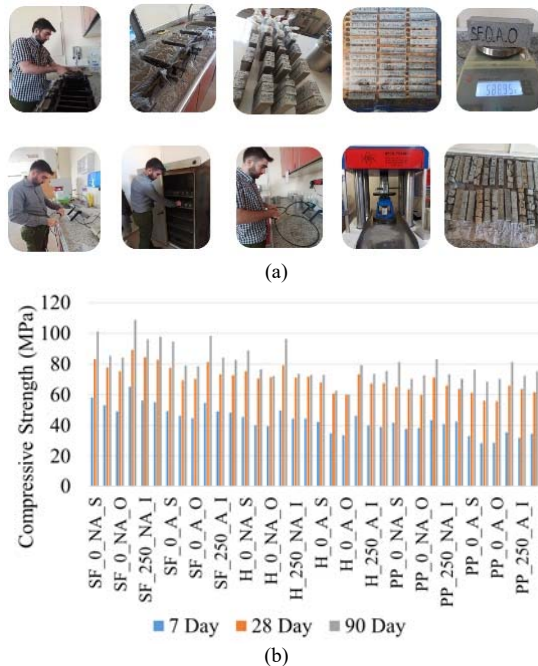


Figure A. (a) Work flow and (b) 7-, 28- and 90-day test results of curing regimes

Purpose: The main goal of current experimental research involves the examination of the effect of mixture design parameters (fiber type and air-entrained admixture), curing regimes (water-curing, air-curing and impermeable-bag-curing) in the case of both surrounding temperatures of 25 °C and 250 °C.

Theory and Methods: Thirty-six different cement-based fiber reinforced composites mixtures throughout which temperature, fiber type, curing regime and air-entrained admixture were taken into account as a design parameter (Figure A-a). Compressive strength, ultrasonic pulse velocity and SEM analysis were conducted by considering 7, 28 and 90 days of curing ages.

Results: It was revealed from the experimental test results that better residual mechanical and microstructural properties were obtained in the utilization of steel fiber comparing to polypropylene fiber while air-entrained admixture improved whole performance properties of the composites (Figure A-b). It was also observed that water-curing regime contributed the microstructural development up to 250 °C.

Conclusion: Regardless of all parameters, it has been determined that microstructural stability was achieved up to 250°C. In water-cured mixtures, an increase in compressive strength was observed after exposure to 250 °C, and the highest increase was detected at the curing age of 7 days. The results of the samples cured in an impermeable-bag and cured in air were determined to be close to each other. Samples cured in the bags were found to be slightly higher than those cured in air. Higher residual compressive strength was observed in brass-coated steel fibers, and this was followed by hybrid mixtures. The utilization of air entraining admixtures contributed to dimensional and microstructural stability.



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi

Journal of The Faculty of Engineering
and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Yüksek sıcaklığa maruz kalan çimento esaslı lifli kompozitlerde karışım parametrelerinin mühendislik özelliklerine olan etkisi

Serhat Demirhan^{1*}, Muhammed Yusuf Gözkeser¹, Berfin Ramazanoğlu¹, Necim Kaya²

¹Batman Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 72060, Batman, Türkiye

²Batman Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, 72060, Batman, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Yüksek sıcaklıkta lifli kompozitlerin mühendislik özellikleri
- Hibrit liflerin basınç dayanımı ve dayanıklılığa etkisi
- Kür rejimleri ve katkıların mekanik özelliklere etkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 11.11.2023

Kabul: 09.02.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1389629

Anahtar Kelimeler:

Basınç dayanımı,
ultrases dalgası geçiş hızı,
taramalı electron
mikroskopu,
yüksek sıcaklık, kür rejimi

ÖZ

Yüksek sıcaklık etkisi altında karışım parametrelerine bağlı olarak çimento esaslı lif donatılı kompozitlerin temel mühendislik özelliklerinin incelenmesi mevcut çalışmanın temel amacını teşkil etmektedir. Bu amaç doğrultusunda, 36 farklı karışım tasarlanmıştır. Bu karışımlarda pirinç kaplı çelik lif ve polipropilen lifi kullanılmıştır. Üretilen numuneler, su, hava ve poşette kür olmak üzere üç farklı kür rejiminde test yaşına kadar bekletilmiştir. 7, 28 ve 90 günlük kür yaşları için numuneler 250 °C sıcaklığa maruz bırakılıp, öncesi ve sonrası şartlar için mikroyapısal özelliklere ilave olarak basınç dayanımı ve ultrases dalgası geçiş hızı gibi temel mühendislik özellikleri incelenmiştir. Tasarımda, tüm karışımlar için hava sürükleyici katkı oranı, su/bağlayıcı oranı ve agrega/bağlayıcı oranı sırasıyla %0,6, 0,3 ve 1,5 olarak sabit seçilmiştir. Deney sonuçları, polipropilen liflerin çimento esaslı matrislerde kullanılmasının, yüksek sıcaklık etkisi altında basınç dayanımı gibi temel mekanik özellikleri üzerine çok az bir etkiye sahip olduğunu ve polipropilen liflere kıyasen çelik lif kullanımında artık mekanik özelliklerin geliştiğini göstermiştir. Hibrit lif kullanılarak üretilen numunelerin performans özellikleri, PP lif içeren lif donatılı kompozitlere göre daha yüksek dayanım ve dayanıklılık sergilerken, pirinç kaplı çelik lif içeren numunelere kıyasla daha düşük performans göstermiştir.

Effect of design parameters on cement-based fiber reinforced composites exposed to elevated temperature

H I G H L I G H T S

- Engineering properties of fiber composites at high temperatures
- Effect of hybrid fibers on compressive strength and durability
- Impact of curing regimes and admixtures on mechanical properties

Article Info

Research Article

Received: 11.11.2023

Accepted: 09.02.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1389629

Keywords:

Compressive strength,
ultrasonic pulse velocity,
scanning electron
microscopy,
high temperature,
curing regime

ABSTRACT

The primary aim of this study is to investigate the fundamental engineering properties of cement-based fiber-reinforced composites under high temperature conditions, based on the mixing parameters. For this purpose, 36 different mixtures were formulated using brass-coated steel fiber and polypropylene fiber. The prepared samples were subjected to three different curing regimes: water curing, air curing, and impermeable bag curing until the specified testing ages. At curing ages of 7, 28, and 90 days, the samples were exposed to 250 °C, and their basic engineering properties, including compressive strength and ultrasonic pulse velocity, were examined before and after exposure. The mix design maintained constant ratios for air-entraining admixture (0.6%), water to binder (0.3), and aggregate to binder (1.5) across all mixtures. Experimental findings revealed that the use of polypropylene fiber in cementitious matrices had minimal impact on fundamental mechanical properties such as compressive strength under high temperature conditions. In contrast, the use of steel fibers significantly improved residual mechanical properties. Samples produced with hybrid fibers demonstrated superior strength and durability compared to those with PP fibers, but showed lower performance compared to those with brass-coated steel fibers.

1. Giriş (Introduction)

Beton, yüksek basınç dayanımı ve dayanıklılığı ile bilinen ve yaygın olarak kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Bununla birlikte, geleneksel beton, sınırlı çekme dayanımı ve gevrek bir davranış sergiler. Bu karakteristik, onu belirli koşullar altında, özellikle yangın etkisi gibi yıpratıcı çevresel koşullara maruz kaldığında çatlamaya ve kırılmaya karşı daha hassas hale getirir. Betonun birçok farklı türü vardır ve bunların tümü benzersiz mekanik özelliklere sahiptir. Bu beton türlerinin her biri, yüksek sıcaklığa maruz kaldığında dayanım, çatlama, dağılma ve dayanıklılık açısından farklı seviyelerde bir davranış sergilemektedir [1]. Geleneksel beton, doğası gereği zayıf yönleriyle daha fazla karşımıza çıkmaktadır. Bu eksiklikleri gidermek ve çok yıpratıcı bir dayanıklılık problemi olan yangın gibi yıpratıcı eğilimli ortamlarda betonun performansını artırmak için, lif donatılı beton (LDB) umut verici bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. LDB, yeterli bir çekme dayanımı sağlamak ve yüksek sıcaklıklara maruz kalma sırasında malzemenin çatlama ve dağılmaya karşı direncini artırmak için beton matrisi içine homojen olarak dağılmış birbirinden ayrıntı liflerin eklenmesiyle üretilmektedir. Literatürden, beton gibi çimento esaslı malzeme karışımındaki bileşenlerin değiştirilmesinin, yüksek sıcaklıklara karşı farklı bir davranışa yol açacağı aşikardır [2-4]. Bunun nedeni, karışımlardaki çeşitliliğin, soğutma yöntemlerinin, ısıtma hızlarının ve yeni malzemelerin bu çeşitleri ele almak için birçok zorluk getirmesidir. Çimento esaslı malzemelerin yüksek sıcaklıklara karşı direnci, kullanılan çimento, agrega türü, yüksek sıcaklık seviyesi ve süresi, yapı elemanı boyut ve geometrisi ve nem içeriği gibi pek çok faktöre bağlıdır [5, 6]. Bunların dışında dört önemli değişken, araştırmacıların ve mühendislerin büyük ilgisini çekmiştir. Bunlar, sıcaklık derecesi, lif tipi, hava sürükleyici katkı ve kür rejimleridir. Bu parametrelerin her birinin etkisini anlamak, pratik uygulamalarda LDBnin yangın performansını optimize etmek için çok önemlidir. Yüksek sıcaklık, çimento esaslı yapı elemanlarının yapısal güvenliği için ciddi bir tehdit unsurudur. Yüksek sıcaklığa maruz kalan çimento esaslı malzemelerin hem dayanımı hem de dayanıklılığı itibarıyla performansında farklı seviyelerde azalma gözlemlenir. Bu nedenle, yangına maruz kaldıktan sonra çimento esaslı bir matrisin dayanıklılık performansının düşmesi kaçınılmazdır. Yüksek sıcaklığa maruz kalma, çimento esaslı yapı malzemelerinin fiziksel, mekanik ve durabilite performansını geri dönüşü olmayan olumsuz bir şekilde etkiler. Agrega türü, beton katkı maddeleri çimento esaslı malzemelerin yangın performansını tahmin edilemeyecek şekilde etkilemekte olup, bu parametreler pek çok araştırmacı tarafından geniş yelpazede incelenmiştir [7]. Yüksek sıcaklıklarda, nem içeriğindeki değişiklikler, bileşenlerin kimyasal ve fiziksel değişimleri, ısıtma ve soğutma rejimlerindeki değişiklikler, agrega türü ve su bağlayıcı oranı nedeniyle betonun özellikleri değişebilir. Dolayısıyla, betonun yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılığı ve yapı elemanının mikro yapısal durumuna göre içindeki sıcaklık yayılımı, (a) bileşenlerin hem termal hem de mekanik özelliklerine ve (b) betonun heterojenliğine ve kompaktlığına bağlıdır. Buna binaen, yüksek sıcaklığa maruz kalan çimento esaslı malzemelerin performansının hem farklı karışım parametrelerine hem de kür koşulları gibi mikroyapısal karakteristiği etkileyen şartlara göre incelenmesi büyük önem arz etmektedir [8]. Çelik, polipropilen (PP), cam ve doğal lifler gibi farklı lif türleri LDBnin mekanik özelliklerini ve yangın direncini geliştirmek için kullanılmıştır. Her lif tipi, yüksek sıcaklık koşullarında LDBnin davranışını etkileyebilen erime noktası, narinlik oranı ve termal iletkenlik gibi farklı özelliklere sahiptir [9]. Çeşitli lif türlerinin betonun yangın performansı üzerindeki etkisinin araştırılması, belirli uygulamalar için en uygun liflerin belirlenmesi açısından önemlidir. Hibrit lif donatılı çimento esaslı kompozitlerin yangın direnci, lif türü ve fiziksel özellikleri, lif dozajı ve beton

