LİF İÇEREN SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON KARIŞIMLARININ TAZE VE SERTLEŞMİŞ HAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ; LİF TÜRÜ, UZUNLUĞU VE KULLANIM ORANININ ETKİSİ

Murteda ÜNVERDİ

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LİF İÇEREN SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON KARIŞIMLARININ TAZE VE SERTLEŞMİŞ HAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ; LİF TÜRÜ, UZUNLUĞU VE KULLANIM ORANININ ETKİSİ

Murteda ÜNVERDİ
0000-0002-0893-7450

Prof. Dr. Ali MARDANİ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2025
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Murteda ÜNVERDİ tarafından hazırlanan "LİF İÇEREN SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON KARIŞIMLARININ TAZE VE SERTLEŞMİŞ HAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ; LİF TÜRÜ, UZUNLUĞU VE KULLANIM ORANININ ETKİSİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Ali MARDANİ

Başkan	**:**	Prof. Dr. Ali MARDANİ 0000-0003-0326-5015 Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı	İmza
Üye	**:**	Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN 0000-0002-1867-7103 Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yapı Anabilim Dalı	İmza
Üye	**:**	Prof. Dr. Ahmet BEYCİOĞLU 0000-0001-6287-1686 Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yapı Malzemesi Anabilim Dalı	İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali KARA
Enstitü Müdürü
…../…../…..

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

…/…/……

Murteda ÜNVERDİ

TEZ YAYINLANMA
FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan "**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**" kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Tarih Ali MARDANİ	Tarih Murteda ÜNVERDİ
İmza Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.	İmza Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ TEZ TANITIMI
ÖĞRENCİ VE DANIŞMAN FORMU

FR 3.4.6_27

ÖĞRENCİ
Adı SOYADI : Murteda ÜNVERDİ
ÜNVANI : Araştırma Görevlisi
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ABD
E-POSTA : murtedaunverdi@uludag.edu.tr
PROGRAMI: YÜKSEK LİSANS
ORCID : 0000-0002-0893-7450
TÜBİTAK ID : TBTK-0099-6012
WOS RESEARCHER ID : KEH-0351-2024
SCOPUS AUTHOR ID : 59720914800
Google Scholar ID : AZXlod8AAAAJ&hl

DANIŞMAN
Adı SOYADI : Ali MARDANİ
ÜNVANI : Prof. Dr.
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ABD
E-POSTA : alimardani@uludag.edu.tr
YÖKSİS ARAŞTIRMACI ID : 366458
ORCID : 0000-0003-0326-5015
TÜBİTAK ID : TBTK-0027-9960
WOS RESEARCHER ID : C-7860-2015
SCOPUS AUTHOR ID : 58898851200
Google Scholar ID : lXZK2d0AAAAJ&hl

BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ YÜKSEK LİSANS EĞİTİMİ BOYUNCA BİLİMSEL ÇALIŞMALARI VE FAALİYETLERİ*

1. Ünverdi, M., Kaya, Y., & Mardani, A. (2024, November 8-10). *DETERMINATION OF MIX PROPORTION FOR RCC MIXTURES PRODUCED BY MAXIMUM DENSITY METHOD* [Conference session]. 6. International Anatolian Scientific Research Congress, Konya, Turkey.
2. Ünverdi, M., Kaya, Y., & Mardani, A. (2024, December 20-22). *LİF TÜRÜNÜN SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON KARIŞIMLARININ OPTİMUM SU MUHTEVASI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ* [Conference session]. 3rd International Ege Congress on Scientific Research, Izmir, Turkey.
3. ……
4. ……
5. ……
6. ……
7. ……
8. ……
9. ……
10. ……
11. ……

***Makaleler, Bilimsel toplantılarda sunulan bildiriler, patentler, projeler, eğitimler vb. faaliyetler sıralanmalıdır.

BİRLEŞMİŞ MİLLETLER SÜRDÜRÜLEBİLİR KALKINMA HEDEFLERİ

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 
Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

CO_2 azaltımı

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Sürdürülebilir kalkınma

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Nihai dayanım, enerji yutma kapasitesi

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

☐ 

Anahtar Kelimeler

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

LİF İÇEREN SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON KARIŞIMLARININ TAZE VE SERTLEŞMİŞ HAL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ; LİF TÜRÜ, UZUNLUĞU VE KULLANIM ORANININ ETKİSİ

Murteda ÜNVERDİ

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ali MARDANİ

Bu çalışmada, lif tipi, boyu ve dozajının silindirle sıkıştırılmış betonun (SSB) taze ve sertleşmiş özellikleri ile yüksek sıcaklık performansı üzerindeki etkileri kapsamlı şekilde incelenmiştir. 30 mm ve 60 mm uzunluklarındaki çelik (S), polipropilen (PP) ve atık çelik (WS) lifler, çeşitli hacim oranlarında (%0-1,25) karışımlara ilave edilerek işlenebilirlik, mekanik davranış ve durabilite üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Vebe testleri, özellikle çelik liflerin işlenebilirliği olumsuz etkilediğini göstermiştir. 28 günlük kür sonrası yapılan mekanik testlerde, PP liflerin basınç dayanımını düşürme eğiliminde olduğu, buna karşılık S ve WS liflerin bu özelliği arttırdığı gözlemlenmiştir. Tüm lif türleri, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve kırılma enerjisinde önemli iyileşmeler sağlamıştır. Lif ilavesiyle birlikte su emme oranı da artmış; bu artış, en yüksek oranda çelik liflerde gözlenmiştir. WS lifler, mekanik performans açısından S liflerle büyük ölçüde benzer sonuçlar vererek sürdürülebilir bir alternatif olduğunu ortaya koymuştur. Lif ilavesi elastisite modülünde belirgin bir değişikliğe neden olmamıştır. Yüksek sıcaklık aşamasında numuneler 300°C, 600°C ve 900°C'ye maruz bırakılmıştır. Bu koşullarda S ve WS lifler, mikro çatlak ilerlemesini sınırlayarak dayanım kaybını azaltmada etkili olurken, PP lifler yaklaşık 160-170°C'de eriyerek mekanik performansı olumsuz etkilemiştir. Genel olarak, WS lifler, SSB uygulamalarında benzer mekanik ve termal dayanım sağlayan çevre dostu ve maliyet etkin bir alternatif olarak öne çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: Silindirle sıkıştırılmış beton, lif takviyesi, çelik lif, polipropilen lif, atık çelik lif, yüksek sıcaklık performansı, mekanik özellikler
2025, xvii + 93 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE FRESH AND HARDENED PROPERTIES OF FIBER-REINFORCED ROLLER-COMPACTED CONCRETE MIXTURES: EFFECT OF FIBER TYPE, LENGTH, AND DOSAGE

Murteda ÜNVERDİ

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ali MARDANİ

This study comprehensively investigates the effects of fiber type, length, and dosage on the fresh and hardened properties of roller compacted concrete (RCC), as well as its performance under high-temperature exposure. Steel (S), polypropylene (PP), and waste steel (WS) fibers of 30 mm and 60 mm lengths were incorporated at various volume fractions (0-1.25%) to evaluate their influence on workability, mechanical behavior, and durability. Vebe tests indicated that fiber addition, particularly steel fibers, adversely affected consistency. Mechanical tests after 28 days revealed that while PP fibers tended to reduce compressive strength, S and WS fibers enhanced it. All fiber types significantly improved splitting tensile strength, flexural strength, and fracture energy. Water absorption increased across all fiber-reinforced mixes, with steel fibers showing the highest impact. WS fibers demonstrated mechanical performance closely matching that of S fibers, supporting their potential as a sustainable alternative. Modulus of elasticity remained relatively unaffected by fiber inclusion. In the high-temperature phase of the study, specimens were exposed to 300°C, 600°C, and 900°C. WS and S fibers effectively mitigated strength degradation at elevated temperatures by restricting microcrack propagation, while PP fibers lost their reinforcing capacity due to thermal degradation. Overall, WS fibers emerged as an eco-friendly, cost-effective alternative to conventional steel fibers, offering comparable mechanical and thermal resilience in RCC applications.

Key words: Roller compacted concrete, fiber reinforcement, steel fiber, polypropylene fiber, waste steel fiber, high temperature performance, mechanical properties
2025, xvii + 93 pages.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bana maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen herkese teşekkürlerimi arz ederim.

Özellikle, tez konumun belirlenmesi, yürütülmesi ve yazımı aşamalarında çalışmalarıma birçok yönden destek olan, değerli fikirleri ve yönlendirmeleriyle çalışmalarımı kolaylaştıran, hiçbir zaman maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, kıymetli danışman hocam sayın Prof. Dr. Ali MARDANİ'ye,

Değerli fikirleri ve önerileri ile bana yol gösteren ve beni her zaman destekleyen kıymetli hocalarım Prof. Dr. Ahmet BEYCİOĞLU ve Doç. Dr. Bahadır OK'a,

Deneysel çalışmalarım esnasında, fiziki, maddi ve manevi olarak yanımda olan, birçok konuda desteklerini esirgemeyen çalışma arkadaşlarım, Yüksek İnşaat Mühendisi Yahya KAYA'ya, Dr. Sultan Husein BAYQRA'ya, Dr. Veysel KOBYA'ya ve İnşaat Mühendisi Fatih Eren AKGÜMÜŞ'e,

Tez kapsamında kullanılan çimentoyu sağlayan Bursa Beton A.Ş.'ye,

FYL-2025-2186 numaralı proje ile tezimi destekleyen Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne,

Hayatımın her döneminde maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, değerli fikirleriyle ve yönlendirmeleriyle hayatıma ışık tutan, kıymetli annem ve babam başta olmak üzere tüm aile fertlerime,

Son olarak, sabrı ile tez çalışmamın her aşamasında gece gündüz demeden bana her konuda maddi ve manevi destek olan, her zaman işimi kolaylaştıran, ince fikirleriyle bana yol gösteren, varlığıyla huzur bulduğum, değerli eşim Züleyha ÜNVERDİ'ye ve kıymetli ailesine teşekkürü borç bilirim.

Murteda ÜNVERDİ
…./…./…….

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET viii
ABSTRACT ix
TEŞEKKÜR x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ xiii
1. GİRİŞ 1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI 3
2.1. Silindirle Sıkıştırılmış Beton 3
2.2. Konu İle İlgili Yapılan Çalışmalar 3
2.2.1. Genel Çalışmalar 3
2.2.2. İstatistiksel Çalışmalar 7
2.2.3. Geri Dönüştürülmüş Malzeme Kullanımı 10
2.2.4. Lif Kullanımı 18
2.3. Sürdürülebilir Alternatifler: Atık Çelik Lifler 25
2.4. Yüksek Sıcaklık Altında SSB ve LT-SSB Davranışı 26
2.5. Araştırma Boşlukları ve Çalışmanın Önemi 26
3. MATERYAL ve YÖNTEM 28
3.1. Kullanılan Malzemeler 28
3.1.1. Çimento ve Agrega 28
3.1.2. Karışım suyu 30
3.1.3. Lif Türleri ve Özellikleri (Çelik, Polipropilen, Atık Çelik) 30
3.2. Karışım Tasarımı ve Lif Dozajları 31
3.3. Numune Hazırlama ve Kür Koşulları 36
3.4. Deneysel Yöntemler 38
3.4.1. Vebe Kıvam Testi 38
3.4.2. Mekanik Testler (Basınç, Yarmada Çekme, Eğilme, Elastisite Modülü) 38
3.4.3. Su Emme Testi 40
3.4.4. Yüksek Sıcaklık Maruziyeti 40
4. BULGULAR ve TARTIŞMA 41
4.1. Lif Türü, Boyu ve Dozajının SSB'nin Taze Hal Özelliklerine Etkisi 42
4.2. Su Emme Özellikleri 44
4.3. SSB Karışımlarının Mekanik Performansı 46
4.3.1. Basınç Dayanımı 46
4.3.2. Yarmada-Çekme Dayanımı 48
4.3.3. Eğilme Dayanımı 50
4.4. Enerji Yutma Kapasitesi 52
4.5. Elastisite Modülü 56
4.6. Yüksek Sıcaklık Koşullarında Davranış 57
4.6.1. Yüksek Sıcaklık Sonrası Numunelerde Oluşan Yüzeysel Hasar 57
4.6.2. Farklı Sıcaklık Derecelerine Maruz Bırakılan SSB Karışımlarının Basınç Yükü Altındaki Kırılma Davranışlarının Gözlemsel Olarak İncelenmesi 61
4.6.3. SSB Karışımlarının Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı Değişimi 65
4.6.4. SSB Karışımlarının Yüksek Sıcaklık Sonrası Su Emme Kapasitesi Değişimi 72
5. SONUÇ 77
KAYNAKLAR 79

ÖZGEÇMİŞ 92

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
CO_2	Karbondioksit
w	Su içeriği
$m_{yaş}$	Yaş numunenin kütlesi
m_{kuru}	Etüvde kurutulduktan sonra kuru numunenin kütlesi
$\gamma_{yaş}$	Yaş birim hacim ağırlık
m	Yaş numunenin kütlesi
v	Yaş numunenin hacmi
γ_{kuru}	Kuru birim hacim ağırlık
σ	Eğilme dayanımı
F	Uygulanan maksimum yük
L	Kiriş açıklığı
B	Kiriş genişliği
H	Kiriş yüksekliği
α	Kırılma bölgesindeki çentik derinliği
G_F	Kırılma enerjisi
m*	Mesnetler arasındaki kirişin kütlesi
W_0	Yük-deplasman eğrisinin altındaki alan
g	Yerçekimi ivmesi
δ_0	Kiriş deplasmanı
A_{lig}	Açıklığın ortasında etkin kesit alanı
E	Elastisite modülü
σ_1	5×10^{-5} mm/mm gerinim değerine (ε_1) karşılık olan gerilme
σ_2	Nihai dayanımın %40'ı olan gerilme
ε_1	5×10^{-5} mm/mm gerinim değeri
ε_2	σ_2'ye karşılık gelen eksenel gerinim
CaO	Kalsiyum oksit
$Ca(OH)_2$	Kalsiyum hidroksit
H_2O	Su
$CaCO_3$	Kalsiyum karbonat (kireçtaşı)

Kısaltmalar	**Açıklama**
SSB	Silindirle sıkıştırılmış beton
SSBK	Silindirle sıkıştırılmış beton kaplama
LT-SSB	Lif takviyeli silindirle sıkıştırılmış beton
S	Çelik
PP	Polipropilen
WS	Atık çelik
PNSA	Polinaftalin sülfonat süper akışkanlaştırıcı
HS	Hava sürükleyici
NHS	Normal sentetik deterjan bazlı hava sürükleyici
YHS	Yüksek sentetik deterjan bazlı hava sürükleyici
'Rene´-LCPC	Basınçlı paketleme modeli
BaCaRa	Ulusal Fransızca proje yöntemi

KL	Kırıntı lastik
NS	Nano silika
YTY	Yüzey tepki yöntemi
YUK-SSBK	Yüksek oranda uçucu kül ikameli silindirle sıkıştırılmış beton kaplama
UK	Uçucu kül
DYK	Doygun yüzey kuru
XRD	X ışını kırınımı
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
BHA	Birim hacim ağırlık
YFC	Yüksek fırın cürufu
CT	Cam tozu
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat
GDBA	Geri dönüştürülmüş beton agregası
GKAK	Geri kazanılmış asfalt kaplaması
ÇFT	Çimento fırın tozu
BÇT	Beyaz çimento tozu
BD	Basınç dayanımı
YÇD	Yarmada-çekme dayanımı
SEK	Su emme kapasitesi
AK	Ağırlık kaybı

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 1.1.	SSB uygulamaları: A) Gordon barajı (Habib vd., 2021), B) Yol (Khayat & Libre, 2014), C) Liman tesisi (Harrington vd., 2010), D) Havaalanı (Harrington vd., 2010)	2
Şekil 2.1.	İlk serim kaplamasının sıkıştırılması (Pittman, 1986)	4
Şekil 2.2.	Çalışmada kullanılan sıkıştırma ekipmanları (Selvam vd. 2023)	7
Şekil 2.3.	Dayanım sonuçları: A) 28 günlük basınç dayanımı sonuçları, B) 28 günlük yarmada çekme ve eğilme dayanımı sonuçları (Mardani-Aghabaglou & Ramyar, 2013)	11-12
Şekil 2.4.	SSB uygulaması: A) Asfalt finişeri ile SSB dökümü, B) Titreşimli silindir ile kompaksiyon uygulaması (Omran vd., 2017)	15
Şekil 2.5.	Dayanım sonuçları: A) 28 günlük basınç dayanımı sonuçları, B) 28 günlük yarmada çekme ve eğilme dayanımı sonuçları (Lopez-Uceda vd., 2018)	16
Şekil 2.6.	Kontrol karışımları: A) Ara harç uygulamasız 180 dakika bekleme süresi sonunda üretilen 100 donma-çözünme çevrimli karışım, B) Ara harç uygulamalı 60 dakika bekleme süresi sonunda üretilen 300 donma-çözünme çevrimli karışım (Bayqra vd., 2023)	18
Şekil 2.7.	Dayanım sonuçları: A) 28 günlük basınç dayanımı sonuçları, B) 28 günlük yarmada çekme ve eğilme dayanımı sonuçları (Yazici vd., 2015)	19
Şekil 2.8.	Dayanım sonuçları: A) 28 günlük basınç dayanımı sonuçları, B) 28 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçları (Ashteyat vd., 2022)	22
Şekil 3.1.	Karışımlarda kullanılan agregaların tane dağılım eğrisi ve TS 802 standardı ile karşılaştırılması	29
Şekil 3.2.	SSB karışımlarında kullanılan lifler: A) 60 mm S lif B) 30 mm S lif C) 60 mm PP lif D) 30 mm PP lif E) 60 mm WS lif F) 30 mm WS lif	31
Şekil 3.3.	Kontrol karışımına kıyasla su içeriği ile maksimum kuru BHA ilişkileri: A) S lifli karışımlar, B) PP lifli karışımlar, C) WS lifli karışımlar	33-34
Şekil 3.4.	Numune sıkıştırma süreci ve kür koşulları	37
Şekil 3.5.	Eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi test düzeneği	39
Şekil 3.6.	Yüksek sıcaklık dayanımı test prosedürü (Beytekin vd. 2025).	40
Şekil 4.1.	SSB karışımlarının kontrol karışımına göre bağıl Vebe süreleri	42
Şekil 4.2.	SSB karışımlarının kontrol karışımına göre bağıl su emme kapasitesi değerleri	44
Şekil 4.3.	SSB karışımlarının kontrol karışımına göre bağıl basınç dayanımları	46
Şekil 4.4.	SSB numunelerinde çeper etkisi kaynaklı ayrışma	47