karışım tasarımları dahil olmak üzere çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Buna binaen, çelik lif (SF) ve PP lifin sinerjistik çalışmasına odaklanarak karışım bileşenlerine bağlı farklı parametrelere göre araştırmalar artırılmalıdır [10]. Bir veya daha çok dayanıklılık problemine maruz kalan betonun artık dayanımı ile ilgili deneysel araştırmalar kapsamlı olarak yapılmış olmasına rağmen, çok fazlı kompozit bir malzeme olan çimento esaslı malzemelerin mikroyapısal karakteristiği tasarımda kullanılan bileşenlerine bağlı olarak değişkenlik gösterecektir. Buna binaen, hâlihazırda literatürde elde edilen sonuçların pek çok parametrenin kombinasyonu ile değerlendirilmesi ve mevcut çalışma gibi çalışmalarla takviye edilmelidir.

Hava sürükleyici katkıların LDB'ye dâhil edilmesi, donma-çözülme direncini ve işlenebilirliğini önemli ölçüde artırabilir. Bununla birlikte, hava boşluklarının varlığı, betonun yangına maruz kalma altındaki davranışını da etkilemektedir [11]. Yüksek sıcaklık etkisi altında hava sürüklenmiş katkı içeren karışımlarda ve lifler arasındaki etkileşim, bir araştırma konusu olmaya devam etmektedir. Bu ilişkiyi anlamak, karışım tasarımını optimize etmek ve yangına maruz kalan LDBnin dayanıklılığını sağlamak için çok önemlidir. Öte yandan, betonun istenen mekanik özelliklerini ve dayanıklılığını elde etmek için uygun küreme esastır. Özellikle, çimento esaslı malzemenin içinde bulunan nem yüksek sıcaklık etkisi altında buhar basıncını tetikleyeceği için [12] sıcaklığa maruz kalınan süreçte numunedeki nem durumu da büyük önem arz etmektedir.

Mevcut deneysel çalışma kapsamında, münferit ve hibrit lif donatılı kompozitlerin lif türü, hava sürükleyici katkı, farklı kür koşulları (suda, dışarıda ve poşette) ve yüksek sıcaklık değerine bağlı olarak temel mühendislik özellikleri incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, su-bağlayıcı oranı 0.3, agrega-bağlayıcı oranı 1.5 ve hava sürükleyici katkı oranı %0,6 (bağlayıcı malzemeye göre) olan toplam 36 karışım tasarlanmış olup, tasarlanan karışımlara göre üretilen numunelerin 7, 28 ve 90 günlük kür yaşları için basınç dayanımı, ultrases dalgası geçiş hızı (UPV) ve mikroyapısal özellikler (taramalı elektron mikroskopu, SEM) olmak üzere temel mühendislik özellikleri incelenmiştir. UPV ve basınç dayanımı test ve analizleri aynı numune üzerinden gerçekleştirilirken, SEM görüntüleri ise basınç dayanımı testine tabi tutulduktan sonra kırılmış numuneden alınan yeterli büyüklükte parçadan elde edilmiştir.

2. Deneysel Metot (Experimental Method)

2.1. Malzemeler ve Hazırlanma Teknikleri (Materials and Preparation Techniques)

Çimento esaslı lifli kompozitlerin üretimlerinde bağlayıcı malzeme olarak TS EN 197-1 şartlarını sağlayan ve Elazığ Seza Çimentodan temin edilen CEM II 42.5 N çimentosu kullanılmıştır. Çimento fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Su/Bağlayıcı oranı 0,3 ve agrega/bağlayıcı oranı ise 1,5 olarak seçilmiştir. Üretimlerde, en büyük tane boyutu 2 mm olan dere kumu tercih edilmiştir. Ayrıca, numune üretimlerinde iki tip lif kullanılmış olup, liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Lif kullanım oranı tüm hacmin %1'i olarak tercih edilmiş olup, SF ve PP kodlu karışımlarda çelik lif ve polipropilen lifleri direkt olarak %1 oranında kullanılırken H kodlu karışımlarda ise %0,5 SF ve %0,5 PP liflerinin kombinsyonu ile hibrit lifli üretim gerçekleştirilmiştir. Hava sürükleyici katkının değişken olarak değerlendirildiği belli karışımlar için, Chryso işletmesi bünyesinde üretilen Master Air 200 kodlu hava sürükleyici katkı, %0,6 oranında (bağlayıcı malzemeye göre) üretimlerde kullanılmıştır. Ayrıca, üretimlerde tercih edilen düşük

su/çimento oranı nedeniyle oluşacak işlenebilirlik problemlerini ortadan kaldırmak için BASF işletmesinden temin edilen yeni nesil yüksek oranda su azaltıcı kimyasal katkı olan Glenium 51 ürünü kullanılmıştır. Numunelerin işlenebilirliği, gözlemsel olarak değerlendirilmiş ve homojen bir kıvam elde edilmesi sağlanmıştır.

Tablo 1. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri
(Physical and chemical properties of cement)

Kimyasal bileşen, %	PÇ
SiO ₂	19,23
Al ₂ O ₃	4,51
Fe ₂ O ₃	3,76
MgO	1,82
CaO	62,90
SO ₃	2,91
Na ₂ O	0,41
K ₂ O	0,65
Kızdırma kaybı	3,45
Fiziksel özellikler	
Özgül ağırlık, g/cm ³	3,12
Blaine, cm ² /gr	3850

Çalışma koşulları, işlenebilirliğin farklı deney parametreleriyle uyumlu bir şekilde optimize edilmesine yönelik bir yaklaşımla ele alınmıştır. Toplam 36 karışım tasarlanmış ve bu tasarıma göre üretimler yapılmış olup, 1 m³'lük karışım oranları Tablo 3'te verilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere, her karışım için bileşenlere

bağlı olarak harf ve rakamlardan oluşan farklı kodlamalarla harflendirme yapılmış olup, farklı notasyonlar tercih edilmiştir. Örneğin, H_25_NA_I kodlu 14 numaralı karışım, H kodu lif türünü ifade etmekle birlikte burada hibrit lif kullanıldığını ve 25 sayısı sıcaklık seviyesini ifade etmekle birlikte 25 C°'lık oda sıcaklığını ve NA kodu hava sürükleyici katkının kullanılmadığını ifade etmekle birlikte mevcut karışım, hava sürükleyici katkının kullanılmadığını ifade edilmekte ve I kodu ise numunelerin test edildiği yaşa kadar bekletildiği kür rejimi hakkında bilgi vermekle birlikte numunelerin poşette kür edildiğini ifade etmektedir. Ayrıca, SF ve PP kodları ilgili karışımların üretimlerinde sırasıyla çelik ve polipropilen liflerinin kullanıldığını ifade ederken S ve O kodları ise sırasıyla numunelerin suda ve havada kür koşullarında bekletildiğini belirtmektedir. Son olarak, A kodu ise ilgili karışımlarda hava sürükleyici katkının kullanıldığını ifade etmektedir.

2.2. Karışımların Oranlanması ve Numunelerin Hazırlanması (Mixture Proportions and Specimen Preparation)

Lifli kompozitlerin üretimlerinde 100 lt kapasiteli tava tipi mikser kullanılmıştır. Numuneler Tablo 3'te belirtilen karışım oranlarına göre üretilmiş olup, üretilen numuneler 40x40x160 mm boyutlarındaki kiriş kalıplara eklenmiştir. Üretilen numuneler 24 saat kalıpta bekletilmiş ve kalıptan çıkarıldıktan sonra üç farklı kür rejimlerine bırakılmış olup, bunlar suda kür, poşette kür ve havada kürdür. Standart kürde kür edilen numuneler 21 °C sıcaklık ve sönmüş kirece doymun kür havuzunda kür edilmiş olup, poşette ve havada kür edilen numuneler ise 23 ± 2 °C ortam sıcaklığı ve relatif nem oranı %50 ± 5 olan laboratuvar ortamında test yaşına kadar bekletilmiştir. Her karışımın karışım parametreleri birbirinden farklı olduğu ve hidrasyon ısı ve karma suyunun tüketilmesi gibi pek çok faktörden dolayı poşet içindeki numunelerin poşet koşulları değişiklik göstereceği için poşet içindeki bağıl nem ve sıcaklık ölçümleri

Tablo 2. Polipropilen, PP, ve pirinç kaplı çelik lifin, SF, fiziksel ve mekanik özellikleri
(Physical and mechanical properties of polypropylene, PP, and brass-coated steel fiber, SF)

Lif tipi	Nominal dayanım (GPa)	Elastik modülü (GPa)	Çap (µm)	Uzunluk (mm)	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Erime sıcaklığı (°C)
PP	0,5	5	30	6	0,9	165
SF	3	200	16	6	7,8	-



Şekil 1. Üretim ve analiz süreçleri (Production and analysis processes)

yapılmadan numunelerin test edileceği kür yaşına kadar olağan şekilde kür süreçleri sürdürülmüştür. Çalışma kapsamında hedeflenen analizler 7, 28 ve 90 günlük kür yaşlarında yapılmıştır. 7, 28 ve 90 günlük her kür yaşında numunelerin bir kısmı 250 °C'lik sıcaklığa maruz bırakılmadan (25 kodlu karışımlar) olağan test sürecine dahil edilirken, diğer numuneler (250 kodlu karışımlar) ise etüvde üç saat boyunca 250 °C'ye maruz bırakılmış olup, ısıtım işlem sonrası numunelerin kendiliğinden soğuması sağlanmıştır. Hem oda sıcaklığı hem de 250 °C'ye maruz bırakılmış numunelerin ultrases dalgası hızları ölçülmüş ve akabinde basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Sırasıyla hem üretim hem de analiz süreçleri Şekil 1'de gösterilmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

3.1. Basınç Dayanımı (Compressive Strength)

Çalışma kapsamında üretilen numunelerin basınç dayanımı değerleri 7, 28 ve 90 günlük kür yaşları için karışım parametreleri ve sıcaklık etkisine göre belirlenmiştir. Numunelerin kür rejimi, sıcaklık değeri ve hava sürükleyici katkı içerme durumuna göre basınç dayanımı değerleri sırasıyla Şekil 2, 3 ve 4'te verilmiştir. Şekillerde görüldüğü üzere, karışım parametrelerine bakılmaksızın, laboratuvar koşulları sıcaklığında kür edilen numunelerin basınç dayanımı değerlerine kıyasen 250 °C'lik sıcaklık uygulaması genel olarak numunelerin basınç dayanımını artırmış olup, karışım parametreleri ve kür yaşına göre bu değişim değişkenlik göstermiştir. Kür rejimi itibarıyla, suda kür edilen numunelerde sıcaklık etkisiyle artan hidratasyon reaksiyonları nedeniyle dayanım gelişiminde daha yüksek değişimler tespit edilmiştir. Bu değişim en fazla 7 günlük kür yaşlarında tespit edilmiş olup, bu durum devam eden hidratasyon reaksiyonlarının erken dönemde nispeten daha az gelişmiş olmasından ve sıcaklık etkisiyle teşvik edilmesinden kaynaklanmaktadır [13, 14]. 28 ve 90 günlük kür yaşları için sıcaklık nedeniyle basınç dayanımında nispeten çok daha az bir değişim tespit edilmiştir. Hava geçirimsiz poşetlerde ve laboratuvar koşulları itibarıyla açık havada kür edilen numunelerde basınç dayanımı değişimindeki fark çok az olarak gözlemlenmiş olup, genel itibarıyla hava geçirimsiz poşette kür edilen numunelerin basınç dayanımı daha yüksek elde edilmiştir. Bu durum, hava geçirimsiz poşette numune neminin nispeten daha fazla muhafaza edilmesine dayandırılabilir.

250°C'ye kadar çimento esaslı malzemenin basınç dayanımının arttığı veya sabit kaldığı gözlemlenmiş olup, 250°C'den düşük yüksek sıcaklık şartlarında basınç dayanımında neredeyse hiçbir değişiklik meydana gelmemektedir [15]. 200°C'ye kadar çimento harcı ve iri agregaların yapısında fazla bir değişiklik olmaz. Fiziksel olarak bağlı su buharlaşabilir ve matrisin mikro gözeneklerinde sıkışabilir. 400°C ve üzerinde ise, fiziksel ve kimyasal olarak bağlı suyun serbest kalması nedeniyle çatlak gelişimi başlar ve boşluklar gelişmeye başlar. Sıcaklık etkisinden dolayı çimento esaslı malzeme mikroyapısında meydana gelen boşluk basıncı tepe noktasının tipik olarak %96'sı 150°C–250°C sıcaklık aralığındadır [16]. Belirtilen sıcaklık aralığında sadece CSH jelinin ayrışması, alçıtaşı fazları, etrenjitin bozulması ve bazı monosülfatlar gözlemlenebilir. Bu durum, matris özelliklerinin bozulmasını önemli ölçüde etkilemez. Sertleşmiş çimento hamurunun en önemli fazı olan CSH jeli 600–700 °C sıcaklıklara kadar kararlılığını muhafaza etmektedir. 250°C sıcaklığa kadar, çimento matrisi termal olarak hala çok kararlıdır [17]. Tüm yukarıda belirtilenlere binaen uygulanan 250°C'lik sıcaklık etkisine rağmen liflerden dolayı mikroyapısal bir kararlılık elde edilmiş olup, dayanımda azalış değil artış ile neticelenmiştir.

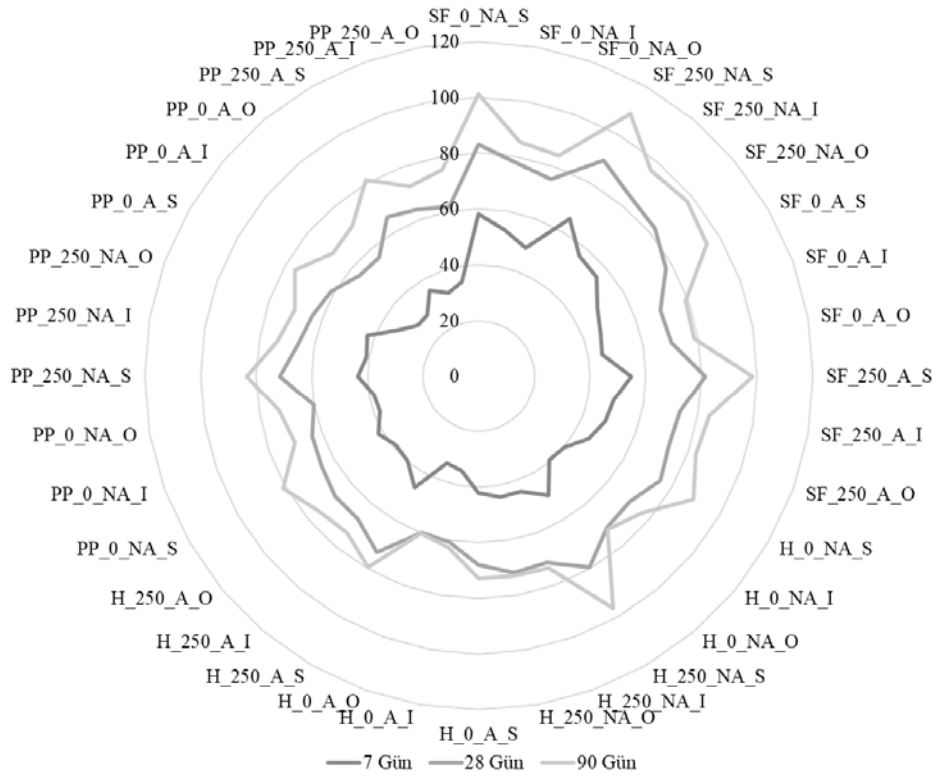
Nem durumu ve hava sürükleyici katkı içeriğine göre basınç dayanımlarının sırasıyla verildiği Şekil 3 ve Şekil 4'te görüldüğü üzere basınç dayanımı itibarıyla en yüksek basınç dayanımı değerleri

genel olarak çelik lifli karışımlarda elde edilirken en düşük basınç dayanımı değerleri ise genel olarak PP lif içeren karışımlarda gözlemlenmiştir. Çimento esaslı malzeme, termal gerilim ve boşluk basıncı oluşumunun birleşik etkisi nedeniyle sıcaklık etkisi altında parçalanma eğilimindedir. Karışım tasarımı, sıcaklık etkisi altında çimento esaslı malzemede dağılmayı önleme stratejisi için, malzeme dayanımını artırmak adına çelik lifler ve boşluk basıncı oluşumunu da azaltmak için PP lifler eklenmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar çelik lif donatılı kompozitlerin artık dayanımlarının yüksek oranda etki eden sıcaklığa bağlı olduğunu göstermiştir [18, 19]. Genel olarak, yüksek sıcaklık etkisi altında çelik lifler malzeme dayanımını iyileştirmekte ve iyileştirmedeki bu oran lif dozajına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. En iyi performans normalde %1,5 ve %2 çelik lif içeren kompozitlerde elde edilirken, bildirilen farklı çalışmalarda ise %1-2 çelik lif içeren kompozitlerde gelişmiş bir basınç dayanımı gözlemlenmiştir [19-21].

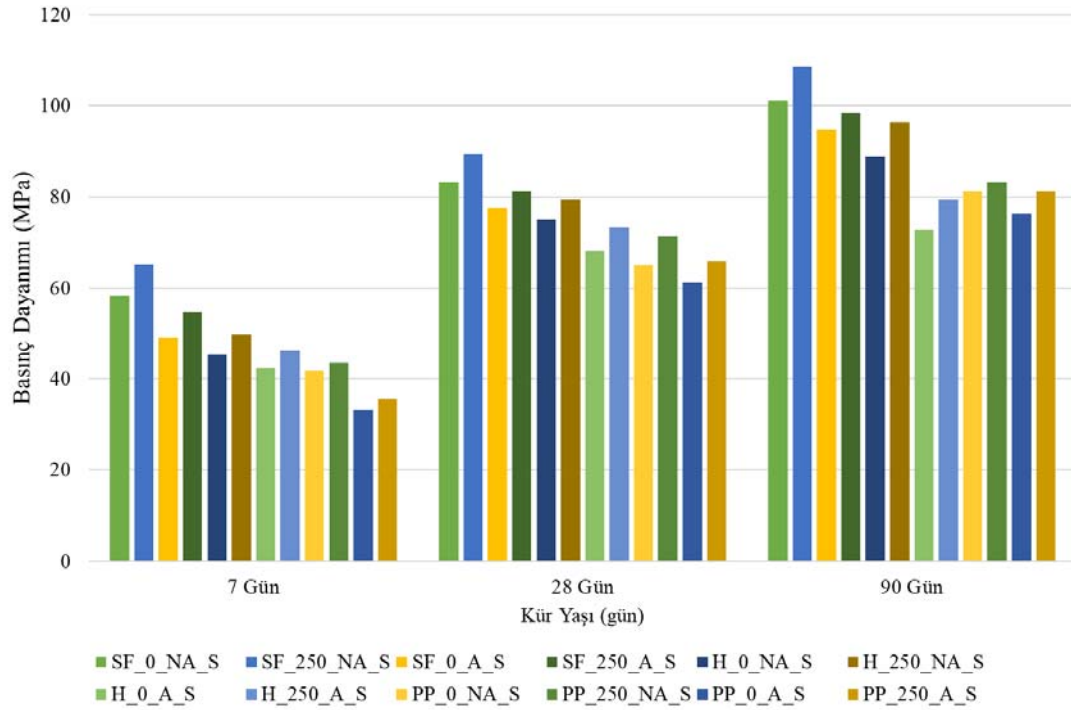
Oda sıcaklığında, lif donatılı betonların basınç dayanımı az miktarda PP lifi eklenerek iyileştirilebilir. Yüksek sıcaklığa maruz kaldığında, PP lifi, lif donatılı betonların parçalanma hasarını etkili bir şekilde azaltabilir ve bu da gelişmiş bir artık basınç dayanımına yol açar. Deneyisel sonuçların çoğu [20, 22, 23], PP lif içeren çimento esaslı kompozitlerin artık basınç dayanımının tepe sıcaklığının artmasıyla azaldığını göstermektedir. Çünkü, PP lifler liflerin ergime sıcaklığının aşılması ile birlikte erir ve sıcaklık artışı nedeniyle oluşan iç su basıncını serbest bırakmaya yardımcı olan kanallar oluşturur. Sadece PP liflerinin kullanıldığı çimento esaslı lifli kompozitlerde, dökülme/pullanma eğilimi azalırken, %1 çelik lif (SF) eklenmesi ciddi bir dökülme/pullanma sorununa yol açabilmektedir. Bunun nedeni, PP lifin beton içinde küçük kanallar oluşturması, gözenekliliği artırması ve yüksek iç gerilimlere neden olmadan buharın matris içinde hareket etmesini kolaylaştırması olup [24], SF'nin ise daha yüksek sıcaklıklarda uzaması ve lifli kompozit içinde ilave gerilmeler oluşturmalarıdır. PP life kıyasen Çelik lif, yüksek sıcaklıklarda daha fazla gerilmeye dayanabilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda çelik lif, ne tamamen bozulmamış ne de iç gerilimin önemli hale geldiği bir noktaya kadar uzamıştır. Her iki lifin hibrit kombinasyonu ile gerilmeler açısından dengeli bir matris oluşturmada dolayı termal şokun etkisi altında daha yüksek performanslı bir matris elde edilmektedir [11].