Şekil 4.5.	SSB karışımlarının kontrol karışımına göre bağıl yarmada-çekme dayanımları	48
Şekil 4.6.	SSB karışımlarının kontrol karışımlarına göre bağıl eğilme dayanımları	51
Şekil 4.7.	%1,25 oranında S, PP ve WS lif içeren SSB karışımlarının yük-deplasman eğrileri	53
Şekil 4.8.	Eğilme testi sonrası numuneler, A) Kontrol numunesi, B) Lifli numune	54
Şekil 4.9.	SSB numunelerinin kontrol karışımına göre bağıl elastisite modülü değerleri	56
Şekil 4.10.	Yüksek sıcaklık sonrası SSB numunelerinin renk değişimi	58
Şekil 4.11.	900°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra 24 saat boyunca hava koşullarında bekletilen SSB numuneleri	59
Şekil 4.12.	SSB karışımlarında kullanılan 300, 600 ve 900 °C sıcaklığa maruz bırakılan liflerin fiziksel değişimleri	59
Şekil 4.13.	SSB karışımlarında kullanılan A) 300, B) 600 ve C) 900 °C sıcaklığa maruz bırakılan liflerin mikroskop görüntüleri	60
Şekil 4.14.	SSB numunelerinin, 300, 600 ve 900 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanımı testi sonrası kırılma biçimleri, A) WS lif takviyeli karışım, B) PP lif takviyeli karışım	63
Şekil 4.15.	PP lifli karışımda lif erimesi kaynaklı boşluk oluşumu	63
Şekil 4.16.	Tüm SSB karışımlarının kontrol karışımına kıyasla 25°C sıcaklıktaki bağıl basınç dayanımı sonuçları	65
Şekil 4.17.	Lif fazlalığından kaynaklanan kümelenmeler ve çatlak oluşumları, A) çelik lifli karışım, B) WS lifli karışım	66
Şekil 4.18.	Farklı sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin 25 °C'deki numunelere kıyasla bağıl basınç dayanımı A) 300, B) 600 ve C) 900 °C	66-67
Şekil 4.19.	Liflerin matris ile kompakt bir yapı oluşturması, A) çelik lif, B) atık çelik lif	70
Şekil 4.20.	300 °C maruz bırakılmış PP lifli karışımlar, A) lif erimesi kaynaklı boşluk, B) ozmotik basınç kaynaklı çatlak	70
Şekil 4.21.	600 °C sıcaklığa maruz bırakılmış karışımlarda liflerin matristeki görünümü, A) S lifli karışım, B) WS lifli karışım, C) PP lifli karışım	71
Şekil 4.22.	900 °C sıcaklığa maruz bırakılmış SSB karışımlarında agregaların parçalanması, A) Kontrol karışımı B) S lifli karışım, C) WS lifli karışım, D) PP lifli karışım	72
Şekil 4.23.	Tüm SSB karışımlarının kontrol karışımına kıyasla 25°C sıcaklıktaki bağıl su emme sonuçları	73
Şekil 4.24.	Farklı sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin 25°C'deki numunelere kıyasla bağıl su emme kapasitesi A) 300, B) 600 ve C) 900 °C	73-74

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizelge 2.1.	Süper akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkıların SSB'nin basınç dayanımı üzerindeki etkisi (Chhorn & Lee, 2018)	5
Çizelge 2.2.	YUK-SSBK model validasyonu (Adamu vd., 2018)	9
Çizelge 2.3.	Çalışmada tasarlanmış olan karışımlar (Mardani-Aghabaglou & Ramyar, 2013)	11
Çizelge 2.4.	Bazı Avrupa ülkelerinde ve Türkiye'de ortaya çıkan ton bazında atık lastik miktarları ve geri dönüştürülen miktarları (ETRMA, 2021)	14
Çizelge 2.5.	Literatürdeki bazı çalışmalar	24
Çizelge 3.1.	CEM I 42.5 R tipi çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri	28
Çizelge 3.2.	Agregaların fiziksel özellikleri	30
Çizelge 3.3.	SSB karışımlarında kullanılan liflerin özellikleri	31
Çizelge 3.4.	SSB karışımlarının bazı özellikleri ve teorik karışım oranları (kg/m^3)	35
Çizelge 3.5.	1 m^3 SSB üretiminde kullanılan düzeltilmiş karışım oranları (kg/m^3)	36
Çizelge 4.1.	Test ve deney sonuçları	41
Çizelge 4.2.	SSB karışımlarının basınç dayanımı/yarmada-çekme dayanımı oranları	50
Çizelge 4.3.	SSB karışımlarının kırılma enerjileri	54
Çizelge 4.4.	SSB karışımlarının su emme kapasiteleri, basınç dayanımları ve ağırlık kayıpları	64

1. GİRİŞ

1980'li yılların başında geliştirilen silindirle sıkıştırılmış beton (SSB), ekonomik avantajları, kolay uygulanabilirliği ve zorlu çevre koşullarına karşı yüksek dayanımı sayesinde büyük ilgi görmüştür (Hashemi vd., 2018; Bayqra vd., 2022). Geleneksel betondan daha düşük su/çimento (s/ç) oranı ve kuru kıvamı ile ayrılan SSB, hidratasyon ısısının düşük olması nedeniyle termal çatlama riskini önemli ölçüde azaltmaktadır (Williams, 2014; Sarsam vd., 2014). Bu özellikleri, büyük ölçekli projelerde hızlı üretim ve yerleştirme imkânı sunarak SSB'yi uygun bir tercih haline getirmektedir.

SSB; baraj, yol, liman tesisi ve havaalanı gibi yüksek taşıma gücü ve durabilite performansı gerektiren yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 1.1). SSB, yüksek basınç dayanımına sahip olmasına rağmen kırılgan bir yapıya sahiptir ve düşük çekme dayanımı sebebiyle enerji yutma kapasitesi sınırlı kalmaktadır (Islam & Gupta, 2016; Mardani vd., 2016). Bu sınırlamaları aşmak amacıyla, son yıllarda lif takviyeli beton teknolojileri ön plana çıkmıştır. Lif takviyesi; sünekliği arttırmakta, çatlak oluşumunu geciktirmekte ve darbe dayanımını yükseltmektedir (Banthia & Gupta, 2004; Yoo vd., 2015). Buna bağlı olarak, çelik (S), polipropilen (PP), cam, plastik, karbon ve geri dönüştürülmüş çeşitli lif türleri betonun mekanik ve dayanım özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanılmaktadır.

Altyapı ihtiyaçlarının artmasının yanı sıra, yangın güvenliği ve yüksek sıcaklık etkileri de yapı malzemelerinin tasarımında kritik hale gelmiştir. Özellikle enerji santralleri, ulaşım tesisleri ve endüstriyel yapılar gibi yüksek sıcaklık maruziyetinin söz konusu olduğu yapılarda, SSB'nin termal kararlılığını ve mikro yapısal bütünlüğünü koruması gerekmektedir (Agra vd., 2021; Shen vd., 2024). Ancak, literatürde SSB'nin yüksek sıcaklıktaki davranışı, özellikle 100°C üzerindeki sıcaklıklar için yeterince araştırılmamıştır.



Şekil 1.1. SSB uygulamaları: A) Gordon barajı (Habib vd., 2021), B) Yol (Khayat & Libre, 2014), C) Liman tesisi (Harrington vd., 2010), D) Havaalanı (Harrington vd., 2010)

Bu çalışma, S, PP ve atık çelik (WS) liflerinin SSB üzerindeki etkilerini hem mekanik hem de yüksek sıcaklık dayanımı yönünden inceleyerek literatürdeki boşluklara ışık tutmayı amaçlamaktadır. Çalışmada, sürdürülebilir bir alternatif olan WS liflerin kullanılabilirliği kıyaslamalı olarak incelenmiştir. İki farklı lif boyu (30 mm ve 60 mm) ve %0 ile %1,25 arasında değişen hacimsel oranlarda lif içeren, lif takviyeli SSB (LT-SSB) karışımları üretilmiş, karışımların taze hal özellikleri ile birlikte basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımları, elastisite modülü ve su emme oranları hem ortam sıcaklığında hem de 900°C'ye kadar yükseltilmiş sıcaklıklarda test edilmiştir.

Bu çalışmanın sonuçları, SSB'nin mekanik özelliklerini, mikro yapısal bütünlüğünü ve yangın direncini arttırmak amacıyla uygun lif tipi ve dozajının belirlenmesine yönelik önemli bilgiler sağlamaktadır. Böylece dayanıklı ve sürdürülebilir altyapı malzemelerinin geliştirilmesine katkıda bulunulmaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Silindirle Sıkıştırılmış Beton

Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB), düşük su/çimento oranına sahip, kuru kıvamlı bir beton türü olup asfalt serim ekipmanları ile yerleştirilmekte ve titreşimli silindirlerle sıkıştırılmaktadır. SSB, yüksek basınç dayanımı, düşük geçirgenlik özellikleri ve büyük ölçekli altyapı projelerinde sunduğu ekonomik avantajlarla dikkat çekmektedir (Mardani-Aghabaglou, 2011; Shamsaei vd., 2017). SSB'nin, üretiminden sonraki 35-45 dakika içinde sıkıştırma işleminin tamamlanması gerekmektedir. Aksi durumlarda, segregasyon, soğuk derz oluşumu ve mukavemet kayıpları gibi çeşitli sorunlar meydana gelebilmektedir (Yaman & Ceylan, 2013).

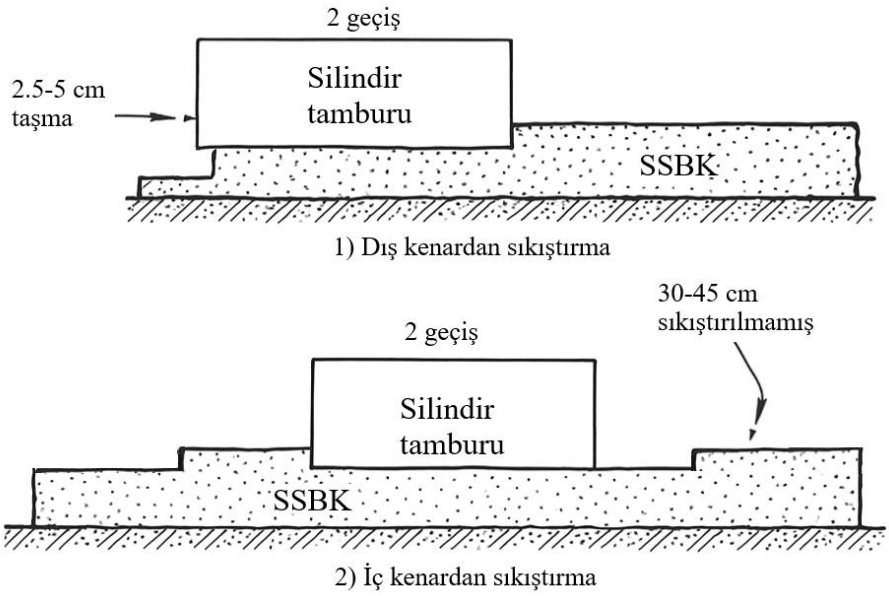
Geleneksel betonlara kıyasla SSB, %40'a varan maliyet tasarrufu sağlayabilmekte ve aynı zamanda inşaat sürelerini önemli ölçüde kısaltabilmektedir (Naik vd., 2001; Berry & Tayabji, 2001). Ancak SSB'nin kırılgan yapısı ve düşük çekme dayanımı gibi yapısal zayıflıkları, özellikle dinamik yükler altında performansını sınırlamakta; bu durum, lif kullanımı gibi ilave güçlendirme yöntemlerinin uygulamasını gerekli kılmaktadır.

2.2. Konu İle İlgili Yapılan Çalışmalar

2.2.1. Genel Çalışmalar

Literatürde, SSB ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Pittman (1986), silindirle sıkıştırılmış beton kaplamalar (SSBK) için inşaat süreçlerini, zemin ve temel tabakası hazırlığı, karıştırma, taşıma, serme, sıkıştırma ve kürleme aşamalarını kapsayacak şekilde kapsamlı biçimde tanımlamıştır. Çalışmada, nükleer yoğunluk ölçer kullanılarak yerinde yoğunluk kontrolü yapılması ve 3 metrelik mastarla düzgünlüğünün değerlendirmesi gibi kalite kontrol uygulamalarına özel önem verilmiştir. Ayrıca, taze, soğuk ve yatay derzlerin inşasına yönelik yöntemler ayrıntılı olarak açıklanmış; agrega nem içeriği ile beton santralinin günlük kalibrasyonunun sağlanmasının, kalite güvencesi açısından kritik olduğu vurgulanmıştır. Çalışma sonucunda, SSBK uygulamalarının geleneksel beton kaplamalara kıyasla inşaat maliyetlerini üçte bire kadar azaltabileceği belirtilmiş;

uygulamanın başarılı olabilmesi için yüklenici firma ve kalite kontrol personelinin yeterli düzeyde eğitilmesinin gerekliliği ifade edilmiştir. Şekil 2.1'de Pittman (1986) tarafından önerilen sıkıştırma sürecine ilişkin şematik bir gösterim sunulmaktadır.



Şekil 2.1. İlk serim kaplamasının sıkıştırılması (Pittman, 1986)

Chhorn vd. (2017), SSBK'lara yönelik karışımların kıvam özelliklerine odaklanan bir çalışma gerçekleştirmiştir . Karışımların optimum işlenebilirlik düzeyini belirlemek için Vebe testi uygulanmıştır. Bu test kapsamında, titreşim etkisi altında harç halkasının oluşma süresi ölçülmüştür. Araştırmada iki farklı test yöntemi kullanılmıştır: A Yöntemi (yük uygulamalı) ve B Yöntemi (yük uygulamasız). Elde edilen bulgular, optimum Vebe süresinin hem istenen uygulanabilirliğin sağlanması hem de genel performans açısından kritik bir parametre olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, çalışmada, yüzeyin görsel olarak düzgün görünmesinin SSBK'nın kalite düzeyini güvenilir biçimde yansıtmadığı ifade edilmiş ve karışım tasarımının iyileştirilmesine yönelik olarak yeni agrega gradasyon bantlarının geliştirilmesi önerilmiştir.

Wang vd. (2018), SSB karışımlarının dinamik davranışını incelemek amacıyla Split Hopkinson Basınç Çubuğu sistemi kullanarak deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Farklı çaplardaki silindirik numuneler, yüksek gerinim hızlarında yüklemeye tabi

tutulmuş ve dinamik basınç dayanımı ile gerinim hızı duyarlılığı değerlendirilmiştir. Karşılaştırma amacıyla kuazi-statik basınç testleri de uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, agrega boyutu arttıkça dinamik dayanımın azaldığını ve SSB'nin geleneksel betona kıyasla gerinim hızındaki değişimlerden daha az etkilendiğini ortaya koymuştur. Çalışma kapsamında, deneysel veriler doğrultusunda dinamik artış faktörlerinin tahmini ampirik formüller de önermişlerdir.