Lifli betonlarda, farklı tipte takviye lifleri yangına dayanıklılıkta farklı roller oynayabilir. Çelik lifler, mikro çatlakların oluşumunu ve genişlemesini kısıtlarken PP lifleri ise su buharını serbest bırakmak için kanallar sağlamaktadır. Farklı liflerin avantajlarının kombine edilmesi ile elde edilen sinerji münferit lif kullanımından ziyade hibrit lif kullanımını daha da yaygınlaştırmıştır. Nitekim Şekillerde görüldüğü üzere hibrit lifli kompozitlerin performansı sadece PP içeren karışımlardan çok daha iyi gözlemlenmiştir. Sıcaklık etkisi altındaki lifli kompozitlerde, karışım parametreleri ve kür yaşına bakılmaksızın, hava sürükleyici katkının kullanılması her ne kadar basınç dayanımını düşürse de lifli kompozitin artık dayanımı üzerinde olumlu etkisi olduğunu sonuçlardan görebilmekteyiz.

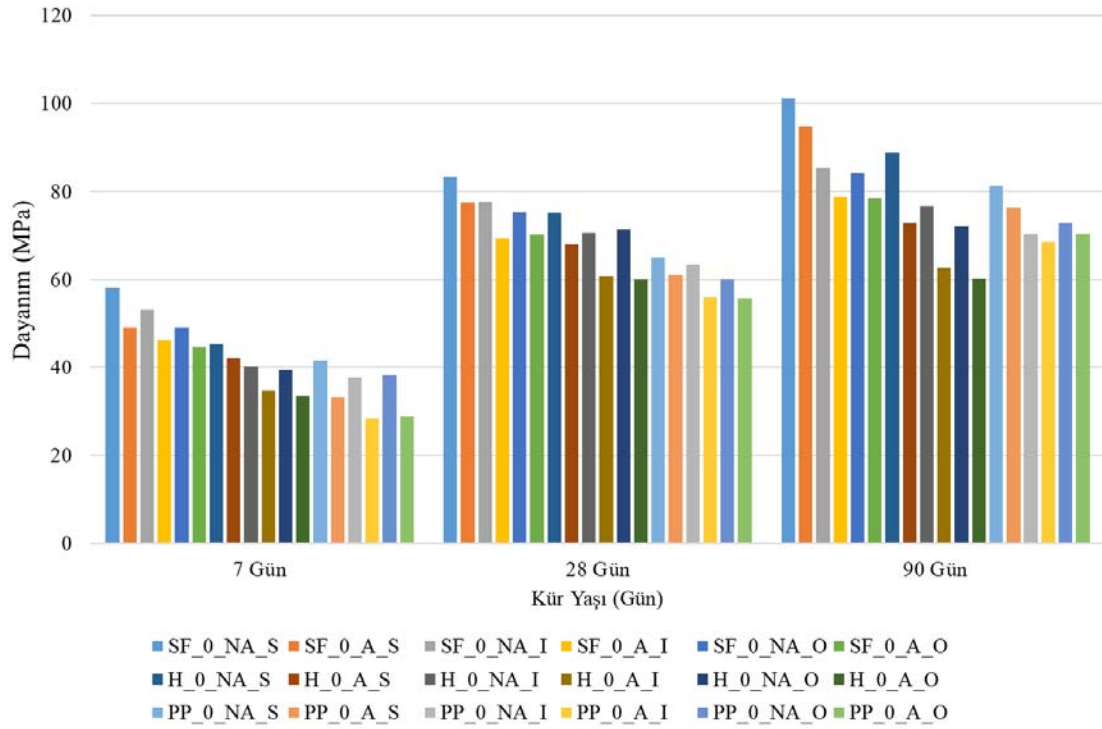
Hava sürüklenmesinin neden olduğu çimento esaslı malzemenin daha yüksek gözenekliliği boşluk buhar basıncını düşürebileceğinden, bu da mikro çatlakların ve çimento esaslı kompozitlerin parçalanmasının miktarını ve yoğunluğunu azaltabileceğinden sıcaklık etkisi altındaki kompozitlerde karışım parametresi olarak tasarım dikkat edilmesi gereken önemli bir parametredir [25]. Çünkü, porozite, gözenek boyutu ve gözenek dağılımı çimento esaslı malzemenin dayanım, dayanıklılık ve geçirimsizliğini etkileyen birincil faktörlerdir. Sıcaklık etkisi ile hem gözeneklilik artmakta hem de gözenek boyutunda irileşme meydana gelmektedir [26]. Gözeneklilik, betonun ısıl iletkenliğini etkileyen en önemli faktörlerden biridir.



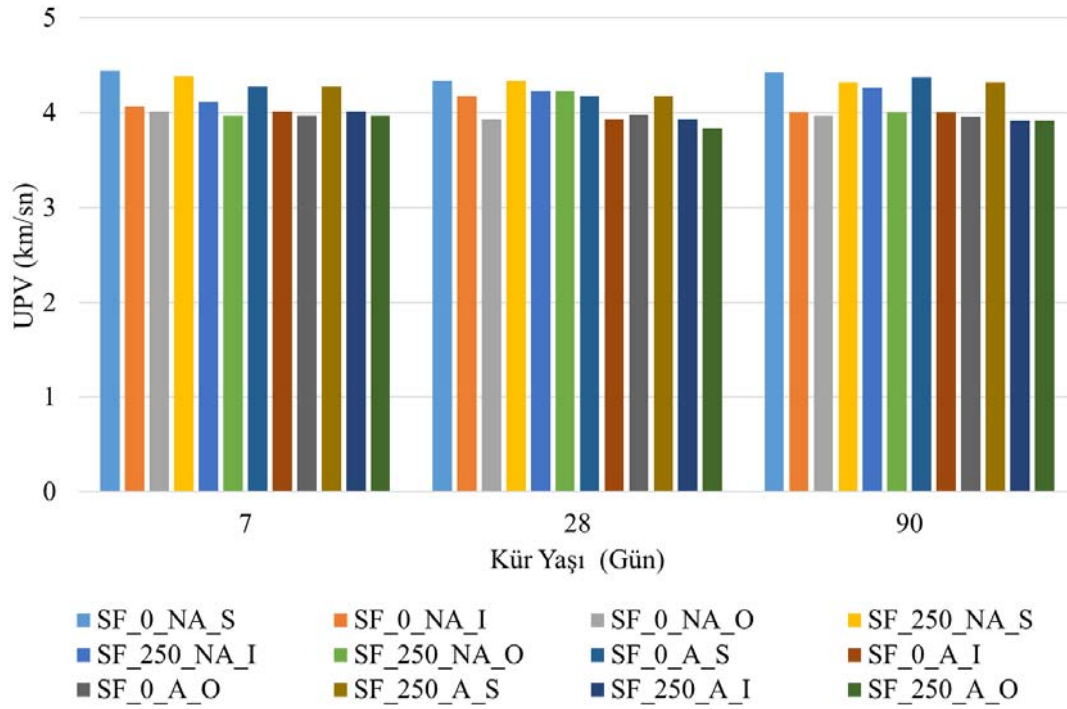
Şekil 2. Kür rejimi ve kür yaşına göre basınç dayanımı değerleri (Compressive strength depending on curing regime and curing age)



Şekil 3. Nem durumuna göre basınç dayanımı değerleri (Compressive strength values depending on moisture condition)



Şekil 4. Hava sürükleyici katkı içeriğine göre basınç dayanımı değerleri (Compressive strength values depending on air entraining agent)