Chhorn & Lee (2018), ASTM C1435 standardına uygun olarak titreşimli tokmak ile sıkıştırılan numuneler üzerinde SSB'nin basınç dayanımını etkileyen faktörleri incelemişlerdir. Çalışmada agrega gradasyonu, çimento ve su içeriği, sıkıştırma enerjisi, kür koşulları ve katkı maddelerinin etkileri değerlendirilmiş; ayrıca, ıslak kür uygulaması ile hava kürüne karşılık yöntemler karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, ıslak kürün daha iyi sonuçlar verdiğini ve yüksek çimento içeriğinin, su içeriğindeki olumsuz etkileri hafiflettiğini göstermiştir. Ayrıca, polinaftalin sülfonat süper akışkanlaştırıcı (PNSA), normal sentetik deterjan bazlı hava sürükleyici (NHS) ve yüksek sentetik deterjan bazlı hava sürükleyici (YHS) gibi katkı maddelerinin, işlenebilirliği artırdığı ve böylece daha uzun çalışma süreleri sağladığı vurgulanmıştır. Katkıların SSB'nin basınç dayanımına etkileri, Çizelge 2.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Süper akışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkıların SSB'nin basınç dayanımı üzerindeki etkisi (Chhorn & Lee, 2018)

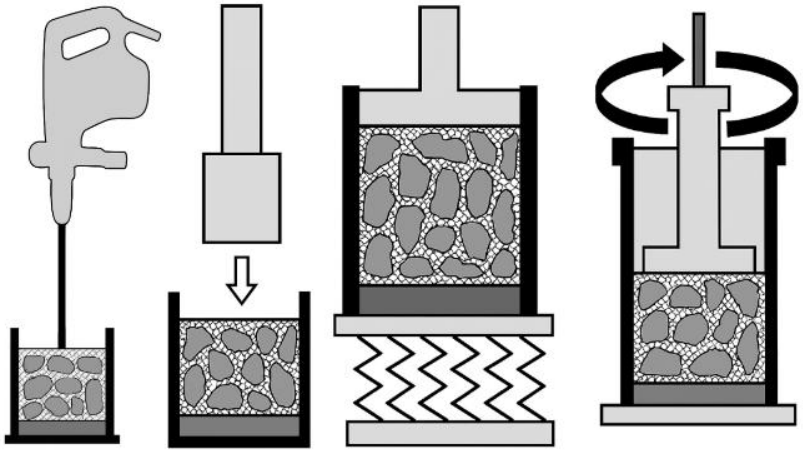
Karışım	HS tipi	HS içeriği (%)	PNS içeriği (%)	28 günlük ortalama basınç dayanımı (MPa)
Kontrol	Hiçbiri	0	0	34,77
PNSA0,1-NHS0,05	NHS	0,05	0,1	31,50
PNSA0,1-NHS0,1		0,1	0,1	30,93
PNSA0,1-YHS0,05	YHS	0,05	0,1	32,90
PNSA0,1-YHS0,1		0,1	0,1	29,23

Wu vd. (2020a), hava sürükleyici katkıların (HS) SSB'nin performansı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bu çalışmada, farklı bağlayıcı içerikleri, HS dozajları, işlenebilirlik seviyeleri ve sıkıştırma teknikleri kullanılarak hazırlanan dokuz farklı hava sürüklenmiş SSB karışımının basınç dayanımı ve gözenek yapısı detaylı şekilde incelenmiştir. İkinci aşamada ise, çekme dayanımı, elastisite modülü ve geçirgenlik gibi

mekanik özellikler ile donma-çözünme dayanımı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, HS'nin kuru SSB'de hava içeriği üzerinde sınırlı etkisi olduğunu ve basınç dayanımı ile aşınma direncinde küçük düşüşlere neden olduğunu göstermiştir. İşlenebilirlik üzerindeki en etkili faktörün gözenek yapısı ve hava kabarcığı oluşumu olduğu belirlenmiştir.

Shafigh vd. (2020), su içeriğinin SSBK'nin işlenebilirliği ve mekanik performansı üzerindeki etkisini araştırmıştır. %4,5, %5, %5,5, %6, %6,5, ve %7 gibi farklı nem içeriklerinde SSBK'nin mühendislik özellikleri incelenmiştir. Bu kapsamda, Modifiye Vebe testi kullanılarak, kıvam ölçümleri yapılmış ve 1, 7 ve 28-günlük basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımı gibi mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Su içeriği arttıkça Vebe süresinin azaldığı, dayanımın düştüğü ve porozitenin arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, optimum su içeriği %5,7 olarak elde edildiği, ancak en yüksek mekanik performansın %5 su içeriğinde elde edildiği vurgulanmıştır.

Selvam vd. (2023), farklı sıkıştırma teknikleri (titreşimli tokmak, modifiye proktor, titreşimli tabla ve döner sıkıştırıcı) kullanılarak hazırlanan SSBK'nin iç yapısını dijital görüntü işleme yöntemiyle analiz etmişlerdir. Bu çalışmada, interpartikül mesafe, agrega segregasyonu ve çatlak uzunluğu gibi özellikler değerlendirilmiş; en yoğun ve homojen agrega yapısının titreşimli tokmak ile sağlandığı, modifiye proktor ile sıkıştırmanın ise daha fazla agrega kırılmasına neden olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, segregasyonu değerlendirmek amacıyla yeni indeksler önerilmiş ve laboratuvar tekniklerinin çoğunun saha koşullarını tam anlamıyla yansıtamadığı sonucuna varılmıştır. Çalışmada kullanılan sıkıştırma ekipmanları Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Çalışmada kullanılan sıkıştırma ekipmanları (Selvam vd. 2023)

Selvam & Singh (2023), SSBK tasarımında laboratuvar ve saha sıkıştırma tekniklerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada, dört farklı yöntem (titreşimli tokmak, modifiye proktor, titreşimli tabla, döner sıkıştırıcı) kullanılarak taze hal yoğunluğu, basınç dayanımı, yarmada-çekme dayanımı, eğilme dayanımı, kayma direnci ve aşınma direnci gibi özellikler değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, modifiye proktor ile yapılan sıkıştırmanın saha koşullarını en iyi şekilde yansıttığını göstermiştir. Ayrıca, titreşimli tokmak ile gerçekleştirilen sıkıştırma işleminin ise performansa dayalı sonuçlarda büyük oranda benzerlik gösterdiği belirlenmiştir. Buna karşılık, döner sıkıştırıcı kullanıldığında ise benzerlik oranının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmalar, sıkıştırma mekanizmasının porozite ve dayanım üzerindeki etkisini vurgulamış ve güvenilir numune üretimi için %0,98'in üzerinde sıkışma derecesine ulaşılmasının önemli olduğunu önermektedir.

2.2.2. İstatistiksel Çalışmalar

Zdiri vd. (2008), SSB'nin dayanım özelliklerini optimize etmek amacıyla hem teorik hem de deneysel yöntemleri karşılaştırmışlardır. Çalışmada, optimum sıkılık, Basınç Paketleme Modeli olan "Rene´-LCPC" kullanılarak belirlenmiş, çekme dayanımı ise Oluokun Modeli ile tahmin edilmiştir. Ayrıca, SSB karışımları Feret, de Larrard ve Tondat gibi farklı modeller kullanılarak simüle edilmiştir. Deneysel çalışmalar ise Ulusal Fransızca Proje Yöntemi (BaCaRa) esas alınarak hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilen basınç ve Brezilya çekme dayanımı testleriyle yapılmıştır. Sonuçlar,

uygun bir agrega gradasyonunun seçilmesi ve hamur kalınlığının minimize edilmesinin, basınç dayanımını arttırmada kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, teorik modeller ile elde edilen deneysel sonuçlar iyi bir uyum göstermiş ve basınç/çekme dayanımı oranının yaklaşık olarak 8–9 arasında olduğu belirlenmiştir.

Mohammed & Adamu (2018), kırıntı lastik (KL) ve nano silika (NS) içeren beton karışımının mekanik performansını incelemişlerdir. İnce agregaya hacimsel olarak dört farklı oranda KL (%0, %10, %20 ve %30) ve ağırlıkça dört farklı oranda NS (%0, %1, %2 ve %3) ilavesi içeren on altı karışım hazırlanmış ve test edilmiştir. Çalışmada, silindirle sıkıştırılmış lastik betonun sıkıştırma işlemi, ASTM C1435 standardına uygun olarak Bosch marka bir titreşimli tokmak ile gerçekleştirilmiş, taze hal özellikleri Vebe testi ve yoğunluk hesaplamalarıyla değerlendirilmiştir. Ayrıca, basınç dayanımı (BS 12390-3:2009) ve yarmada-çekme dayanımı (BS EN 12390-6:2009) testleri yapılmıştır. Dayanım tahmin modelleri geliştirmek amacıyla Yüzey Tepki Yöntemi (YTY) kullanılmıştır. Bulgular, KL içeriğinin artmasıyla hem basınç hem de çekme dayanımının azaldığını, buna karşılık NS ilavesiyle bu özelliklerin iyileştiğini göstermektedir. En uygun karışımın %10 KL ve %1,13 NS içerdiği belirlenmiş ve bu karışımın en iyi dayanım ve su emme özellikleri sunduğu sonucuna varılmıştır.

Adamu vd. (2018), yüksek oranda uçucu kül ve NS içeren yüksek performanslı silindirle sıkıştırılmış beton karışımlarını (YUK-SSBK) geliştirmişler ve bu karışımların optimizasyonu için YTY kullanmışlardır. Çalışmada, tasarlanan numuneler 50 Hz frekansında çalışan bir titreşimli tokmak ile sıkıştırılmış ve farklı kür sürelerinde standart mekanik testler uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, basınç, yarmada-çekme ve eğilme dayanımlarına ilişkin modellerin yüksek tahmin doğruluğu gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, en iyi performansın, ince agrega hacminin %10'unun KL ile çimento hacminin %53,72'sinin uçucu kül (UK) ile ikame edilmesi ve %1,22 oranında nano silika eklenmesiyle elde edildiği belirlenmiştir. Bulgular, KL'nin dayanımı azalttığını, ancak NS'nin tüm mekanik özellikleri önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Model tahminleri ile deneysel sonuçlar, Çizelge 2.2'de sunulmuştur ve bu bilgiler, yüksek performanslı YUK-SSBK'nin geliştirilmesinde yol gösterici olmuştur.

Çizelge 2.2. YUK-SSBK model validasyonu (Adamu vd., 2018)

Yanıt	Kırıntı lastik (%)	Uçucu kül (%)	Nano silika (%)	Tahmin sonucu	Deneysel sonuç	Hata (%)
Basınç dayanımı (MPa)	10	53,72	1,22	44,46	42,87	3,71
	15	60	1,5	35,05	37,11	5,55
	20	55	1	36,18	37,95	4,64
Eğilme dayanımı (MPa)	10	53,72	1,22	6,13	5,88	4,25
	15	60	1,5	6,29	5,97	5,36
	20	55	1	6,04	5,81	3,96
Yarmada çekme dayanımı (MPa)	10	53,72	1,22	4,01	3,83	4,70
	15	60	1,5	3,56	3,72	4,30
	20	55	1	3,47	3,36	3,27

Ahmadi vd. (2021), alt tabakası SSB ve üst tabakası Portland çimento esaslı beton veya lif takviyeli Portland çimento betonu olan çift tabakalı beton kaplamaların kırılma ve mekanik performansını incelemişlerdir. Çalışmada, kırılma tokluğunu değerlendirmek amacıyla çentikli kirişler üzerinde üç noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Ayrıca, farklılıkların istatistiksel olarak analiz edilmesi için ANOVA ve Tukey'in ikili karşılaştırma testleri kullanılmıştır. İşlenebilirlik değerlendirmeleri ASTM C143 standardına göre yapılırken, SSB'nin kıvamı Vebe cihazı ile ölçülmüştür. Sonuçlar, %0,4 polipropilen lif katkısının eğilme ve basınç dayanımı üzerinde sınırlı etkisinin olduğunu, ancak lifli tabakanın kalınlığını artırmanın kırılma enerjisini önemli ölçüde yükselttiğini ortaya konmuştur. Bu bulgular, lif katkısının kırılma ve genel mekanik performansı iyileştirmede etkili olabileceğine işaret etmektedir.

Liang vd. (2022a), çok ölçekli PP lif içeren SSB'nin basınç davranışını tek eksenli basınç testleriyle detaylı bir şekilde incelemişlerdir. Çalışmada, standart bir matris karışım tasarımı kullanılarak ince ve kalın PP liflerin optimum oranları belirlenmiştir. Mekanik analizlerde Çin beton tasarım yönetmeliğine uygun olarak elasto-plastik hasar bağıntılı bir model benimsenmiştir. Ayrıca, lif kombinasyonlarının optimizasyonu için YTY uygulanmıştır. Elde edilen bulgular, hibrit liflerin basınç tokluğunu ve şekil değiştirme kapasitesini önemli ölçüde arttırdığını ortaya koymuştur. Çalışmanın sonuçları, çok ölçekli lif etkisi fonksiyonunun lif kombinasyonlarının rolünü doğru şekilde ortaya yansıttığını ve mekanik performansın tahmini ile optimizasyonuna önemli bir katkı sağladığını göstermiştir.

2.2.3. Geri Dönüştürülmüş Malzeme Kullanımı

Cao vd. (2000), Portland çimentosu, II. Sınıf UK ve kırılmış dolomit agregaları kullanarak yüksek oranlı UK katkısının SSB'nin performansına etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, sıkıştırma yoğunluğunun %96'nın üzerinde sağlanması amacıyla süper ikame yöntemi uygulanmıştır. Mekanik testlerde tasarım kriteri olarak eğilme dayanımı esas alınmıştır. Elde edilen bulgular, UK oranının artmasının erken yaş dayanımlarını düşürdüğünü, ancak zamanla önemli dayanım artışları sağladığını göstermiştir. Özellikle 90 gün sonunda UK'nın toplam dayanımın %50'sinden fazla katkı sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, çimento miktarının azalmasına bağlı olarak hidratasyonda meydana gelen gecikmenin performans düşüklüğüne neden olmasına rağmen, uzun vadede önemli faydalar sunduğu vurgulanmıştır. Bu sonuçlar, UK kullanımının SSB'nin sürdürülebilirliğini artırmak için etkili bir strateji olduğunu ortaya koymaktadır.

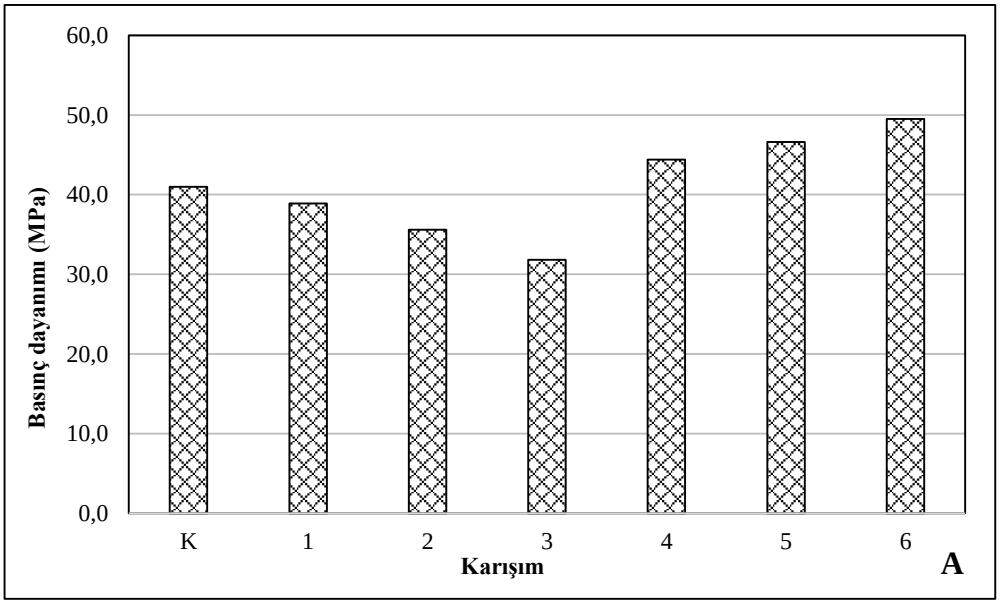
Mardani-Aghabaglou vd. (2013), maksimum yoğunluk yöntemiyle tasarlanan yüksek oranlı uçucu kül (YUK) SSB karışımlarının bazı durabilite performansıincelemişlerdir. Çalışmanın ilk aşamasında, 28 farklı karışım optimum su içeriği için test edilmiş ve bunlardan 7 karışım durabilite testlerine tabi tutulmuştur. Testler kapsamında su emme, geçirimlilik, su işleme derinliği, dinamik elastisite modülü ve 90 günlük donma-çözünme testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, çimento yerine UK kullanımı geçirgenliği ve donma-çözünme kaynaklı kütle kaybını arttırırken, UK'nın agrega ile ikame edilmesi bu özelliklerde önemli iyileşmeler sağlamıştır. Ayrıca, su emme ile diğer durabilite göstergeleri arasında güçlü doğrusal ilişkiler tespit edilmiştir. Bu bulgular, UK'nın agrega ikamesi olarak kullanılmasının, SSB'nin uzun süreli performansını artırmak için etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymuştur.

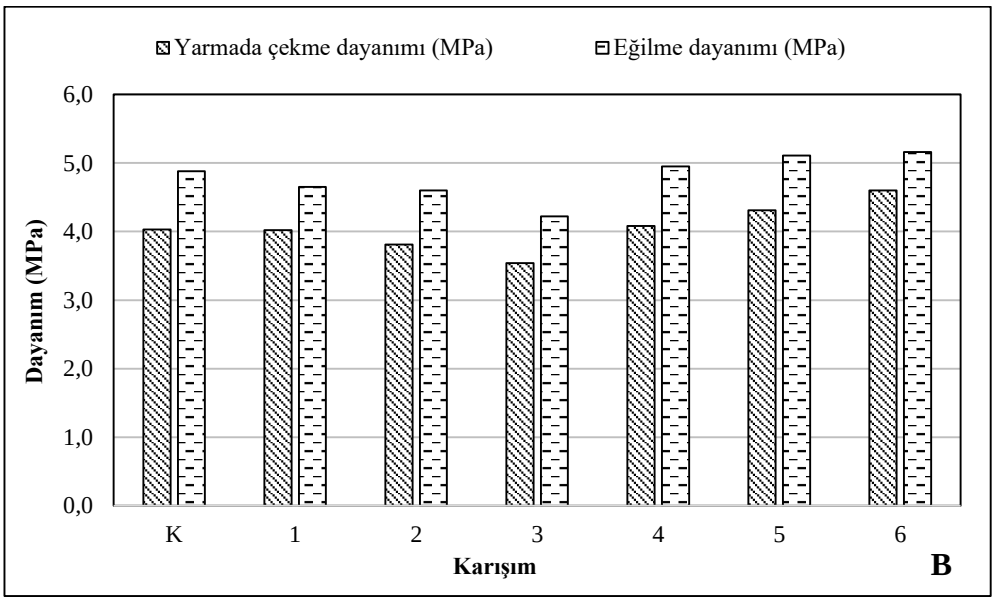
Mardani-Aghabaglou & Ramyar (2013), maksimum yoğunluk yöntemiyle tasarlanan YUK-SSB'nin mekanik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Çalışmada, 28 farklı karışım optimum su içeriği için test edilmiş ve bunlardan 7 karışım farklı yaşlarda basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımı açısından analiz edilmiştir. Çalışmada tasarlanan karışımlar, Çizelge 2.3'de sunulmuştur. Üretilen karışımların 28 günlük basınç dayanımı ile yarmada çekme ve eğilme dayanımı sonuçları ise Şekil 2.3'de sunulmuştur. Sonuçlar,

çimento yerine UK ikamesinin gerekli su/bağlayıcı oranını artırdığını ve erken yaş dayanımını düşürdüğünü göstermiştir. Bununla birlikte, agrega yerine UK ikamesi, artan su içeriğine rağmen sıkıştırılabilirliği ve mekanik performansı önemli ölçüde iyileştirmiştir. Özellikle %60 çimento ikamesi durumunda, 7. günde 28 günlük dayanımın yalnızca yarısına ulaşılmış, ancak zamanla dayanım gelişimi dengelenmiştir.

Çizelge 2.3. Çalışmada tasarlanmış olan karışımlar (Mardani-Aghabaglou & Ramyar, 2013)

Karışım	Çimento (kg/m^3)	Uçucu kül (kg/m^3)	Doygun yüzey kuru (DYK) agrega (kg/m^3)			Su/çimento
			0-5 mm	5-15 mm	15-25 mm	
K	250	0	1263	429	432	0,39
1	200	50	1248	424	427	0,40
2	150	100	1235	419	422	0,43
3	100	150	1209	410	413	0,46
4	250	50	1185	402	405	0,41
5	250	100	1107	376	379	0,43
6	250	150	1020	346	349	0,47





Şekil 2.3. Dayanım sonuçları: A) 28 günlük basınç dayanımı sonuçları, B) 28 günlük yarmada çekme ve eğilme dayanımı sonuçları (Mardani-Aghabaglou & Ramyar, 2013)

Chi & Huang (2014), SSB'de ince agrega yerine akışkan yatak külünün kullanımını incelemişlerdir. Yatak külü, ağırlıkça farklı dozajlarda (%5, %10 ve %15) ince agrega yerine ikame edilmiştir. Çalışmada, karışımların Vebe değeri ve su emme (ASTM C642), özellikleri değerlendirilmiştir. Karışımların mikro-yapı analizi ise X ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçları ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, akışkan yatak külünün su emme oranını arttırmasına rağmen, yüksek kalsiyum oksit ve kükürt trioksit içeriği sayesinde mekanik özellikleri ve sülfat direncini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Çalışmanın sonucunda, en uygun ikame oranı %5 olarak belirlenmiş ve önerilen sıkıştırma basıncı 75 g/cm^2 olarak raporlanmıştır.

Meddah vd. (2014), atık lastik agrega kullanımının SSBK'nın performansına etkisini değerlendirmek amacıyla %0 ile %30 aralığında değişen ikame oranlarda atık lastik içeren karışımlar hazırlamıştır. Çalışmada, ASTM C1176 standardına uygun vibrasyonlu tablalı sıkıştırma yöntemiyle hazırlanan numunelerin 7, 14 ve 28 günlük kür sürelerinde basınç, eğilme ve çekme dayanımları ölçülmüştür. Buna ek olarak, birim hacim ağırlık ve su emme kapasitesi ölçülmüştür. Lastik kullanımı ile karışım sünekliğinin arttığı ve sıkıştırma süresinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Rao vd. (2016), SSB'de öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) kullanımının mekanik-dayanım/aşınma direnci ilişkisini multidisipliner bir yaklaşımla analiz etmişlerdir. Çimentonun altı çeşit (%10, %20, %30, %40, %50 ve %60) öğütülmüş YFC ile kısmen ikame edildiği yedi farklı SSB karışımı hazırlanmıştır. Deneysel program kapsamında, 3-90 gün aralığında kürlenen numunelerde basınç dayanımının zamanla değişimi izlenirken, aşınma performansı hem Cantabro kayıp testi hem de ASTM C944 uyumlu döner çelik disk metodolojisiyle eşzamanlı olarak değerlendirilmiştir. Bulgular, YFC içeren karışımlarda erken yaş (3-7 gün) basınç dayanımının kontrol numunelere kıyasla daha düşük seyretmesine rağmen 90. günde önemli mertebede dayanım artışları gözlendiğini ortaya koymuştur. Aşınma direncinin, tüm deney gruplarında basınç dayanımıyla güçlü bir korelasyon sergilediği tespit edilmiştir. Ayrıca, kür süresinin performans üzerinde belirleyici olduğu ve Cantabro testinin farklı YFC seviyelerinin aşınma dayanımını ayırt etmekte etkili olduğu vurgulanmıştır.

Fakhri vd. (2016), atık lastik parçacıkları ve silis dumanı (SD) kullanımının SSB karışımlarının dayanım ve su emme kapasitesine etkisini incelemişledir. Lastik parçacıkları agrega yerine %0, %5, %10 ... ve %35 oranlarında kullanılmıştır. Ayrıca, SD katkısı sekiz farklı karışımda %5-10 oranında çimento ile ikame edilmiştir. Araştırmacılar, ASTM D1557-91 standardına uygun modifiye proktor yöntemiyle optimize edilen agrega granülometrisini takiben, BS 1881 protokolüne uygun şekilde basınç ve eğilme dayanım testlerini gerçekleştirmiştir. Deneysel bulgular sonucunda, lastik parçacıklarının matris içinde yayıldığı ve kırılma fazının geciktirilmesini sağladığını, buna paralel olarak %5-10 silis dumanı ilavesinin ise kompozitlerin basınç ve eğilme dayanımını %9'a kadar yükselterek hibrit bir takviye mekanizması oluşturduğunu ortaya koymuştur. Hidrofobik karakterdeki bu ikili katkı sisteminin, su emme kapasitesinde kontrol grubuna kıyasla yaklaşık %0.6'lık azalmaya yol açtığı gözlemlenmiştir. Avrupa Lastik ve Kauçuk Üreticileri Birliği (2021) verileriyle desteklenen Çizelge 2.4, bu bulguların endüstriyel ölçekteki ekonomik fizibilitesini vurgulayarak yıllık 2.1 milyon ton atık lastiğin inşaat malzemelerinde geri kazanım potansiyeline işaret etmektedir.

Çizelge 2.4. Bazı Avrupa ülkelerinde ve Türkiye'de ortaya çıkan ton bazında atık lastik miktarları ve geri dönüştürülen miktarları (ETRMA, 2021)

Ülke	Atık lastik	Geri dönüştürülen			
		Malzeme			Enerji
		İnşaat mühendisliği, bayındırlık işleri & dolgu	Geri dönüştürülen (*)	Toplam geri dönüştürülen	Enerji kazanımı (**)
Almanya	434 000	-			
Avusturya	74 000	-	46 000	46 000	28 000
Belçika	81 325	-	75 163	75 163	2153
Bulgaristan	40 800	-	26 000	26 000	1500
Çek Cumhuriyeti	93 037	-	34 194	34 194	32 849
Finlandiya	61 060	56 802	10 733	67 535	5958
Fransa	422 579	38 354	184 003	222 357	223 054
Hollanda	87 746	-	79 933	79 933	7813
İspanya	238 080	202	158 125	158 327	79 753
İsveç	93 532	3013	24 623	27 636	65 896
İtalya	384 000	842	170 000	170 842	170 000
Polonya	268 500	-	127 000	127 000	84 000
Portekiz	72 421	744	46 499	47 243	30 915
Romanya	51 413	-	544	544	50 869
Türkiye	277 509	-	129 619	129 619	69 009

***Öğütmeye gönderilen (%75) ve inorganik içeriğin çimento üretimine dahil edilen (%25) miktarları içermektedir

****Çimento fırınına gönderilen lastiklerin %75'inin çimento fırınlarında çimento ile birlikte işlenmesini içermektedir

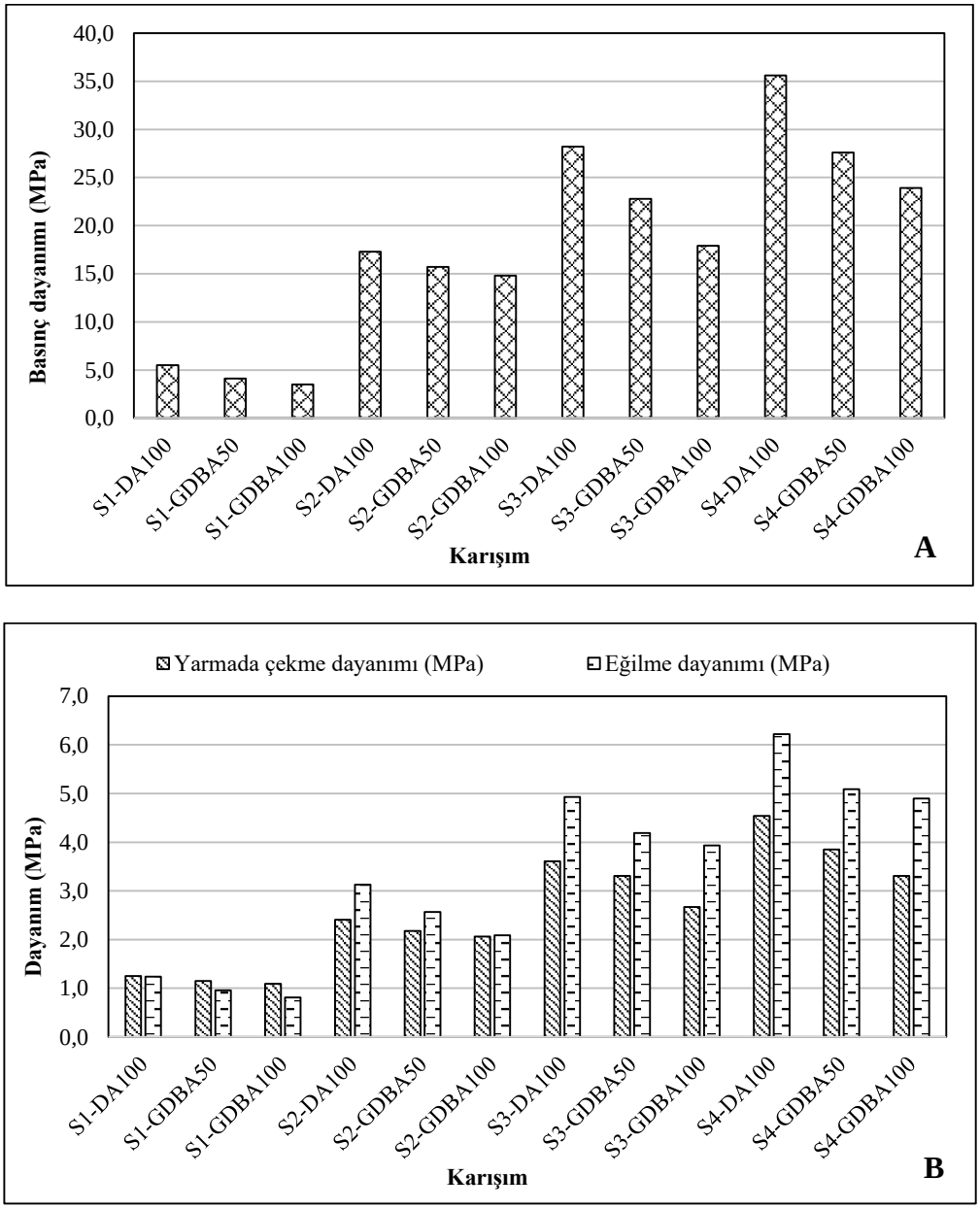
Omran vd. (2017), SSB karışımlarında çimento ikamesi olarak %20 cam tozu (CT) kullanımının performansını değerlendirmek amacıyla saha koşullarında deneysel bir çalışma yürütmüştür. Çalışmada, taze hal özelliklerinin karakterizasyonu için sıcaklık ve birim hacim ağırlık (BHA) ölçümleri ASTM D-1557 standardına uygun gerçekleştirilmiştir. Basınç ve eğilme dayanımı testleri ise silindir ile küp num uneler üzerinde ASTM C39 ve C496 standartlarına uygun olarak test edilmiştir. Ayrıca, kesilmiş küp numuneler ile donma-çözünme direnci ölçülmüştür. Deneysel veriler, CT kullanımının rtan puzolanik reaktivite yoluyla yoğun kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) matrisi oluşumunu teşvik ettiğini ve bu sayede 90 günlük kür süresinde referans

numunelere kıyasla %28 daha yüksek basınç dayanımı sağladığını ortaya koymuştur.. CT katkılı SSB, özellikle zorlu iklim koşullarında durabilite bakımından üstün performans göstermiştir. Çalışmaya ait SSB saha çalışması Şekil 2.4'de sunulmaktadır.



Şekil 2.4. SSB uygulaması: A) Asfalt finişeri ile SSB dökümü, B) Titreşimli silindir ile kompaksiyon uygulaması (Omran vd., 2017)

Lopez-Uceda vd. (2018), geri dönüştürülmüş beton agregası (GDBA) içeren SSB karışımlarının mekanik performansını incelemişlerdir. Çalışma kapsamında üretilen karışımlarda kullanılan 4 farklı oranda çimento miktarları, S1: 110, S2: 175, S3:250 ve S4: 350 kg/m^3 şeklinde adlandırılmıştır. Bununla birlikte, %100 doğal agrega (DA) içeren ve 110 kg/m^3 çimento ile üretilen karışım "S1-DA100" şeklinde, %50 geri dönüştürülmüş beton agregası içeren ve 175 kg/m^3 çimento ile üretilen karışım "S2-GDBA50" şeklinde isimlendirilmiştir. Farklı GDBA oranları ve çimento içerikleriyle 12 karışım hazırlanmıştır. Basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımları arasında korelasyonlar geliştirilmiştir. Farklı su içeriklerinde karışımların kompaksiyon özellikleri modifiye proktor deneyiyle belirlenmiştir. Eğilme dayanımı ve kuruma-büzülme testleri çalışma kapsamında önerilen laboratuvar döküm yöntemleriyle test edilmiştir. Üretilen karışımların 28 günlük basınç dayanımı ve eğilme ile yarmada çekme dayanımı sonuçları Şekil 2.5'de sunulmuştur. GDBA'nın iri agrega yerine tamamen ikame edilmesinin, 175 kg/m³ çimento içeriği ile düşük dayanımlı yol uygulamaları için uygun olduğu vurgulanmıştır. Ancak daha yüksek dayanım gereksinimlerinde kısmi GDBA kullanımı ve çimento dozajının arttırılması gerektiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 2.5. Dayanım sonuçları: A) 28 günlük basınç dayanımı sonuçları, B) 28 günlük yarmada çekme ve eğilme dayanımı sonuçları (Lopez-Uceda vd., 2018)

Debbarma vd. (2019), SSBK karışımlarında geri kazanılmış asfalt kaplaması (GKAK) agregalarının kullanım fizibilitesini değerlendirmişlerdir. Farklı taze hal, mekanik ve durabilite performansına dayalı olarak SSBK için optimum oranıyla (%50 ve %100) birlikte optimum GKAK fraksiyonunu (kaba, ince ve toplam) incelenmiştir. Standart koşullarda mekanik performans test edilmiş ve üretilen numuneler asidik ortama maruz bırakılarak durabiliteleri analiz edilmiştir. Çekme dayanımı testi IS5816 standardına göre

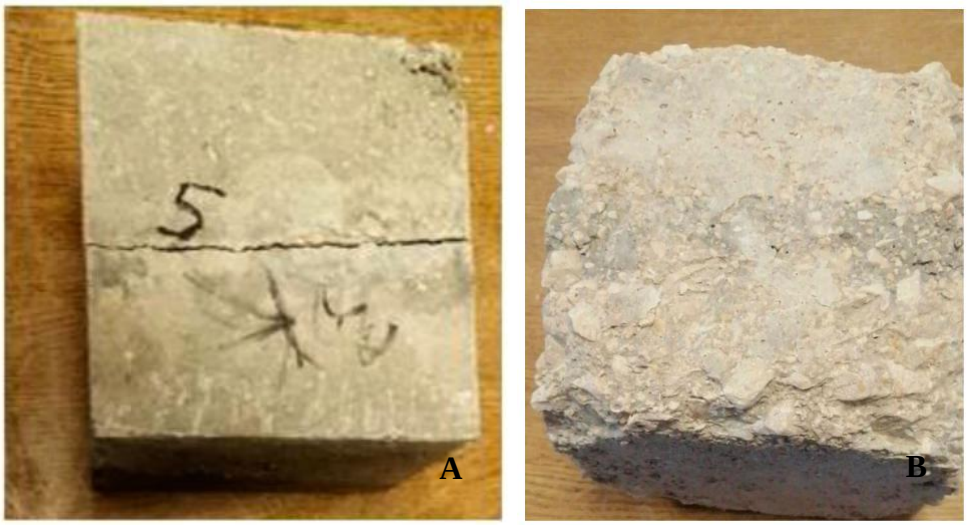
yapılmış ve 20 kg ağırlıklı titreşimli sıkıştırma işlemi uygulanmıştır. Sonuç olarak, ince taneli GKAK gradasyonu kullanılan karışımlarda, iri taneli GKAK gradasyonu kullanılan karışımlara göre daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. %100 GKAK kullanımı dışında tüm karışımlar minimum dayanım gerekliliklerini sağlamıştır. GKAK kullanımının kırılma sonrası tokluk ve taşıma kapasitesini arttırdığı belirtilmiştir. Buna ek olarak üretim maliyetini yaklaşık %45 oranında azalttığı vurgulanmıştır.