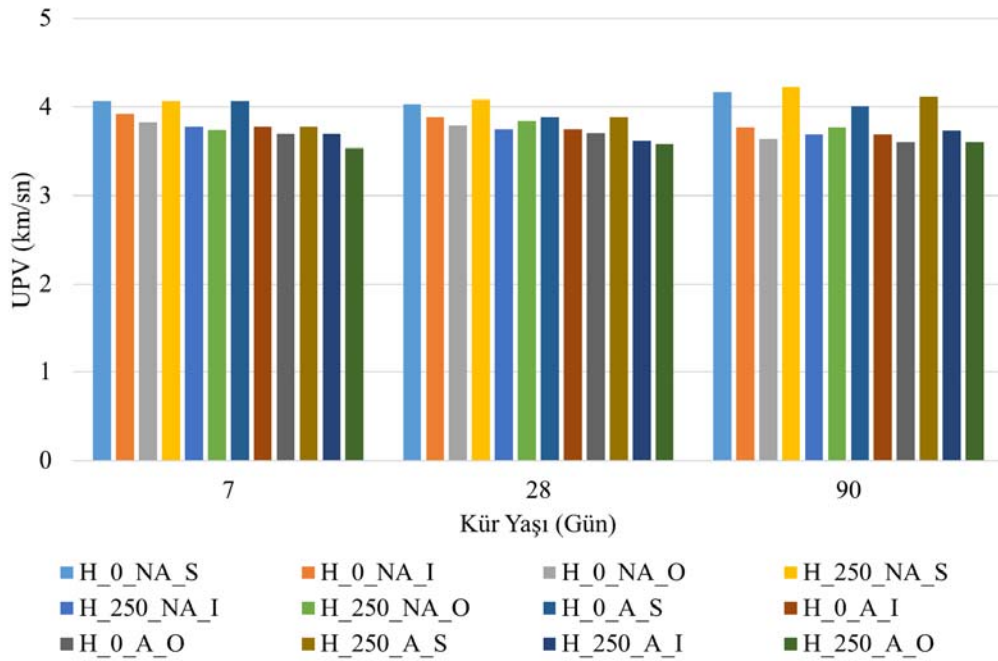


Şekil 5. SF kodlu karışımların UPV sonuçları (UPV results of SF-coded mixture)

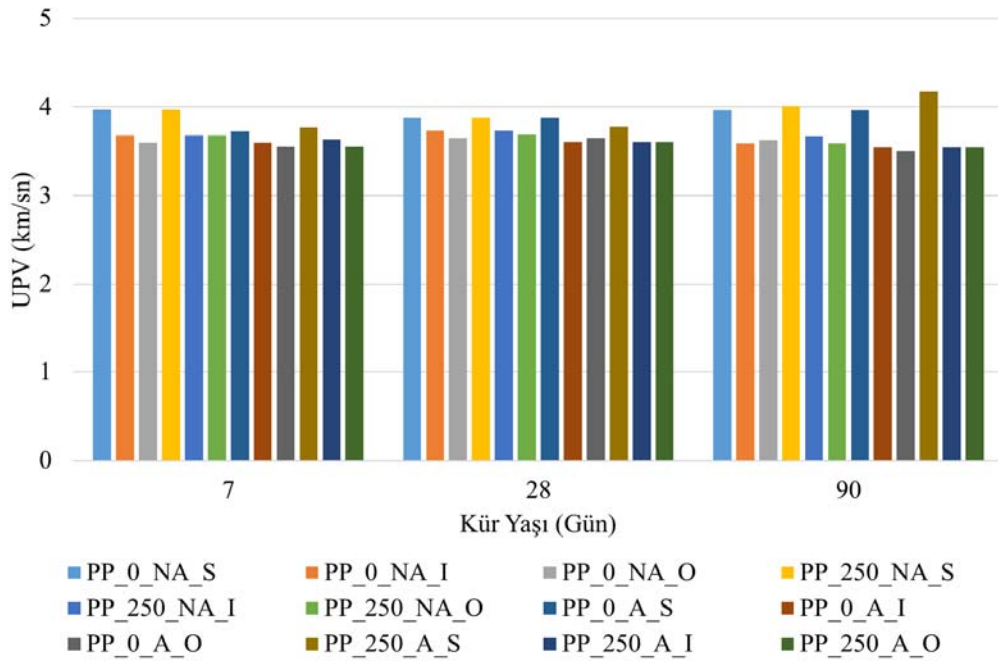
3.2. Ultrases Dalgası Geçiş Hızı (Ultrasonic Pulsive Velocity, UPV)

Ultrases dalgası geçiş hızı (UPV), çimento esaslı malzemelerin mikroyapısal özelliklerinin değerlendirilmesi için tercih edilen tahribatsız deney yöntemlerinden biridir [27, 28]. Çalışma

kapsamında üretilen 36 karışımın UPV sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü üzere suda kür edilen numunelerin hidrasyon süreci hem poşet hem de hava şartlarında kür süreci devam ettirilen numunelere kıyasen daha fazla nem şartlarına sahip olduğu için nispeten artan hidrasyon ürünlerinden dolayı daha



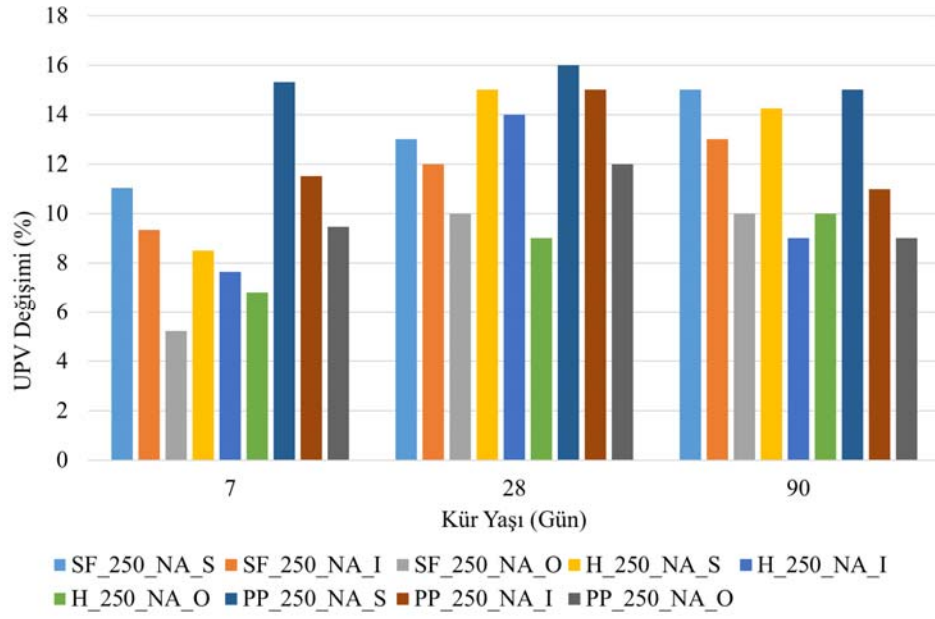
Şekil 6. H kodlu karışımların UPV sonuçları (UPV results of H-coded mixture)



Şekil 7. PP kodlu karışımların UPV sonuçları (UPV results of PP-coded mixture)

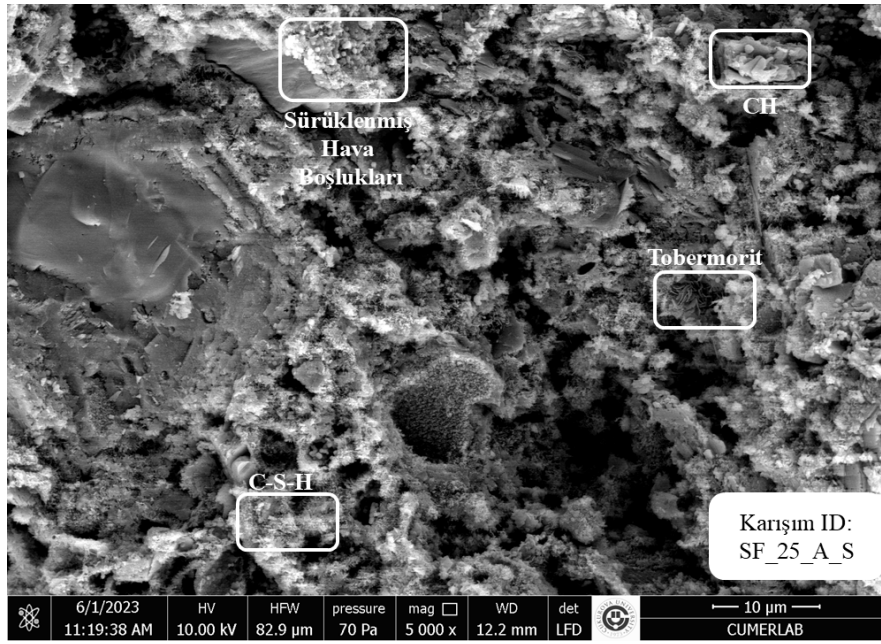
yoğun bir mikro yapı ile neticelenmiş olup, suda kür edilen numunelerin UPV sonuçları daha yüksek çıkmıştır. Öte yandan, genel olarak, poşette ve laboratuvar koşullarında kür edilen numunelerin UPV sonuçları ise neredeyse aynı gözlemlenmiştir. Kür yaşı, lif türü ve hava sürükleyici katkı içeriğine bakılmaksızın 250 °C sıcaklık etkisi mikro yapıda değişim ile neticelenmiş olup, sıcaklık etkisi altında numunelerin içerdiği nem düzeyi bu durumu olumsuz etkilemiştir [29, 30]. Çimento esaslı malzemelerde yüksek sıcaklığa maruz kalma, matris içindeki suyun buharlaşmasıyla neticelenir. Şekil

5'te de görüldüğü üzere, kür yaşına bakılmaksızın genel olarak tüm karışımlar için suda kür edilen numunelerin UPV sonuçlarında en yüksek düşüş elde edilmiştir. Sıcaklık etki hızı yüksek ve çimento esaslı malzemenin mikroyapısı yeterince yoğunsa, oluşan su buharının kaçışı yeterince hızlı olmaz. Bu durum, matris içindeki boşluklarda çok yüksek seviyelerde boşluk basıncının oluşmasına neden olur ve çimento esaslı malzemenin çekme kapasitesi yeterli değilse, hem pullanma hem de yapı elemanlarının parçalanmasıyla neticelenir.