Fardin & Santos (2020), SSB'de GDBA kullanımını incelemişlerdir. Farklı GDBA ilave oranlarında (%0, %5, %15 ve %30) dört SSB karışımı üretilmiştir. Karışımlar maksimum yoğunluk yöntemine göre hazırlanmış ve sıkıştırılmıştır. Basınç, yarmada çekme, eğilme dayanımı, elastisite modülü, porozite ve su emme gibi mekanik özellikler değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, GDBA'nın iri agrega olarak etkili şekilde kullanılabileceği, %30 oranındaki GDBA ikamesinin yalnızca %6 basınç dayanımı kaybına yol açtığı görülmüştür. Ancak, GDBA'nın daha yüksek oranlarda kullanımının mekanik performansı önemli ölçüde düşürdüğü bildirilmiştir.

Bayqra vd. (2022), YUK-SSBK'nın mekanik ve fiziksel özelliklerini laboratuvar ve saha ortamlarında incelemişlerdir. Numuneler ara katman harçlı ve harçsız olarak hazırlanmış, laboratuvarda titreşimli tokmak ile, sahada ise çelik plaka ile sıkıştırılmıştır. Basınç ve yarmada çekme dayanımı ile su emme testleri yapılmıştır. Sonuç olarak, UK ikamesinin Vebe süresini azaltıp bağlayıcı içeriğini arttırarak işlenebilirliği olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Çimento yerine UK ikamesi su/bağlayıcı oranını arttırıp dayanımı düşürmüştür. Ancak, UK'nın agrega yerine ikame edildiğinde dayanımı arttırdığı vurgulanmıştır. Ara katman harç uygulaması, saha uygulamalarında laboratuvara kıyasla daha olumlu sonuçlar vermiştir.

Bayqra vd. (2023), UK içeren SSB tabakalarının gecikmeli yerleştirilmesinin etkisini incelemişlerdir. Soğuk derz oluşumunu incelemek amacıyla ikinci tabaka 0, 60, 120 ve 180 dakika sonra yerleştirilmiş; tabakalar arasına 1 cm kalınlığında tesviye harcı uygulanmıştır. Bu uygulamanın su emme ve donma-çözünme direncine etkisi değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, gecikme süresi arttıkça su emme kapasitesinin yükseldiği gözlemlenmiş ancak harç uygulaması bu olumsuz etkiyi azaltmıştır. Ara harç

kullanılan karışımların durabilite faktörlerinde 60'ın üzerinde değerler elde edilmiş ve yeterli seviyede donma-çözünme direnci göstermiştir. Çalışma kapsamında kontrol karışımına ait harç uygulanan ve uygulanmayan, farklı bekleme süreleri ve donma-çözünme çevrimleri uygulanmış numuneler Şekil 2.6'da sunulmuştur.



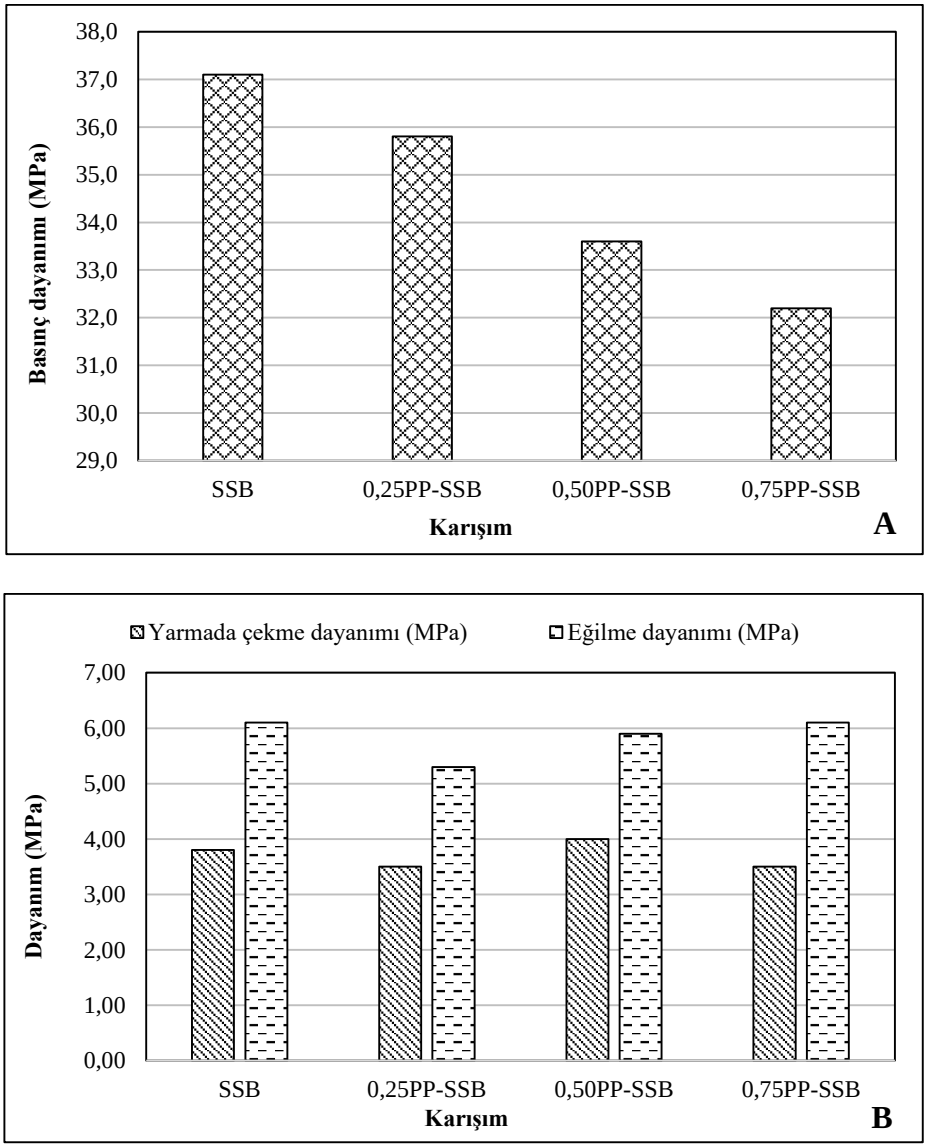
Şekil 2.6. Kontrol karışımları: A) Ara harç uygulamasız 180 dakika bekleme süresi sonunda üretilen 100 donma-çözünme çevrimli karışım, B) Ara harç uygulamalı 60 dakika bekleme süresi sonunda üretilen 300 donma-çözünme çevrimli karışım (Bayqra vd., 2023)

2.2.4. Lif Kullanımı

Lif takviyesi, SSB'nin sünekliğinin düşük olması ve sınırlı enerji yutma kapasitesi gibi zayıflıklarını iyileştirmek amacıyla yaygın bir çözüm olarak kullanılmaktadır. Lifler, çatlak oluşumunu ve ilerlemesini engelleyerek taşıma kapasitesi arttırabilmektedir. Bunun yanında, süneklik ve darbe dayanımını arttırdığı da bilinmektedir (Banthia & Gupta, 2004; Yoo vd., 2015). Çelik (S), polipropilen (PP), cam, plastik, karbon gibi farklı lif türleri farklı düzeylerde performans iyileştirmeleri sunmaktadır. Literatürde, SSB üretiminde lif kullanılan çalışmalara ait bazı örnekler aşağıda sunulmuştur.

Yazici vd. (2015), PP lif içeren SSB'nin mekanik özellikleri ve darbe dayanımı üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Kontrol karışımına ek olarak %0,25, 0,50 ve 0,75 oranında PP lif içeren karışımların optimum su içeriği ve maksimum kuru BHA'sını

belirlemek amacıyla ASTM C1435'e göre kompaksiyon testleri gerçekleştirilmiştir. EN 12390 standardına göre elastiside modülü testi yapılmıştır. Farklı kür sürelerinde basınç ve yarmada çekme dayanımı testleri uygulanmıştır. Üretilen SSB numunelerinin 28 günlük basınç dayanımı ve eğilme ile yarmada çekme dayanımı sonuçları Şekil 2.7'de sunulmuştur. Sonuçlara göre, PP lif kullanımının su ihtiyacını arttırarak s/ç oranını yükselttiği ve mekanik dayanımda %20 düşüşe sebep olduğu görülmüştür. Ancak lif ilavesinin, kırılma öncesi süneklik ve toklukta önemli iyileşmeler sağladığı vurgulanmıştır.



Şekil 2.7. Dayanım sonuçları: A) 28 günlük basınç dayanımı sonuçları, B) 28 günlük yarmada çekme ve eğilme dayanımı sonuçları (Yazici vd., 2015)

Benouadah vd. (2017), farklı miktarlarda PP lif içeren SSB'nin fiziksel ve mekanik davranışını incelemişlerdir. Altı farklı lif dozajı (0 ila 2.5 kg/m³) kullanılmış ve optik mikroskop ile görüntüleme işlemi yapılarak liflerin çimento matrisi içinde etkin şekilde dağıldığı doğrulanmıştır. Çalışma kapsamında yoğunluk, işlenebilirlik, rötre, su emme, basınç dayanımı ve çekme dayanımı ölçülmüştür. Sonuçlara göre, 1 kg/m^3 lif takviyesi basınç dayanımını %23 arttırdığı ancak daha yüksek lif içeriklerinde yoğunluk ve işlenebilirliğin olumsuz etkilendiği bildirilmiştir. Ek olarak, liflerin varlığının rötreyi önemli ölçüde azalttığı vurgulanmıştır.

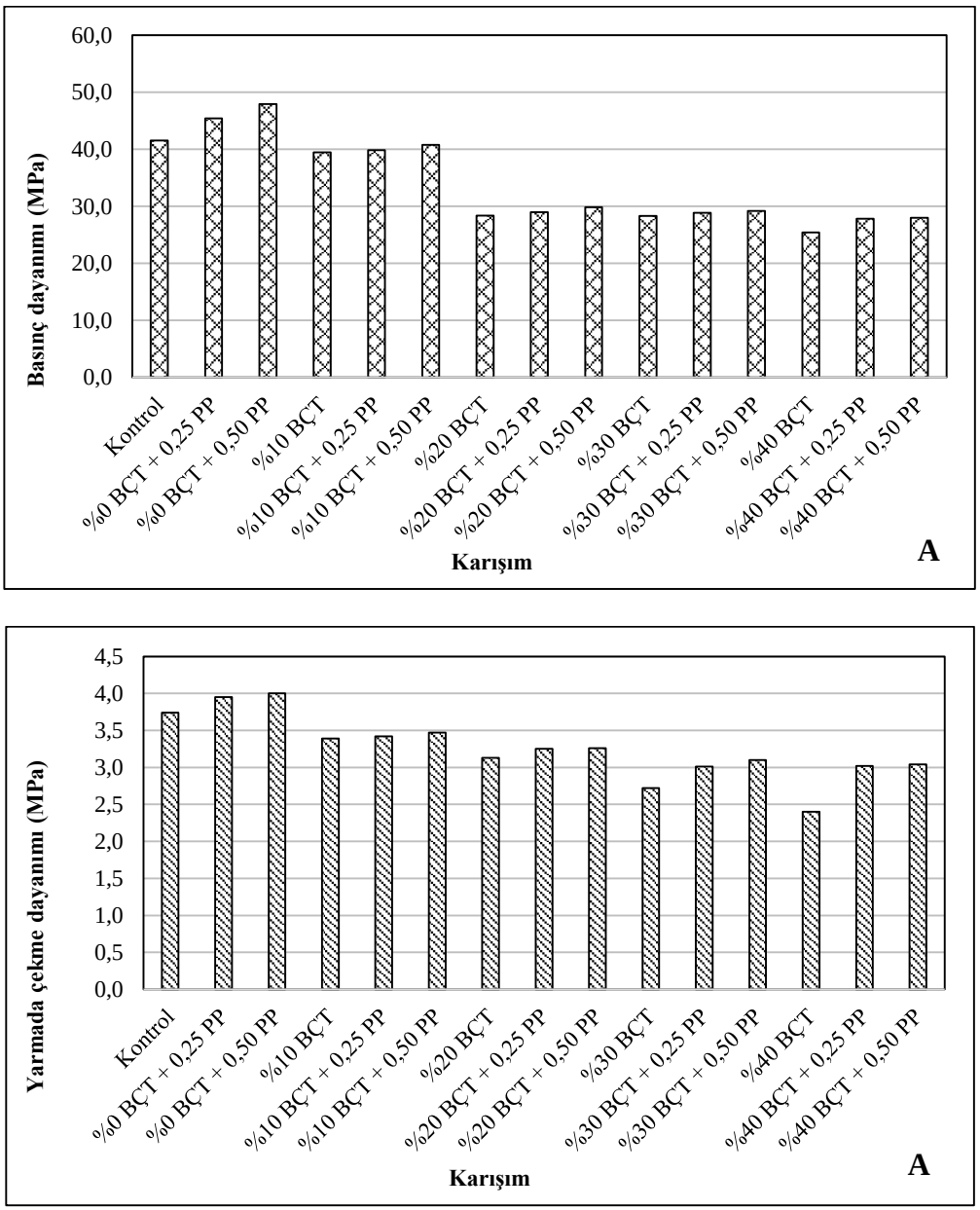
LaHucik vd. (2017), makro liflerin SSB'nin mekanik davranışına etkisini araştırmışlardır. Çeşitli lif geometrilerine sahip dördü sentetik ve ikisi çelik olmak üzere altı lif türü, iki dozaj seviyesinde (hacimce %0,2 ve %0,4) SSB karışımlarına dahil edilmiştir. Çalışma kapsamında, ASTM C39, C496 ve C469 standartlarına göre basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve elastisite modülü testleri uygulanmıştır. Eğilme performansı, dört noktalı yükleme ile ASTM C1609'a göre değerlendirilmiş; kırılma özellikleri ise disk şekilli kompakt gerilme testleri ile analiz edilmiştir. Optimum su içeriği, modifiye proktor testi ile belirlenmiştir. Sonuçlara göre, sentetik lifli karışımlarda basınç dayanımı ve BHA değerlerinde artış görüldüğü, çelik lifli karışımlarda daha yüksek yarmada çekme dayanımı elde edildiği bildirilmiştir. Lif takviyesi ile kırılma direncinde iyileşme sağlandığı ancak eğilme dayanımı üzerinde önemli bir iyileşme görülmediği vurgulanmıştır.

Haghnejad & Modarres (2021), geri dönüştürülmüş PP liflerle güçlendirilmiş SSBK'nin donma-çözünme çevrimleri ve mekanik yüklemeler altındaki performansını değerlendirmişlerdir. SSBK numuneleri, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6 olmak üzere dört s/ç oranı ve 0, 1, 3 ve 5 kg/m^3 olmak üzere dört lif takviyesi ile tasarlanmıştır. Karışımların işlenebilirliği, modifiye Vebe testi ile ölçülmüş; dinamik elastisite modülü, donma-çözünme öncesi ve sonrası ultrasonik darbe hızı ile değerlendirilmiştir. Eğilme dayanımı, eğilme modülü testleri ile; yorulma direnci ise statik ve çevrimsel yükleme altında üç noktalı eğilme ile analiz edilmiştir. Sonuçlara göre, s/ç oranının durabilitede belirleyici olduğu ve 0.3 s/ç oranının performansta düşüşe sebep olduğu görülmüştür. En uygun lif

dozajı 1 kg/m^3 olarak belirlenmiş, 5 kg/m^3 gibi yüksek dozajlarda ise işlenebilirlik ve sıkışma sorunları nedeniyle SSBK'nın performansında düşüş gerçekleştiği bildirilmiştir.

Al-Tameemi & Mahdi (2021), farklı PP lif içerikleriyle (%0,04, 0,1, 0,5, 1 ve 2,5) güçlendirilmiş, çimentonun çimento fırın tozu (ÇFT) ile kısmi olarak ikame edildiği SSB'nin özellikleri incelenmiştir. Optimum su içeriği ve kuru BHA, ASTM D1557-12'ye göre modifiye proktor testiyle belirlenmiş; numuneler hem titreşimli tabla hem de statik silindir ile sıkıştırılmıştır. Kür işlemi kontrollü nem koşullarında yapılmıştır. Mekanik performansı incelemek adına eğilme ve basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda, %0,1 PP lif takviyesinin özellikle %5–10 ÇFT ile birlikte kullanıldığında mekanik özellikleri optimum şekilde iyileştirdiği bulunmuştur. Daha yüksek lif dozajlarının, kuru BHA ve dayanımda azalmalara sebep olduğu bildirilmiştir. Ek olarak, ÇFT'nin beton uygulamalarında yeniden kullanılmasının çevresel faydaları vurgulanmıştır.

Ashteyat vd. (2022), PP lif takviyesinin ve beyaz çimento tozu (BÇT) ikamesinin SSB'ye etkilerini incelemişlerdir. Çimentonun kısmen (%10, 20, 30 ve 40) BÇT ile ikame edildiği ve iki oranda (%0,25 ve 0,5) polipropilen lif takviyesinin yapıldığı on beş SSB karışımı üretilmiştir. Üretilen silindir ve küp numuneler 7 ve 28 gün kürlenmiştir. Çalışma kapsamında, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü ve ultrasonik darbe hızı testleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen karışımların 28 günlük basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı sonuçları Şekil 2.8'de sunulmuştur. Su emme ve donma-çözünme direnci ile SSB'nin durabilitesi değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, BÇT'nin %30'a kadar çimento yerine ikame edilebileceği ve mekanik özellikleri önemli ölçüde azaltmadığı görülmüştür. PP lif takviyesinin, hem dayanımı hem durabiliteyi arttırdığı ve tüm karışımlarda durabilite faktörü açısından 60'ın üzerinde değer elde edildiği aktarılmıştır. Ek olarak, BÇT kullanımının ekonomik ve çevresel faydaları vurgulanmıştır.



Şekil 2.8. Dayanım sonuçları: A) 28 günlük basınç dayanımı sonuçları, B) 28 günlük yarmada çekme dayanımı sonuçları (Ashteyat vd., 2022)

Sukontasukkul vd., (2019), çelik lif takviyeli SSBK'nin mekanik davranışını araştırmışlardır. Karışımlarda %0,5 ve 1,0 oranlarında iki ucu kancalı çelik lif kullanılmıştır. Taze hal özelliklerini değerlendirmek amacıyla Vebe testi gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında basınç dayanımı ile eğilme dayanımı testleri gerçekleştirilmiş ve eğilme tokluğu değişimi incelenmiştir. Sonuçlara göre, lif takviyeli silindirle sıkıştırılmış beton kaplamanın (LT-SSBK) su ihtiyacının ve BHA'nın

SSBK'den biraz daha yüksek olduğu bildirilmiştir. Bunun yanında, lif takviyesi arttıkça basınç dayanımının %1-2 oranında azaldığı aktarılmıştır. Ayrıca, çelik lif takviyesi sonucunda eğilme dayanımı ve tokluk özelliklerinde önemli ölçüde iyileşmeler görüldüğü bildirilmiştir. Ek olarak, tüm mekanik özelliklerin kür süresi ile doğrusal olarak arttığı vurgulanmıştır.

Sharbatdar & Rahmati (2022), çelik, polimer ve plastik gibi çeşitli lif türlerinin SSBK'nin mekanik ve fonksiyonel özelliklerine çok yönlü etkilerini araştırmışlardır. Toplam 17 lif takviyeli beton karışımı dikkate alınmıştır. Taze haldeki betonun işlenebilirliği Vebe testi ile değerlendirilmiştir. Sertleşmiş beton özellikleri olarak basınç dayanımı, elastisite modülü, eğilme ve çekme dayanımı, darbe direnci, elektriksel direnç ve kayma direnci test edilmiştir. Kırılma parametreleri, üç noktalı eğilme testleri ile belirlenmiştir. Sonuç olarak, çelik lif takviyesinin basınç, eğilme ve çekme dayanımlarını sırasıyla %27, %83 ve %25'e kadar arttığı bildirilmiştir. Lif takviyeleri ile, özellikle çelik liflerde taze haldeki karışımın performansını azalttığı ancak birçok mekanik ve durabilite özelliğini iyileştirdiği bildirilmiştir. Polimer liflerin büyük oranda olumlu veya olumsuz etkisi olmadığı aktarılmıştır. Ek olarak, lif takviyeli SSBK'nin taze ve sertleşmiş performans kriterlerinin optimum şekilde tasarlanması gerektiği vurgulanmıştır.

Lif takviyeli beton sistemleri üzerine yapılan araştırmalar, basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımlarında, aşınma ve yangın direncinde belirgin gelişmeler sağlandığını göstermektedir (Nia vd., 2012; Shah vd., 2022; Behnood vd., 2009). SSB özelinde yürütülen birçok deneysel çalışmada da farklı lif tipleri ve dozajlarının etkileri incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda genellikle PP ve S lifler kullanıldığı görülmektedir. SSB çalışmalarında en sık kullanılan bu lif türleri dikkate alınarak çalışmalardan seçilmiş örnekler, kullanılan lif türü, oranı ve gözlemlenen etkiler açısından Çizelge 2.5'de özetlenmiştir.

Çizelge 2.5. Literatürdeki bazı çalışmalar

Kaynak	İncelenen Özellikler	Çimento (kg/m³)	Lif Türü	İkame Oranı	Gözlemler
Üte (2008)	Basınç, eğilme ve çekme dayanımı	300	Polipropilen	%0.25-0.75	Basınç dayanımında %15 artış; eğilme/çekme dayanımında çok küçük artış
Neocleous vd. (2011)	Basınç ve eğilme dayanımı	300	Çelik, geri dönüştürülmüş çelik lastik teli	50-150 kg/m³	Eğilme dayanımında artış, basınç dayanımında hafif azalma
Madhkhan vd. (2012)	Basınç ve eğilme dayanımı	274	Çelik ve PP	Çelik: %0.4-0.8, PP: %0.1	Basınç dayanımında çelikte %38 ve PP'de %20 artış; eğilmede azalma
Benouadah vd. (2017)	Vebe testi, mekanik dayanımlar	299	Polipropilen	0.5-2.5 kg/m³	Vebe süresi ve tüm dayanım özelliklerinde artış
LaHucik vd. (2017)	Basınç, çekme, eğilme, elastisite modülü	282	PP, modifiye olefin, çelik	%0.2-0.4	Çelik lifler ile eğilme dayanımında artış; olefin ve PP lifler ile düşüş
Jafarifar vd. (2017)	Mekanik özellikler	300	Kancalı, çift konili, geri dönüştürülmüş çelik	%2-6	Geri dönüştürülmüş lifte dayanımda artış; diğerlerinde yüksek lif dozajında dayanımda düşüş
Sukontasukkul vd. (2019)	Vebe testi, basınç ve eğilme dayanımı	264	Çelik	%0.5-1.0	Vebe süresi ve eğilme dayanımında artış; basınç dayanımında hafif azalma
Kolase & Desai (2019)	Mekanik özellikler	325	Üçgen kesitli PP	%0.25-0.75	Eğilme dayanımında %11-19 artış; yüksek lif dozajında basınç dayanımında azalma
Haghnejad & Modarres (2021)	Donma-çözülme, eğilme dayanımı	281	Geri dönüştürülmüş PP	1-5 kg/m³	Vebe süresi ve yorulma direncinde artış; eğilme dayanımında hafif azalma
Sharbatdar & Rahmati (2022)	Mekanik özellikler	350	Çelik, plastik	%0.11-0.40	Tüm dayanım özelliklerinde %2-65 arasında artış
Jahanbakhsh vd. (2022)	Mekanik özellikler	299	PP, poliolefin	2-4 kg/m³	Basınç, eğilme ve çekme dayanımlarında %5-17 artış
Kessal vd. (2022)	Dayanım, aşınma, donma-çözülme	268	Hurma lifi	%0.1-0.5	Basınç dayanımında %13-53 azalma
Liang vd. (2022b)	Mekanik özellikler	456	Mikro & makro PP	0.9-6 kg/m³	Basınç ve çekme dayanımlarında artış
Yildizel vd. (2022)	Mekanik özellikler	260	Bazalt	%0.5-1.25	Basınç ve eğilme dayanımında %12-34 artış
Ozturk & Ozyurt (2022)	Dayanım, elastisite modülü	300	Çelik ve PP	%0.5	Çelik lif ile dayanımda artış, PP lif dayanım ve elastisite modülünde azalma

Verilere göre, lif tipi ve dozajının, SSB'nin performansını önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. S liflerin genellikle basınç ve eğilme dayanımı arttırdığı, tokluk özelliklerini iyileştirdiği anlaşılmıştır. Bunun yanında, yük altında çatlak oluşumunu ve çatlak ilerlemesini engelleyerek enerji yutma kapasitesinde ciddi oranda iyileşmeler sağlayabildiği görülmüştür. Ancak, yüksek dozajlarda S lif kullanımı hem basınç

dayanımında düşüşlere sebep olabilmekte hem de işlenebilirliği olumsuz etkileyebilmektedir.

PP liflerin ise düşük dozajlarda, çatlak ilerlemesini önleyerek genellikle eğilme dayanımını bir miktar arttırdığı anlaşılmıştır. Ancak, PP liflerin agregaya kıyasla daha hafif ve yumuşak olmasından kaynaklı olarak genellikle basınç dayanımını bir miktar düşürdüğü birçok çalışmada vurgulanmıştır. Bunun yanında, PP lifler yüksek dozajlarda, beton içinde topaklanmaya sebep olabilmekte ve buna bağlı olarak betonun mekanik performansında düşüşe yol açabilmektedir. SSB'de lif kullanımı üzerine yapılan çalışmalarda özellikle, modifiye edilmiş veya atık liflerin, mekanik performansa sağladığı kazanımlar sayesinde sürdürülebilirlik hedefleri arasında denge kurabildiği ortaya konmaktadır.

2.3. Sürdürülebilir Alternatifler: Atık Çelik Lifler

SSB'de çelik lif kullanımı yapısal dayanım açısından avantaj sağlasa da, özellikle büyük ölçekli uygulamalarda çelik üretiminin karbon ayak izi önemli bir çevresel sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Literatürde, sadece yol kaplaması uygulamalarında çelik lif üretiminin metrekare başına 10 kg'dan fazla CO_2 emisyonuna neden olduğu belirtilmektedir (Jahanbakhsh vd., 2023).

Bu nedenle endüstriyel atıklardan elde edilen atık çelik (WS) lifler giderek daha fazla tercih edilmektedir. WS lifleri, hem betonda istenen dayanımı koruyarak hem de çevresel etkiyi azaltarak döngüsel ekonomi ilkelerine katkıda bulunmaktadır (Kilic & Gokce, 2021; Liang vd., 2022b). Yapılan araştırmalar, WS liflerin betonun yorulma dayanımı ve uzun dönem performansı üzerinde olumlu etkiler gösterdiğini ortaya koymaktadır (Hejazi vd., 2016; LaHucik vd., 2017).

2.4. Yüksek Sıcaklık Altında SSB ve LT-SSB Davranışı

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonun davranışı, serbest ve bağlı suyun kaybı (100-300°C), kalsiyum hidroksitin kimyasal olarak ayrışması (400-600°C) ve C-S-H jelinin bozulması (>600°C) gibi mikro yapısal değişimlere dayanmaktadır (Mahmoud vd., 2023). Bu değişiklikler, betonun gözenek hacmini arttırarak çatlak oluşumuna ve mekanik dayanımda düşüşlere yol açabilmektedir.

Lif takviyeli betonların yüksek sıcaklık performansı incelendiğinde, yüksek genleşme katsayısına sahip PP liflerinin, özellikle düşük sıcaklıklarda termal çatlamayı geciktirdiği ve yangın dayanımını arttırdığı bilinmektedir (Hejazi vd., 2016; Naveen vd., 2023). S lifler ise, hem düşük sıcaklıklarda hem de yüksek sıcaklık altında betonda meydana gelen hasarların etkilerini azaltmakta ve mekanik performansta önemli iyileştirmeler sağlayabilmektedir (Novák & Kohoutková, 2017; Shen vd., 2024).

Mikroskobik görüntüleme yöntemleriyle yapılan mikro yapı analizleri, bu alanda derinlemesine bilgi sağlayabilmektedir (Wu vd., 2020b; Gong vd., 2023; Beytekin vd., 2025). Bununla birlikte, literatürde 300-900°C gibi yangın koşullarını temsil eden sıcaklık aralıklarında LT-SSB ile ilgili detaylı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

2.5. Araştırma Boşlukları ve Çalışmanın Önemi

Lif takviyeli geleneksel beton üzerine kapsamlı araştırmalar yapılmış olsa da, SSB özelinde aşağıdaki boşluklar dikkat çekmektedir:

- Yüksek sıcaklık altında farklı lif tiplerinin ve uzunluklarının etkisine dair karşılaştırmalı verilerin eksikliği
- Sürdürülebilir lif alternatiflerinin (ör. WS) performans analizlerinin sınırlı oluşu
- SSB özelinde mekanik performansa yönelik mikro yapısal destekleyici analizlerin eksikliği

Bu tez çalışmasında, S, PP ve WS lifler ile güçlendirilmiş SSB karışımlarının taze ve sertleşmiş hal özellikleri, normal ve yüksek sıcaklık koşullarında hem mekanik hem de mikro yapısal olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamlı değerlendirme, yangına dayanıklı, sürdürülebilir ve yüksek performanslı altyapı malzemelerinin geliştirilmesine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Çimento ve Agrega

Bu çalışmada bağlayıcı olarak, EN 197-1 standardına uygun CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimento, yüksek erken dayanım özelliği sayesinde SSB uygulamaları için oldukça sık tercih edilen bir çimento türüdür. Hızlı priz alma ve dayanım kazanımı sayesinde, özellikle trafik yüklerine erken maruz kalan yol kaplamaları, depo zeminleri ve endüstriyel saha betonlarında tercih edilmektedir.

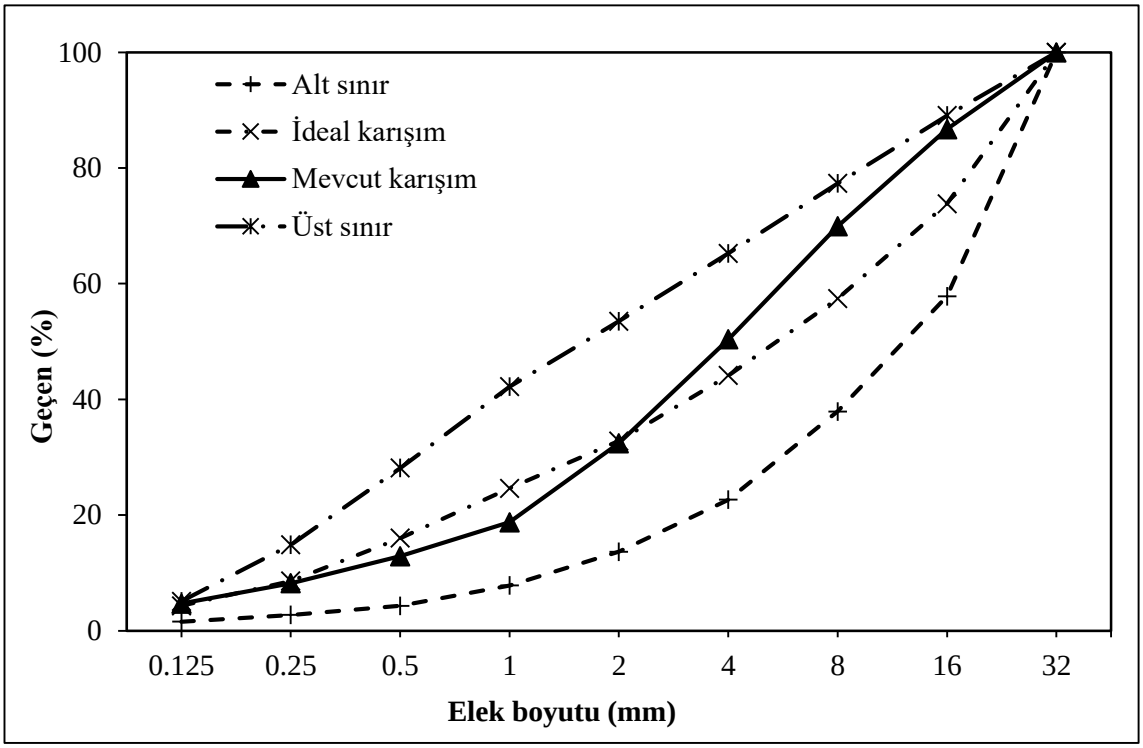
Çimentonun kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri üretici firma tarafından sağlanmış olup, Çizelge 3.1'de sunulmaktadır (Bayqra vd., 2022).