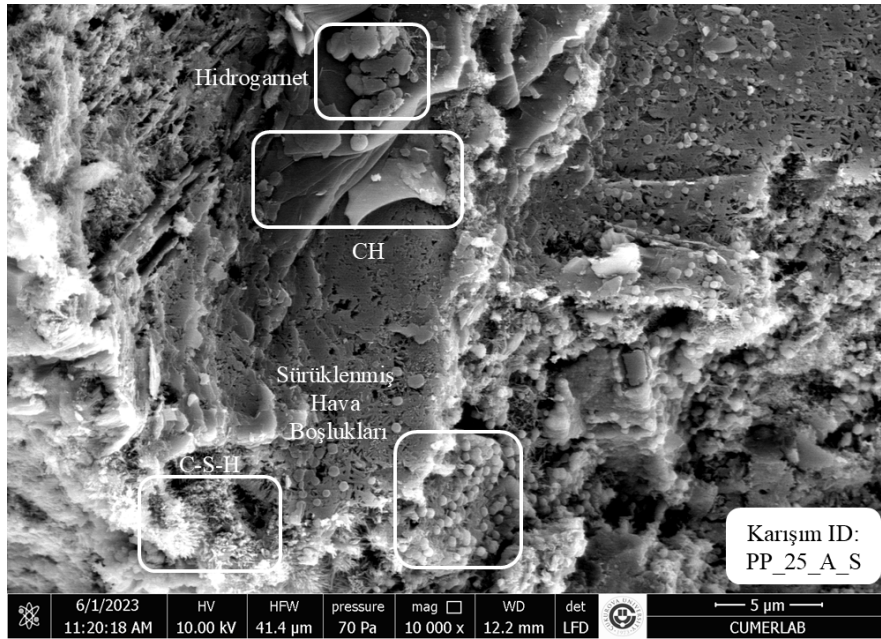


Şekil 8. Lif türüne göre UPV sonuçları (UPV results depending on fiber-type)

Karışım kodu	7. Gün	
	250 °C Öncesi	250 °C Sonrası
SF_25_NA_S		
SF_250_NA_S		
SF_25_A_S		
SF_250_A_S		
Karışım kodu	28. Gün	
	250 °C Öncesi	250 °C Sonrası
SF_25_NA_S		
SF_250_NA_S		
SF_25_A_S		
SF_250_A_S		



Şekil 9. SF_25_A_S karışımı SEM görüntüleri (SEM images of SF_25_A_S mixture)



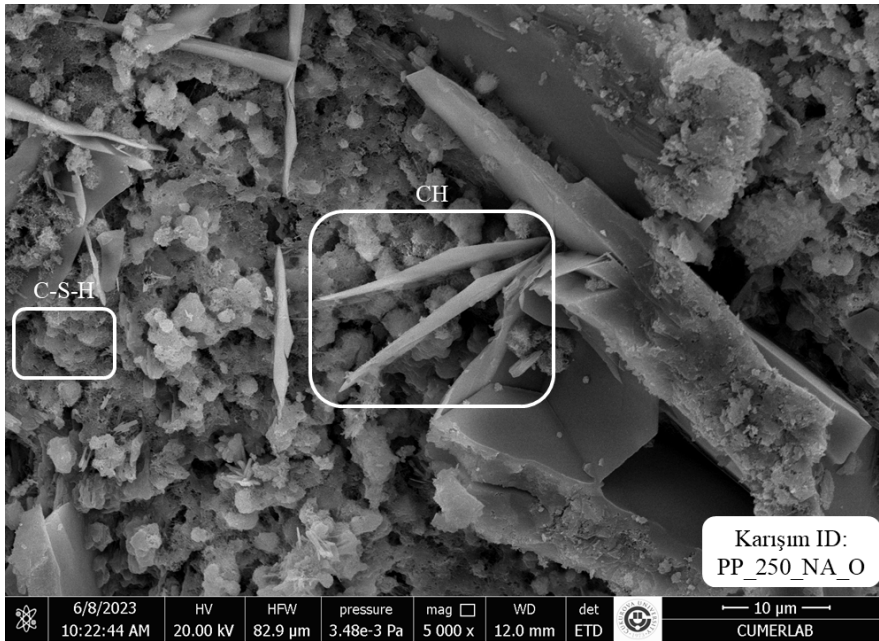
Şekil 10. PP_25_A_S karışımı SEM görüntüleri (SEM images of PP_25_A_S mixture)

Genel olarak, termo-higral veya termo-mekanik hasarın/etkinin bir sonucu olarak mikroyapısal çatlak oluşumu artar. Termo-higral süreç, aynı zamanda kısıtlanmış nem olarak da adlandırılan betondaki gözenek ağı yoluyla suyun kütle transferidir. Kısıtlanmış termal genleşme olarak da bilinen termo-mekanik süreçte, sıcaklığa maruz kalmış betonda bulunan su buharı nedeniyle yüksek basınç oluşur ve yüzeye paralel bir düzlemde eleman yüzeyine yakın basınç gerilmeleri oluşturur. Bu gerilmeler, parçalanmaya neden olan gevrek göçme/kırılma ile salınır [31]. Bir başka ifadeyle, neme doymuş numunelere kıyasen kuru numunelerde termal iletkenlik daha azdır [32, 33]. Nitekim tasarlanan karışımlar 0,3 gibi çok düşük bir su-bağlayıcı oranı ile tasarlandığı için hem poşette kür edilen hem de

havada kür edilen numunelerin sıcaklık işlemi sonrası mikroyapısal değişimlerinde neredeyse aynı sonuçlar elde edilmiştir. Tüm bu durumlar yangın etkisi altında kalan numunelerde nem muhtevasının yüksek olmasının mikro yapısal tahrip düzeylerinin yüksek olacağını göstermektedir. Çünkü, matris içindeki serbest su sıcaklık etkisiyle buharlaştıktan sonra dahilde buhar basıncı nedeniyle gerilme oluşturmakta olup, bu durum hem dayanımı düşürmekte hem de çatlak oluşumu ve gelişimi tetiklendiği için yangın sonrası durabilite problemlerine daha fazla maruz kalma potansiyelini oluşturacaktır. Hava sürükleyici katkının betonda oluşturduğu nispeten daha yüksek bir gözeneklilik, gözenek buhar basıncını azaltmakta olup, bu durum, mikro çatlakların miktarını ve yoğunluğunu azaltmakla



Şekil 11. H_25_A_S karışımı SEM görüntüleri (SEM images of H_25_A_S mixture)

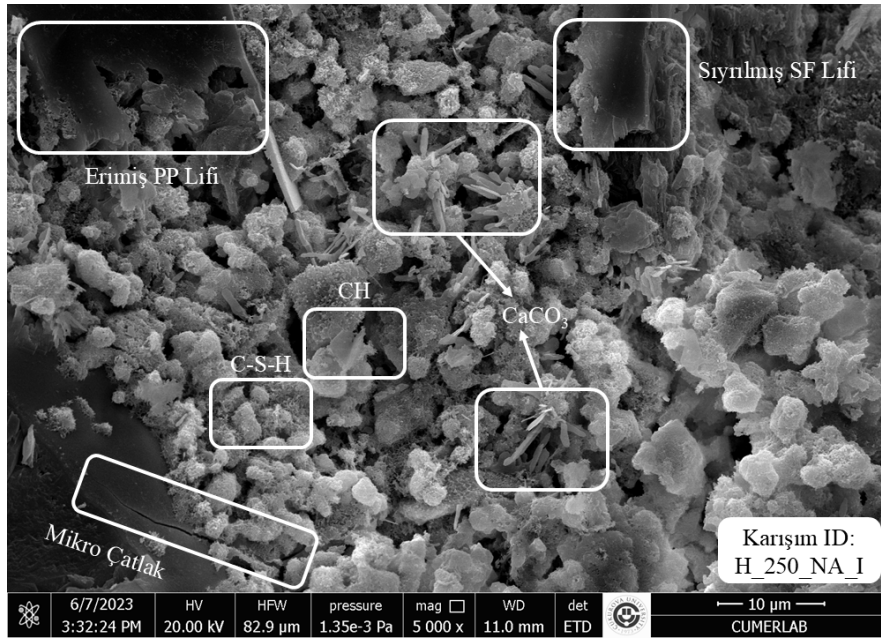


Şekil 12. PP_250_NA_O karışımı SEM görüntüleri (SEM images of PP_250_NA_O mixture)

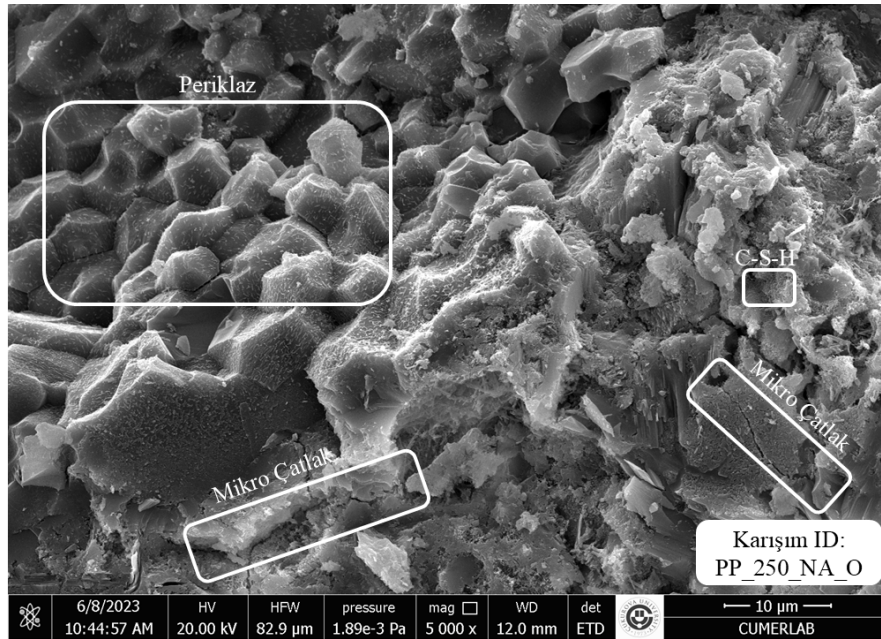
neticelenmektedir [25, 34]. Hava sürükleyici katkı içeren ve sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin UPV değerlerindeki değişim SF içeriği arttıkça artmakta olup, PP içeren karışımlarda nispeten çok daha düşük bir azalma tespit edilmiştir. Çünkü PP lifleri sıcaklık etkisi altında eridiği ve buhar basıncının tahliyesini sağladığı için hava sürükleyici katkı gibi bir etki oluşturup nispeten daha az mikroyapısal bir değişim elde edilmesini sağlamaktadır [34, 35].

Beton teknolojisinde kullanılan lifler farklı mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Lifler, çimento esaslı malzemelerin yüksek sıcaklık etkisi altında performansının iyileştirilmesinde farklı roller oynayacak olup, lifli betona farklı özellikler

kazandırabilmektedirler. UPV sonuçlarının temsil edildiği Şekil 5-Şekil 8'de görüldüğü üzere, SF içeren karışımların UPV değerleri nispeten daha yüksek çıkmış olup, en düşük değerler PP içeren karışımlarda gözlemlenmiştir. Liflerin iletkenlik özellikleri de UPV sonuçlarını etkileyen bir diğer faktördür. SF, pirinç kaplı çelik bir lif olup, polimerik bir malzeme olan PP lifine kıyasen daha iletken bir malzemedir. Bunun dışında, çelik liflerin termal kararlılıkları yüksek iken PP liflerin termal kararlılıkları ise zayıftır [14]. Bu nedenle, PP'ye kıyasen SF lifinin kullanıldığı karışımlarda nispeten daha yüksek UPV değerlerinin tespit edilmesindeki bir diğer etken ise SF liflerinin boyutsal kararlılığının ve dolayısıyla matrisin boyutsal stabilitesinin nispeten daha yüksek performans ile neticelenmesidir.