Çizelge 3.1. CEM I 42.5 R tipi çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri (Beytekin vd., 2025)

Ürün	**İçerik (%)**	
SiO_2	18,81	
Al_2O_3	5,71	
Fe_2O_3	3,09	
CaO	62,70	
MgO	1,16	
SO_3	2,39	
$Na_2O+0.658\ K_2O$	0,92	
Cl^-	0,01	
Kızdırma kaybı	3,20	
Serbest CaO	1,26	
Fiziksel özellikler		
Özgül ağırlık	3,15	
Blaine özgül yüzey (cm^2/g)	3530	
0.045 mm elekte kalan (%)	7,6	
Mekanik özellikler		
Basınç dayanımı (MPa)	1-gün	14,7
	2-gün	26,80
	7-gün	49,80
	28-gün	58,5

Agrega bileşeni olarak doğal kireçtaşından elde edilmiş kırmataş agregalar kullanılmıştır. Bu agregalar 0–5 mm (ince), 5–12 mm (orta) ve 12–22 mm (iri) gradasyonlara sahiptir. EN 1097-6 standardına uygun olarak yapılan deneylerle, agregaların doygun yüzey kuru (DYK) BHA'ları, gevşek yoğunlukları ve su emme oranları belirlenmiş olup Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Agrega gradasyonu EN 933-1 standardına göre belirlenmiş ve uygun dağılımın sağlanması amacıyla, karışımda %60 oranında 0–5 mm, %20 oranında 5–12 mm ve %20 oranında 12–22 mm agregalar kullanılmıştır. Karışımlarda kullanılan agregaların tane dağılım eğrisi ve TS 802 standardında belirtilen sınırlar Şekil 3.1'de sunulmuştur.



Şekil 3.1. Karışımlarda kullanılan agregaların tane dağılım eğrisi ve TS 802 standardı ile karşılaştırılması

Çizelge 3.2. Agregaların fiziksel özellikleri (Bayqra vd., 2022)

Tip	Boyut (mm)	DYK özgül ağırlık	Gevşek yoğunluk (kg/m^3)	Su emme kapasitesi (%)
Kırma kireçtaşı	0-5	2.68	1655	1.64
	5-12	2.68	1441	0.51
	12-22	2.69	1405	0.40

3.1.2. Karışım suyu

Çalışma kapsamında üretilen bütün karışımlarda Bursa ili şebeke suyu (musluk suyu) kullanılmıştır.

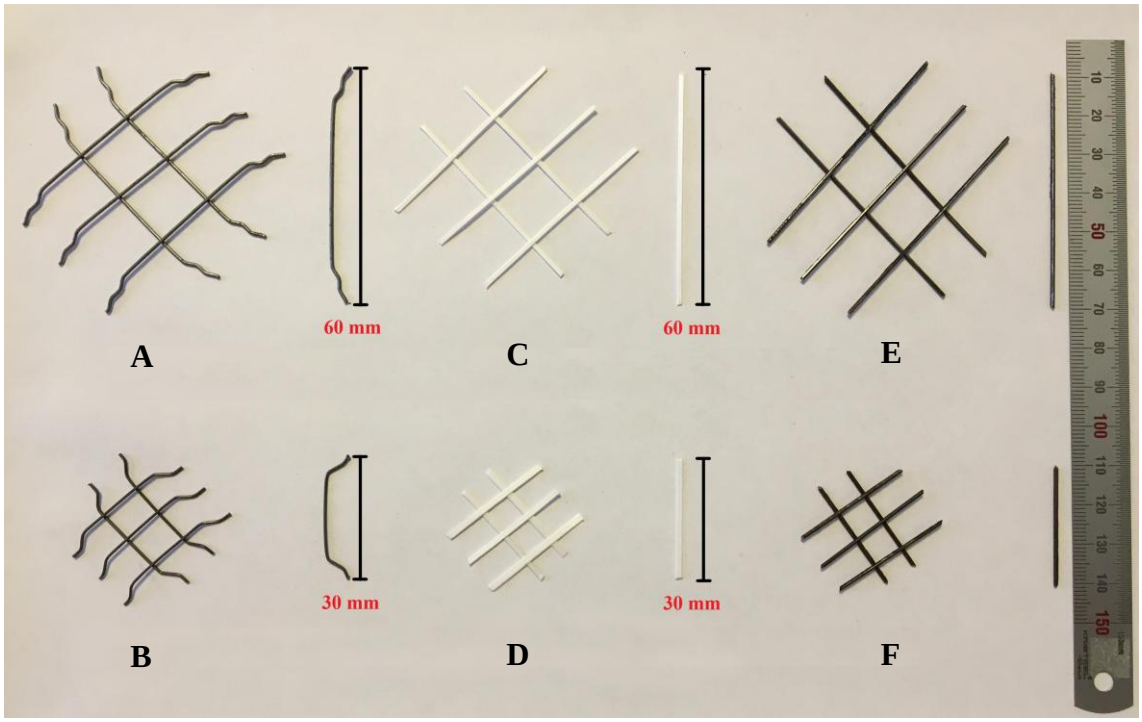
3.1.3. Lif Türleri ve Özellikleri (Çelik, Polipropilen, Atık Çelik)

Bu çalışmada, mekanik performansı ve çatlak direncini arttırmak amacıyla üç farklı türde lif kullanılmıştır: iki ucu kancalı çelik lif (S), polipropilen lif (PP) ve atık çelik lif (WS). Her lif türü 30 mm ve 60 mm uzunluklarında kullanılmıştır. Lifler, beton hacminin %0, %0.25, %0.50, %0.75, %1.00 ve %1.25'i olacak şekilde karışımlara dahil edilmiştir. Farklı lif türü ve uzunluklarının SSB'nin taze hal ve sertleşmiş hal özelliklerine etkileri sistematik olarak değerlendirilmiştir.

Liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri (çekme dayanımı, özgül ağırlık, en/boy oranı, kimyasal direnç vb.) Çizelge 3.3'te sunulmuştur. Liflerin fiziksel görselleri ise Şekil 3.2'de görülmektedir. Liflerin alkali ve asit dirençleri, özellikle zorlu çevre koşullarında uzun süreli dayanım açısından belirleyici rol oynamaktadır. Ayrıca, endüstriyel atık olarak WS lifleri, sürdürülebilir yapı malzemeleri kapsamında incelenmiş ve çevre dostu bir alternatif olarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 3.3. SSB karışımlarında kullanılan liflerin özellikleri

Özellik	S lif		PP lif		WS lif	
Uzunluk (l) (mm)	30	60	30	60	30	60
Çap (d) (mm)	0,55	1	1,1	0,9	1	1
En boy oranı (l/d)	54,5	60	27	67	30	60
Özgül ağırlık	7,8	7,8	0,91	0,91	7,85	7,85
Çekme dayanımı (MPa)	1000-1400	1000-1400	450-700	450-700	800-1200	800-1200
Alkali direnci	Yüksek	Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Yüksek	Yüksek
Asit direnci	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Erime noktası (°C)	>1500	>1500	162	162	>1400	>1400



Şekil 3.2. SSB karışımlarında kullanılan lifler: A) 60 mm S lif B) 30 mm S lif C) 60 mm PP lif D) 30 mm PP lif E) 60 mm WS lif F) 30 mm WS lif

3.2. Karışım Tasarımı ve Lif Dozajları

SSB karışımları, ACI 207.5R-99 standardına uygun olarak maksimum yoğunluk yöntemi kullanılarak tasarlanmıştır. Bu yöntemde amaç, agrega iskeleti içerisindeki boşlukları en aza indirerek yüksek dayanım ve düşük geçirgenliğe sahip bir beton üretmektir. Tüm karışımlarda çimento içeriği sabit tutularak 300 kg/m³ olarak belirlenmiş, değişken olarak yalnızca s/ç ve lif miktarı değerlendirilmiştir.

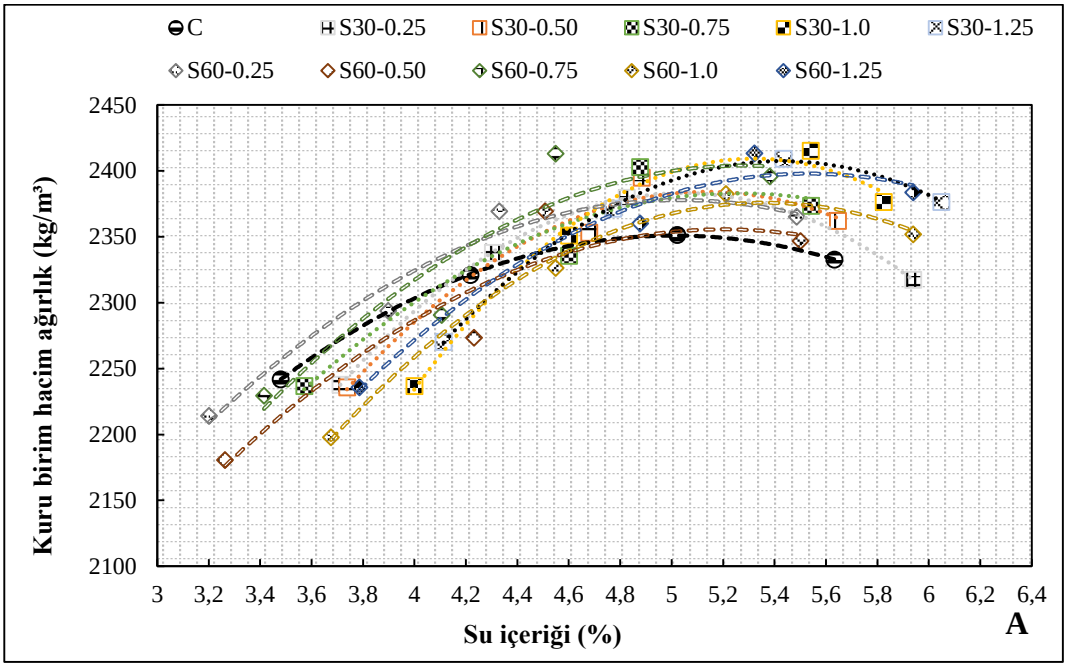
Her lif türü ve oranı için dört farklı s/ç oranına sahip karışımlar hazırlanmıştır. Bu oranlar 0.36 ile 0.52 arasında değişmiş ve her biri için optimum su içeriği Denklem 3.1 yardımıyla hesaplanmıştır:

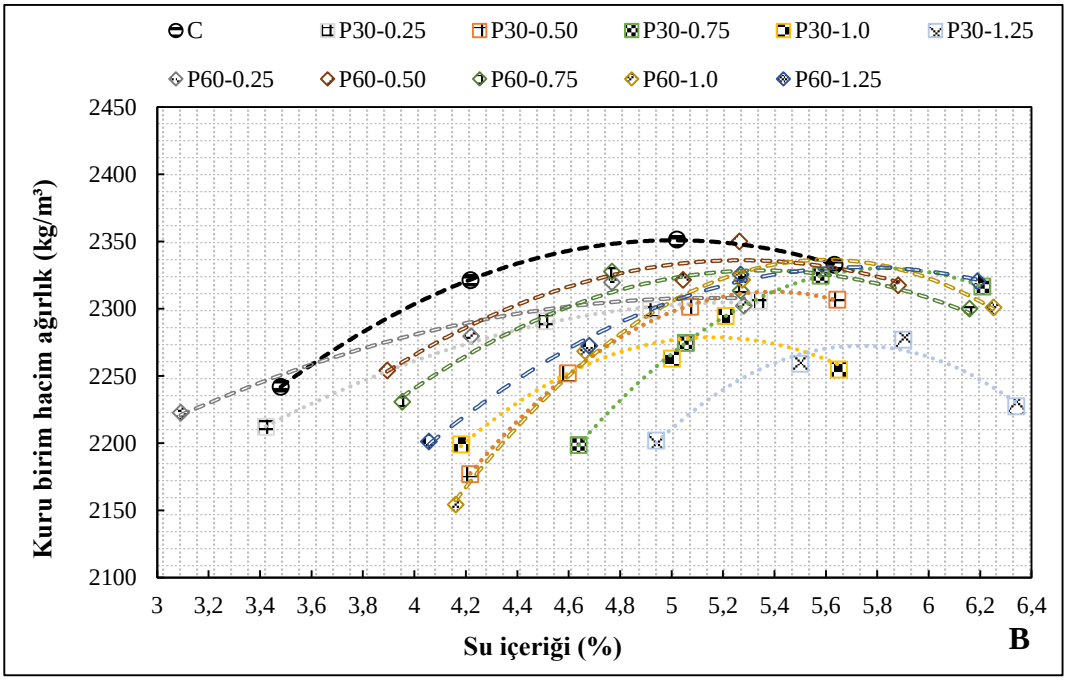
$$w = \frac{m_{yaş} - m_{kuru}}{m_{kuru}} \times 100 \quad (3.1)$$

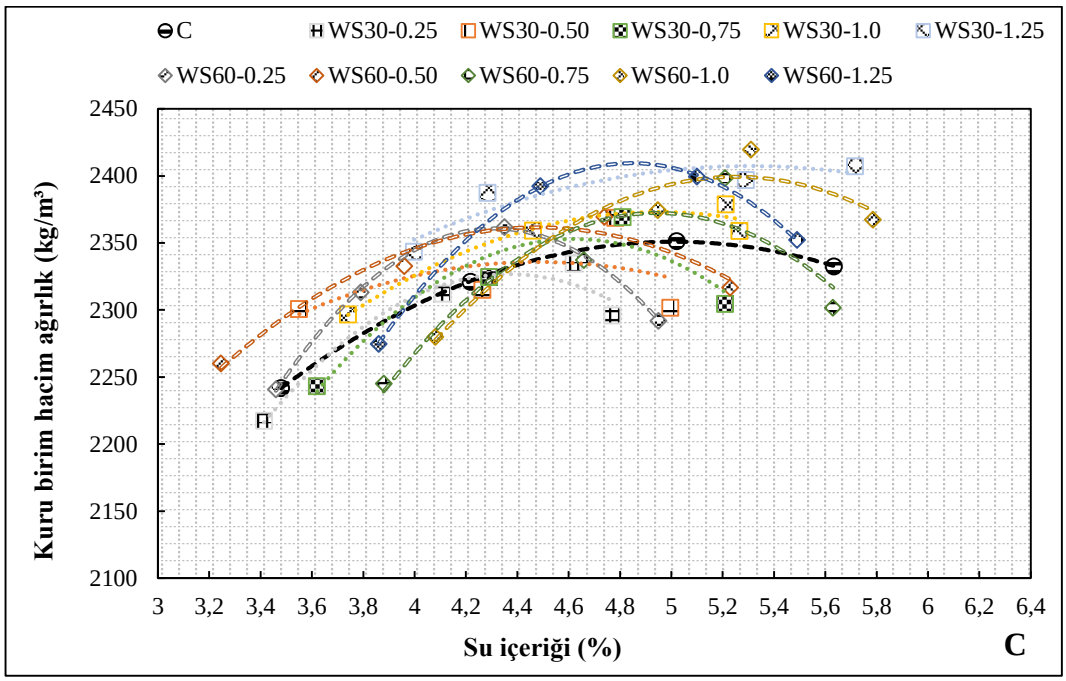
Burada, w su içeriğini (%), $m_{yaş}$ yaş numunenin kütlesini (g) ve m_{kuru} etüvde kurutulduktan sonra kuru numunenin kütlesini ifade etmektedir. Yaş birim hacim ağırlık ($\gamma_{yaş}$) m/v oranı kullanılarak hesaplanmıştır. Burada m yaş numunenin kütlesi ve v numunenin hacmidir. Her bir numunenin kuru birim hacim ağırlığı (γ_{kuru}), SSB numunelerinin optimum su içeriği ile kuru birim ağırlıkları arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla Denklem 3.2 ile hesaplanmıştır:

$$\gamma_{kuru} = \frac{\frac{m}{v}}{1+w} \quad (3.2)$$

Tüm karışımlar için su içeriği ve kuru birim ağırlıklar hesaplandıktan sonra, maksimum kuru birim ağırlığa karşılık gelen optimum su içeriğini belirlemek için eğriler çizilmiştir. Optimum su içeriği kullanılarak karışımların optimum s/ç oranı hesaplanmıştır. Karışımlara ait optimum su içeriği-maksimum kuru BHA eğrileri Şekil 3.3'te sunulmuştur. Optimum su içeriği, maksimum kuru BHA, s/ç oranı ve 1 m^3 SSB karışımlarının üretimi için teorik ve düzeltilmiş karışım oranları Çizelge 3.4 ve 3.5'te özetlenmiştir.