Şekil 13. H_250_NA_I karışımı SEM görüntüleri (SEM images of H_250_NA_I mixture)



Şekil 14. PP_250_NA_O karışımı SEM görüntüleri (SEM images of PP_250_NA_O mixture)

Zayıf bir termal kararlılığa sahip olan PP gibi lifler, 180 °C–300 °C civarında etkiyen sıcaklık aşamasında ergimektedir. Bu durum, çimento esaslı malzeme içindeki hidrasyon ürünü olan kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli tarafından ayrıştırılan su buharı için bir çıkış oluşturan ince kanallar oluşturur. Azaltılmış iç basınçla neticelenen bu mikroyapısal durum lifli betonların daha yüksek bir direnç ile neticelenmesini sağlar [36]. PP'ye kıyas edildiğinde SF, yüksek sıcaklık etkisi altında gerilmelere daha fazla direnç gösterdiğinden dolayı her iki lifin hibrit kombinasyonu ile gerilmeler açısından dengeli bir matris oluşturmada dolayı yüksek sıcaklıklarda daha kararlı bir mikro yapı elde edilmektedir [11]. Belirtilen açıklamalara ilave olarak, yüksek sıcaklıktan dolayı erken dönemde

teşvik edilen hidrasyon reaksiyonları ve dolayısıyla oluşan ilave hidrasyon ürünleri nedeniyle mikroyapıda iyileşme meydana gelmiş olup, karışım parametresi fark etmeksizin 7 günlük kür yaşı için UPV değerindeki değişim daha düşük seviyelerde tespit edilmiştir [14].

3.3. Görsel Değişim ve Mikro Yapısal Özellikler (Visual Change and Microstructural Characteristics)

250 °C sıcaklığa maruz bırakılan çimento esaslı lifli kompozitlerin mikroyapısal özelliklerindeki değişimi ve çatlak gelişimini değerlendirmek amacıyla 28 günlük numuneler üzerinde ASTM C1723'e [37] uygun olarak Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

görüntüleme işlemi gerçekleştirilmiştir. SEM görüntülerine ilave olarak numunelerin işlem öncesi ve sonrası fiziksel durumunu gösterir dijital görüntüleri de elde edilmiştir.

Basınç dayanımı bölümünde de belirtildiği üzere en yıpratıcı mikroyapısal şart nem oranının yüksek olduğu koşullardır. Buna binaen, fiziksel değişimin gözlemlenmesi için mevcut deneysel çalışma kapsamında suda kür edilerek üretilen numunelerin 7 ve 28 günlük kür yaşları için sıcaklık öncesi ve sonrası fiziksel görüntüleri Tablo 4'te verilmiştir. Tabloda görüldüğü üzere, genel olarak, sıcaklık artışıyla birlikte numune yüzeylerinde nem kaybından dolayı bir değişim meydana gelmiş olup, uygulanan sıcaklığa kadar numunelerin yüzey renk tonlarında hasarı ifade eden gözle görülür bir değişiklik tespit edilmemiştir. Sıcaklığın 250 °C'ye ulaştığı seviyelerde çimento matrisinin termal stabilitesi korunmaktadır [17]. Buna binaen, uygulanan 250 °C'lik sıcaklık etkisine rağmen mikroyapısal kararlılığın bir yansıması olarak fiziksel olarak herhangi bir değişimle sonuçlanmamıştır. Belirtilenlere ilave olarak, karışım ve lif gibi içerdikleri bileşenlerine bakılmaksızın numune yüzeylerinde herhangi bir çatlak gözlemlenmemiştir. Farklı geometrik ve mekanik özelliklere sahip olan lifler, matris ve çatlaklar arasında köprü oluşturarak (PP lifleri ergime sıcaklığına ulaşmaya kadar) çatlak oluşumunu geciktirmektedir [38, 39]. Böylece, PP ve çelik liflerin (SF) münferit ve hibrit formda karışımlara eklenmiş olması çatlak oluşumu ve gelişimini kısıtlamış olup, boyutsal kararlılık sağlanmıştır [14].

28 günlük kür yaşı için seçilmiş karışımların hidrasyon ürünleri ve mikroyapısal karakteristiğini gösteren SEM görüntüleri Şekil 9-Şekil 14'te verilmiştir. Tüm karışımlar için (Şekil 9-Şekil 14) hidrasyon ürünleri genel olarak C-S-H jeli, CH ve etrenjit olarak tespit edilmiştir. Çimento hamurunun katı fazında hidrasyon ürünü olarak kalsiyum hidroksit sütun veya plaka şeklinde olabilmektedir. Mevcut SEM görüntülerinde, hidrasyon ürünü olan sönmüş kireç esas olarak portlandit formunda gözlemlenmiştir. Oluşan sönmüş kireç kristallerinin morfolojisi, kristalizasyon için mevcut boş alana dolayısıyla su-bağlayıcı oranına, katkılarının ve katkı maddelerinin türüne bağlıdır. SEM görüntüleri aynı zamanda klinker kalıntıların oluşturduğu minerallerin (örneğin periklaz) tanımlanmasına da olanak sağlar. Şekil 9-Şekil 14'te görüldüğü üzere matris içinde periklaz gibi farklı ürünlere de rastlanılmıştır.

28 günlük hidrasyon süresi ve su/bağlayıcı oranı çok düşük olan karışımlar olması nedeniyle, Şekil 9-Şekil 14'te gösterildiği üzere tüm karışımların SEM görüntülerinde çok düşük oranlardaki bir poroziteye rastlanılmıştır. Nitekim bunun bir neticesidir ki 28 günlük standart kür yaşında sıcaklık sonrası UPV değerlerinde en düşük değer 3,28 km/sn olarak H_250_A_I kodlu karışımda tespit edilmiş olup (mevcut değer 3,0-3,50 km/sn arasında olduğu için "iyi" bir mikroyapı olarak sınıflandırılmaktadır) [28], basınç dayanımı ise en düşük PP_0_A_O kodlu karışımda ve 55,80 MPa olarak elde edilmiştir (bu değer yüksek dayanımı ifade etmektedir). Öte yandan, 250 °C'ye maruz kalmadan oda sıcaklığında kür edilen numunelerde bile çok küçük mikro çatlaklar tespit edilmiş olup, iç çatlama aynı zamanda sıcaklık nedeniyle matris içindeki birikmiş buhar basıncına da atfedilir ve bu, nemin atmosfere geçişi yoluyla hafifletilebilir. Çünkü bu tür çatlama, sıcaklık etkisi sırasında numunelerdeki suyun taşınması ve buharlaşmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, bu durum sıcaklık etkisinden değil de rötre çatlağı veya SEM numunesi basınç dayanımı testi sonrası alındığı için gerilme kaynaklı oluşan çatlaklar olabilmektedir [40, 41]. Sıcaklık etkisinin boyutsal kararlılık üzerine olan olumsuz etkisini azaltmak nedeniyle kullanılan hava sürükleyici katkı nedeniyle mikro yapısal çatlak gözlemlenmemiş olup, olumlu bir etki elde edildiği tespit edilmiştir (Şekil 10). Literatürde, lifsiz numunelerde suyun bağlayıcıya oranı 0,3 ve 0,35'e eşit olduğunda agrega ile çimento matrisi arasında iyi bir bağ kalitesinin oluştuğu ve

çimento matrisinin çok yoğun olduğu sonucuna varılmıştır [42, 43]. Gözlemlenen mikro çatlaklar buna dayandırılabilir.

PP liflerinin ergime sıcaklığı 175 °C olduğu için uygulanan 250 °C sıcaklık etkisi nedeniyle erimiştir (Şekil 13). PP liflerinin erimesi sonucu oluşan iğne benzeri kanallar ve gözenekler, buhar basıncını tahliye etmeye ve çimento esaslı malzemede mikro yapısal çatlak oluşumuna karşı direncini artırmaya yardımcı olur [44]. Dolayısıyla, çimento esaslı malzemelerde kullanılan PP lifleri yüksek sıcaklık etkisi altında matrisin parçalanma hasarını etkili bir şekilde azaltmakta olup [22], elde edilen mikroyapısal kararlılığın bir neticesi olarak matris içinde çok daha az sayıda mikro çatlak oluşmaktadır (Şekil 13 ve Şekil 14). Şekillerde görüldüğü gibi, 250°C'ye maruz bırakılan numunelerin mikroyapısal yüzey morfolojisinde oda sıcaklığındaki numuneler ile kıyas edildiğinde belirgin bir değişiklik yoktur. Bununla birlikte, özellikle suda ve poşette kür edilen numunelerde suyun serbest kalmasından kaynaklanan [45] çok sayıda gözenek bulunmuştur. SEM görüntüleri genel olarak incelendiğinde 250 °C sıcaklık derecesinin mikroyapısal kararlılık sağlandığı için mikro çatlaklar ile neticelenmediği ve hava sürükleyici katkı kullanımının da özellikle sıcaklık nedeniyle mikro çatlak oluşumunu kısıtladığı için olumlu etkileri tespit edilmiştir.

4. Simgeler (Symbols)

Ca(OH)₂ : Portlandit, Sönmüş kireç

CaCO₃ : Kalsiyum karbonat

5. Sonuçlar (Conclusions)

Çimento esaslı lifli kompozitlerin basınç dayanımı, UPV değerleri ve SEM görüntüleri incelenerek kür rejimi, sıcaklık etkisi, hava sürükleyici katkı ve lif türünün bahse konu sonuçlar üzerine olan etkisi 7, 28 ve 90 günlük kür yaşları için incelenmiştir. Değişkenlere bağlı olarak elde edilen verilere göre aşağıda verilen sonuçlara varılmıştır.

- Kür yaşı ve diğer değişkenlere bakılmaksızın 250°C'a kadar mikroyapısal kararlılığın sağlandığı tespit edilmiştir.
- Suda kür edilen numunelerde, 250 °C sıcaklık sonrası basınç dayanımında artış gözlemlenmiştir. En yüksek artış 7 günlük kür yaşında tespit edilmiş olup, 28 ve 90 günlük kür yaşları için nispeten daha az bir değişim gözlemlenmiştir.
- Poşette ve havada kür edilen numunelerin hem basınç hem de UPV sonuçları çok yakın tespit edilmiş olup, poşette kür edilenler havadakilere kıyasen biraz daha yüksek tespit edilmiştir.
- Pirinç kaplı çelik liflerde artık basınç dayanımı daha yüksek gözlemlenmiştir. SF ve PP liflerinin kombinasyonu ile üretilen hibrit karışımlarda ikinci derecede daha yüksek olarak sonuçlar elde edilmiştir.
- Hava sürükleyici katkı kullanımı boyutsal ve mikroyapısal kararlılığa katkı sağlamıştır.
- Bu çalışmada lifli kompozitlerin basınç dayanımına odaklanılmış olmakla birlikte, lif katkılı kompozitlerin eğilme yük-sehim performansları, yüksek sıcaklık etkisindeki potansiyel kılcal çatlakların davranışını daha ayrıntılı değerlendirmek için önemli bir araştırma alanı sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, eğilme yüklemesine yönelik deneysel analizler ile bu tür kompozitlerin mekanik performansını daha kapsamlı bir şekilde ortaya koymayı hedefleyebilir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Mevcut deneysel araştırma, Batman Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü (BTÜBAP) tarafından BTÜBAP-2022-YL-17 proje kimliği ile finansal olarak desteklenmiştir. Yazarlar, mali desteğinden dolayı BTÜBAP'a teşekkür etmektedir.

Kaynaklar (References)

- Topal Ö., Karakoç M. B., Özcan A., Effects of elevated temperatures on the properties of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) based geopolymer concretes containing recycled concrete aggregate, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26 (10), 4847-4862, 2022.
- Durmuş G., Arslan M., Physical properties of cement mortars exposed to high temperature in various cooling conditions, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25 (3), 541-548, 2010.
- Durmuş G., Bekem İ., Investigation of the effect of high temperatures and different cooling conditions on the concrete with calcereous aggregates, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 25 (4), 741-748, 2010.
- Sancak E., Şimşek O., Effects of high temperature on the lightweight concrete with silica fume and superplasticizer, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21 (3), 443-450, 2006.
- Shah S. N. R., Akashah F. W., Shafiq P., Performance of high strength concrete subjected to elevated temperatures: a review, *Fire Technology*, 55, 1571-1597, 2019.
- Derinpinar A. N., Karakoç M. B., Özcan A., Performance of glass powder substituted slag based geopolymer concretes under high temperature, *Construction and Building Materials*, 331, 127318, 2022.
- Memon S. A., Shah S. F. A., Khushnood R. A., Baloch W. L., Durability of sustainable concrete subjected to elevated temperature—a review, *Construction and Building Materials*, 199, 435-455, 2019.
- Zhang P., Kang L., Wang J., Guo J., Hu S., Ling Y., Mechanical properties and explosive spalling behavior of steel-fiber-reinforced concrete exposed to high temperature—a review, *Applied Sciences*, 10 (7), 2324, 2020.
- Krishna A., Kaliyaperumal S. R. M., Kathirvel P., Compressive strength and impact resistance of hybrid fiber reinforced concrete exposed to elevated temperatures, *Structural Concrete*, 23 (3), 1611-1624, 2022.
- Tawfik M., El-said A., Deifalla A., Awad A., Mechanical properties of hybrid steel-polypropylene fiber reinforced high strength concrete exposed to various temperatures, *Fibers*, 10 (6), 53, 2022.
- Alhamad A., Yehia S., Lublóy É., Elchalakani M., Performance of different concrete types exposed to elevated temperatures: a review, *Materials*, 15 (14), 5032, 2022.
- Ashkezari G. D., Razmara M., Thermal and mechanical evaluation of ultra-high performance fiber-reinforced concrete and conventional concrete subjected to high temperatures, *Journal of Building Engineering*, 32, 101621, 2020.
- Cao K., Liu G., Li H., Huang Z., Wu G., Correlation between macroscopic properties and microscopic pore structure in steel-basalt hybrid fibers reinforced cementitious composites subjected to elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 365, 129988, 2023.
- Wu H., Lin X., Zhou A., A review of mechanical properties of fibre reinforced concrete at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, 135, 106117, 2020.
- Paszetnik M., Wróblewski R., A literature review of concrete ability to sustain strength after fire exposure based on the heat accumulation factor, *Materials*, 14 (16), 4719, 2021.
- Shen L., Yao X., Di Luzio G., Jiang M., Han Y., Mix optimization of hybrid steel and polypropylene fiber-reinforced concrete for anti-thermal spalling, *Journal of Building Engineering*, 63, 105409, 2023.
- Szeląg M., Evaluation of cracking patterns of cement paste containing polypropylene fibers, *Composite Structures*, 220, 402-411, 2019.
- Chen G. M., He Y. H., Yang H., Chen J. F., Guo Y. C., Compressive behavior of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 71, 1-15, 2014.
- Guo Y. C., Zhang J. H., Chen G. M., Xie Z. H., Compressive behaviour of concrete structures incorporating recycled concrete aggregates, rubber crumb and reinforced with steel fibre, subjected to elevated temperatures, *Journal of Cleaner Production*, 72, 193-203, 2014.
- Xie J., Zhang Z., Lu Z., Sun M., Coupling effects of silica fume and steel-fiber on the compressive behaviour of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperature, *Construction and Building Materials*, 184, 752-764, 2018.
- Zheng W., Li H., Wang Y., Compressive behaviour of hybrid fiber-reinforced reactive powder concrete after high temperature, *Materials & Design*, 41, 403-409, 2012.
- Eidan J., Rasoolan I., Rezaeian A., Poorveis D., Residual mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete after heating, *Construction and Building Materials*, 198, 195-206, 2019.
- Aslani F., Kelin J., Assessment and development of high-performance fibre-reinforced lightweight self-compacting concrete including recycled crumb rubber aggregates exposed to elevated temperatures, *Journal of Cleaner Production*, 200, 1009-1025, 2018.
- Czoboly O., Lublóy É., Hlavička V., Balázs G. L., Kéri O., Szilágyi I. M., Fibers and fiber cocktails to improve fire resistance of concrete, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 128, 1453-1461, 2017.
- Holan J., Novak J., Müller P., Štefan R., Experimental investigation of the compressive strength of normal-strength air-entrained concrete at high temperatures, *Construction and Building Materials*, 248, 118662, 2020.
- Li L., Shi L., Wang Q., Liu Y., Dong J., Zhang H., Zhang G., A review on the recovery of fire-damaged concrete with post-fire-curing, *Construction and Building Materials*, 237, 117564, 2020.
- Demirel Ö., Demirhan S., Investigation of microstructural properties of high-volume fly ash blended cement mortars including micronized calcite, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (4), 2255-2270, 2021.
- Demirhan S., 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, 2020.
- Van Der Heijden G. H. A., Van Bijnen R. M. W., Pel L., Huinink H. P., Moisture transport in heated concrete, as studied by NMR, and its consequences for fire spalling, *Cement and Concrete Research*, 37 (6), 894-901, 2007.
- Ding Y., Zhang C., Cao M., Zhang Y., Azevedo C., Influence of different fibers on the change of pore pressure of self-consolidating concrete exposed to fire, *Construction and Building Materials*, 113, 456-469, 2016.
- Malik M., Bhattacharyya S. K., Barai S. V., Thermal and mechanical properties of concrete and its constituents at elevated temperatures: a review, *Construction and Building Materials*, 270, 121398, 2021.
- Zhang W., Min H., Gu X., Xi Y., Xing Y., Mesoscale model for thermal conductivity of concrete, *Construction and Building Materials*, 98, 8-16, 2015.
- Duran-Herrera A., Campos-Dimas J. K., Valdez-Tamez P. L., Bentz D. P., Effect of a micro-copolymer addition on the thermal conductivity of fly ash mortars, *Journal of Building Physics*, 40 (1), 3-16, 2016.
- Khalik W., Waheed F., Mechanical response and spalling sensitivity of air entrained high-strength concrete at elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 150, 747-757, 2017.
- Khalik W., Kodur V., Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, 41 (11), 1112-1122, 2011.
- Li Y., Tan K. H., Yang E. H., Synergistic effects of hybrid polypropylene and steel fibers on explosive spalling prevention of ultra-high performance concrete at elevated temperature, *Cement and Concrete Composites*, 96, 174-181, 2019.
- ASTM C1723, Standard Guide for Examination of Hardened Concrete Using Scanning Electron Microscopy, 2016.
- Zhang Y., Ju J. W., Zhu H., Yan Z., A novel multi-scale model for predicting the thermal damage of hybrid fiber-reinforced concrete, *International Journal of Damage Mechanics*, 29 (1), 19-44, 2020.
- Zhang Y., Zhang S., Jiang X., Zhao W., Wang Y., Zhu P., Yan Z., Zhu H., Uniaxial tensile properties of multi-scale fiber reinforced rubberized concrete after exposure to elevated temperatures, *Journal of Cleaner Production*, 389, 136068, 2023.
- Kevin C., Du P., Tan K. H., Local bond-slip behaviour of reinforcing bars in fibre reinforced lightweight aggregate concrete at ambient and elevated temperatures, *Construction and Building Materials*, 377, 131010, 2023.
- Saif M. S., Shanour A. S., Abdelaziz G. E., Elsayad H. I., Shaaban I. G., Tayeh B. A., Hammad M. S., Influence of blended powders on properties of ultra-high strength fibre reinforced self compacting concrete subjected to elevated temperatures, *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01793, 2023.

42. Hosseinzadeh H., Salehi A. M., Mehraein M., Asadollahfardi G., The effects of steel, polypropylene, and high-performance macro polypropylene fibers on mechanical properties and durability of high-strength concrete, *Construction and Building Materials*, 386, 131589, 2023.
43. Yuan Z., Jia Y., Mechanical properties and microstructure of glass fiber and polypropylene fiber reinforced concrete: an experimental study, *Construction and Building Materials*, 266, 121048, 2021.
44. Zhou W., Mo J., Xiang S., Zeng L., Impact of elevated temperatures on the mechanical properties and microstructure of waste rubber powder modified polypropylene fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, 392, 131982, 2023.
45. Cao M., Li L., Yin H., Ming X., Microstructure and strength of calcium carbonate (CaCO_3) whisker reinforced cement paste after exposed to high temperatures, *Fire Technology*, 55, 1983-2003, 2019.