C
S30-0.25
S30-0.50
S30-0.75
S30-1.0
S30-1.25
S60-0.25
S60-0.50
S60-0.75
S60-1.0
S60-1.25
Kuru birim hacim ağırlık (kg/m³)
2450
2400
2350
2300
2250
2200
2150
2100
3
3,2
3,4
3,6
3,8
4
4,2
4,4
4,6
4,8
5
5,2
5,4
5,6
5,8
6
6,2
6,4
Su içeriği (%)
A


C
P30-0.25
P30-0.50
P30-0.75
P30-1.0
P30-1.25
P60-0.25
P60-0.50
P60-0.75
P60-1.0
P60-1.25
Kuru birim hacim ağırlık (kg/m³)
2450
2400
2350
2300
2250
2200
2150
2100
3
3,2
3,4
3,6
3,8
4
4,2
4,4
4,6
4,8
5
5,2
5,4
5,6
5,8
6
6,2
6,4
Su içeriği (%)
B



Şekil 3.3. Kontrol karışımına kıyasla su içeriği ile maksimum kuru BHA ilişkileri: A) S lifli karışımlar, B) PP lifli karışımlar, C) WS lifli karışımlar

Çizelge 3.4. SSB karışımlarının bazı özellikleri ve teorik karışım oranları (kg/m^3)

Karışım	Optimum su içeriği (%)	Maksimum kuru BHA	DYK agrega (mm)			Su	Çimento	S lif	PP lif	WS lif	s/ç
			0-5	5-12	12-22						
C	4,95	2351	1236	412	414	126	300	0	0	0	0,42
S30-0,25	5,04	2382	1227	409	411	129	300	19,50	0	0	0,43
S30-0,50	5,14	2386	1223	408	409	129	300	39,00	0	0	0,43
S30-0,75	5,21	2392	1214	405	406	132	300	58,50	0	0	0,44
S30-1,0	5,3	2410	1201	400	402	138	300	78,00	0	0	0,46
S30-1,25	5,44	2413	1197	399	400	138	300	97,50	0	0	0,46
S60-0,25	5,05	2378	1227	409	411	129	300	19,50	0	0	0,43
S60-0,50	5,19	2359	1223	408	409	129	300	39,00	0	0	0,43
S60-0,75	5,32	2402	1210	403	405	135	300	58,50	0	0	0,45
S60-1,0	5,42	2378	1196	399	400	141	300	78,00	0	0	0,47
S60-1,25	5,57	2401	1192	397	399	141	300	97,50	0	0	0,47
P30-0,25	4,93	2303	1227	409	411	129	300	0	2,28	0	0,43
P30-0,50	5,22	2311	1218	406	408	132	300	0	4,55	0	0,44
P30-0,75	5,58	2328	1204	402	403	138	300	0	6,83	0	0,46
P30-1,0	5,21	2280	1186	395	397	147	300	0	9,10	0	0,49
P30-1,25	5,59	2269	1182	394	396	147	300	0	11,38	0	0,49
P60-0,25	4,96	2308	1227	409	411	129	300	0	2,28	0	0,43
P60-0,50	5,25	2337	1218	406	408	132	300	0	4,55	0	0,43
P60-0,75	5,32	2330	1204	402	403	138	300	0	6,83	0	0,46
P60-1,0	5,47	2339	1186	395	397	147	300	0	9,10	0	0,49
P60-1,25	5,59	2327	1182	394	396	147	300	0	11,38	0	0,49
WS30-0,25	4,43	2330	1227	409	411	129	300	0	0	19,63	0,43
WS30-0,50	4,58	2341	1223	408	409	129	300	0	0	39,25	0,43
WS30-0,75	4,71	2356	1214	405	406	132	300	0	0	58,88	0,44
WS30-1,0	4,96	2373	1201	400	402	138	300	0	0	78,50	0,46
WS30-1,25	5,23	2405	1197	399	400	138	300	0	0	98,13	0,46
WS60-0,25	4,38	2357	1227	409	411	129	300	0	0	19,63	0,43
WS60-0,50	4,63	2365	1223	408	409	129	300	0	0	39,25	0,43
WS60-0,75	4,95	2373	1210	403	405	135	300	0	0	58,88	0,45
WS60-1,0	5,26	2400	1196	399	400	141	300	0	0	78,50	0,47
WS60-1,25	4,93	2410	1192	397	399	141	300	0	0	98,13	0,47

Çizelge 3.5. 1 m^3 SSB üretiminde kullanılan düzeltilmiş karışım oranları (kg/m^3)

Karışım	DYK agrega (mm)			Su	Çimento	S lif	PP lif	WS lif
	0-5	5-12	12-22					
C	1307	436	438	133	317	0	0	0
S30-0,25	1285	428	430	135	314	20,43	0	0
S30-0,50	1286	429	430	136	315	40,99	0	0
S30-0,75	1277	426	427	139	316	61,53	0	0
S30-1,0	1255	418	420	144	313	81,50	0	0
S30-1,25	1256	419	420	145	315	102,27	0	0
S60-0,25	1287	429	431	135	315	20,46	0	0
S60-0,50	1300	434	435	137	319	41,46	0	0
S60-0,75	1265	421	423	141	314	61,15	0	0
S60-1,0	1264	422	423	149	317	82,43	0	0
S60-1,25	1254	418	420	148	316	102,58	0	0
P30-0,25	1320	440	442	139	323	0	2,45	0
P30-0,50	1301	434	436	141	320	0	4,86	0
P30-0,75	1269	424	425	145	316	0	7,19	0
P30-1,0	1266	422	424	157	320	0	9,71	0
P30-1,25	1266	422	424	157	321	0	12,18	0
P60-0,25	1317	439	441	139	322	0	2,44	0
P60-0,50	1289	430	432	140	317	0	4,81	0
P60-0,75	1268	423	424	145	316	0	7,19	0
P60-1,0	1234	411	413	153	312	0	9,47	0
P60-1,25	1234	411	414	154	313	0	11,88	0
WS30-0,25	1314	438	440	138	321	0	0	21,01
WS30-0,50	1310	437	438	138	321	0	0	42,05
WS30-0,75	1296	433	434	141	320	0	0	62,87
WS30-1,0	1275	425	427	146	318	0	0	83,33
WS30-1,25	1260	420	421	145	316	0	0	103,31
WS60-0,25	1299	433	435	137	318	0	0	20,77
WS60-0,50	1297	433	434	137	318	0	0	41,62
WS60-0,75	1280	426	429	143	317	0	0	62,30
WS60-1,0	1253	418	419	148	314	0	0	82,23
WS60-1,25	1250	416	418	148	315	0	0	102,89

3.3. Numune Hazırlama ve Kür Koşulları

Tüm beton karışımları laboratuvar ortamında 100 litrelik kapasiteli pan mikser kullanılarak hazırlanmıştır. Karışım süreci dört aşamada gerçekleştirilmiştir: İlk aşamada tüm agregalar kuru olarak 30 saniye süreyle karıştırılmıştır. Ardından çimento ilave edilerek 30 saniye daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Üçüncü aşamada lifler eklenmiş ve karışım tekrar 30 saniye karıştırılmıştır. Son olarak gerekli miktarda su, kademeli olarak karışıma ilave edilerek toplamda 5 dakika boyunca homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır.

Karıştırma işlemi sırasında liflerin beton içinde topaklanmamasına ve homojen dağılmasına özen gösterilmiştir. Karışımlar, deney numunelerinin hazırlanması için

standart boyutlardaki kalıplara dökülmüştür. Bu kapsamda; 150 mm küp numuneler (basınç, yarmada çekme ve su emme), 150x300 mm silindir numuneler (elastisite modülü), ve 100x100x600 mm kiriş numuneler (eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi) hazırlanmıştır.

Sıkıştırma işlemi ASTM C1435 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş ve her katman 5 kg'lık çelik plaka ile 20 saniye süreyle titreşimli tokmak yardımıyla sıkıştırılmıştır. Kalıplara yerleştirilen numuneler oda sıcaklığında 24 saat bekletildikten sonra kalıptan çıkarılmış ve 28 gün boyunca 23±2°C sıcaklıkta su içerisinde kürlenmiştir. Numune sıkıştırma süreci ve kür koşulları Şekil 3.4'de sunulmuştur.



Şekil 3.4. Numune sıkıştırma süreci ve kür koşulları

Bu kür süreci, özellikle SSB gibi düşük s/ç oranına sahip karışımların yeterli hidratasyonu sağlayarak erken dayanım kazanımı ve dayanım gelişimi açısından kritik rol oynamaktadır. Ayrıca farklı lif türleri ile üretilen numunelerdeki su geçirimliliği farklı olduğundan, kür ortamı her numune için sabit tutulmuştur.

Numune isimlendirmeleri aşağıdaki prensipler doğrultusunda yapılmıştır: Kontrol karışımı "C" olarak adlandırılırken, lifli karışımlar "Lif tipi + uzunluk + oran" formatında

adlandırılmıştır. Örneğin 60 mm uzunluğunda ve %0,50 oranında çelik lif içeren karışım "S60-0,50" şeklinde, %0,75 oranında PP lifli karışım ise "P60-0,75" olarak tanımlanmıştır.

3.4. Deneysel Yöntemler

3.4.1. Vebe Kıvam Testi

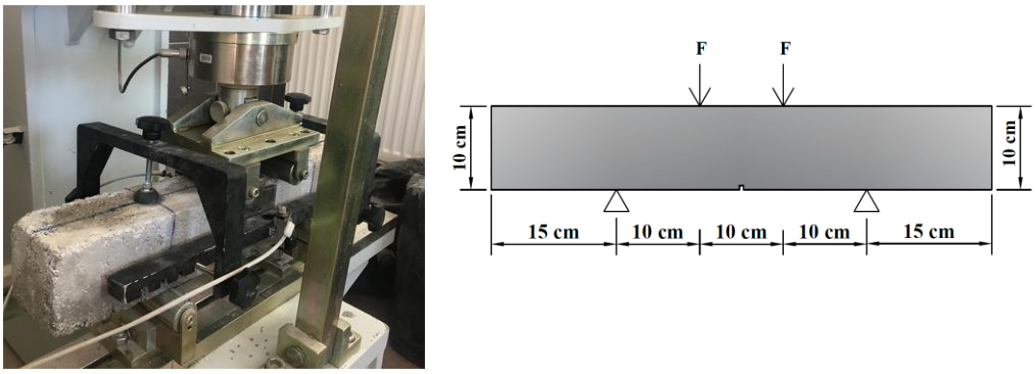
Karışımın taze hal özellikleri ASTM C1170 standardına göre Vebe kıvam testi ile değerlendirilmiştir. Bu testte, taze haldeki beton, 22,7 kg'lık ağırlık plakasının etkisiyle kalıp çevresinde bulunan boşluğu ne kadar sürede doldurduğu ölçülerek değerlendirilmiştir. Elde edilen süre, karışımın sıkıştırılabilirliği hakkında doğrudan bilgi vermekte olup, lif içeriği arttıkça genellikle Vebe süresinin uzadığı gözlemlenmiştir.

3.4.2. Mekanik Testler (Basınç, Yarmada Çekme, Eğilme, Elastisite Modülü)

- Basınç dayanımı: EN 12390-3 standardına uygun olarak 150 mm küp numuneler üzerinde 28 günlük kür sonunda gerçekleştirilmiştir. Her karışım için üç tekrar alınmış ve ortalama değerler raporlanmıştır.

- Yarmada çekme dayanımı: EN 12390-6 standardına göre 150 mm küp numuneler üzerinde uygulanmış ve numuneler eksenel doğrultuda yüklenerek yarılma dayanımı hesaplanmıştır.

- Eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi: 100×100×600 mm boyutlarındaki kiriş numuneler üzerinde, EN 12390-5 standardına uygun olarak dört noktalı eğilme testi uygulanmış ve Denklem 3.3 yardımıyla eğilme dayanımı hesaplanmıştır. Test öncesi numunelerin ortasına çatlak ölçer yerleştirmek amacıyla 15 mm derinliğinde yarık açılmıştır. Test sırasında çatlak ölçer cihaz ile yük-deplasman verisi kaydedilmiş ve kırılma enerjisi RILEM TC 50-FM yönergeleri doğrultusunda Denklem 3.4 ile hesaplanmıştır.



Şekil 3.5. Eğilme dayanımı ve kırılma enerjisi test düzeneği

$$\sigma = \frac{F \times L}{B \times (H-a)^2} \tag{3.3}$$

Burada, σ eğilme dayanımını (MPa), F uygulanan maksimum yükü (N), L kirişin açıklığını (mm), B kirişin genişliğini (mm), H kirişin yüksekliğini (mm) ve α kırılma bölgesindeki çentik derinliğini (mm) ifade etmektedir.

$$G_F = \frac{W_0 + m^* \cdot g \cdot \delta_0}{A_{lig}} \tag{3.4}$$

Burada, G_F kırılma enerjisini (J/m^2), m* mesnetler arasındaki kirişin kütlesini (N), W_0 yük-deplasman eğrisinin altındaki alanı (N.m), g yerçekimi ivmesini (9.81 m/s^2), δ_0 kirişin deplasmanını (m) ve A_{lig} açıklığın ortasında etkin kesit alanını ($A_{lig} = (H - \alpha) \times B$) ifade etmektedir.

- Elastisite Modülü: ASTM C469 standardına göre, 28 günlük 150x300 mm silindirik numuneler üzerinde eksenel yük uygulanarak hesaplanmıştır. Nihai dayanımın %40'ı olan gerilme (σ_2) ve buna karşılık gelen eksenel gerinim (ε_2) ile 5×10^{-5} mm/mm gerinim değerine (ε_1) karşılık olan gerilme (σ_1) dikkate alınarak kiriş elastisite modülü Denklem 3.5 kullanılarak hesaplanmıştır.

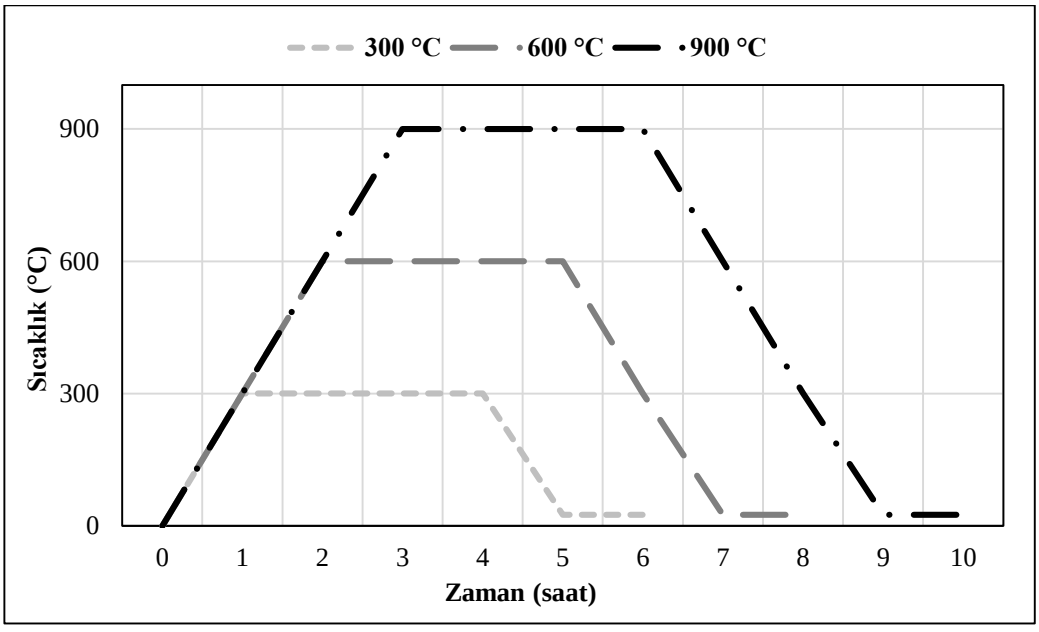
$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.000050} \tag{3.5}$$

3.4.3. Su Emme Testi

Betonun geçirimlilik özelliklerini değerlendirmek üzere, ASTM C642 standardına uygun olarak 150 mm küp numuneler üzerinde su emme testi uygulanmıştır. Bu kapsamda numuneler önce 105°C sıcaklıkta sabit kütleye ulaşana kadar kurutulmuş, ardından suya daldırılarak doygun hale getirilmiş ve ağırlık farkı kullanılarak su emme oranı hesaplanmıştır.

3.4.4. Yüksek Sıcaklık Maruziyeti

Yüksek sıcaklık dayanımı testleri, 28 günlük kür sonrası numunelerin 105°C'de 24 saat kurutulması ve ardından 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklara maruz bırakılması ile gerçekleştirilmiştir. Isıtma hızı 5°C/dakika olarak ayarlanmış ve hedef sıcaklığa ulaşıldığında numuneler sabit sıcaklıkta 180 dakika bekletilmiştir (Şekil 3.6). Soğutma oda sıcaklığında doğal ortamda gerçekleştirilmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan numuneler üzerinde basınç dayanımı, su emme ve ağırlık kaybı testleri uygulanmıştır. Bu testler ile PP liflerin sıcaklık altında eriyerek oluşturduğu mikro boşlukların geçirgenliğe etkisi, S ve WS liflerin ise sıcaklık karşısındaki dayanım koruma potansiyelleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.6. Yüksek sıcaklık dayanımı test prosedürü (Beytekin vd., 2025)

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

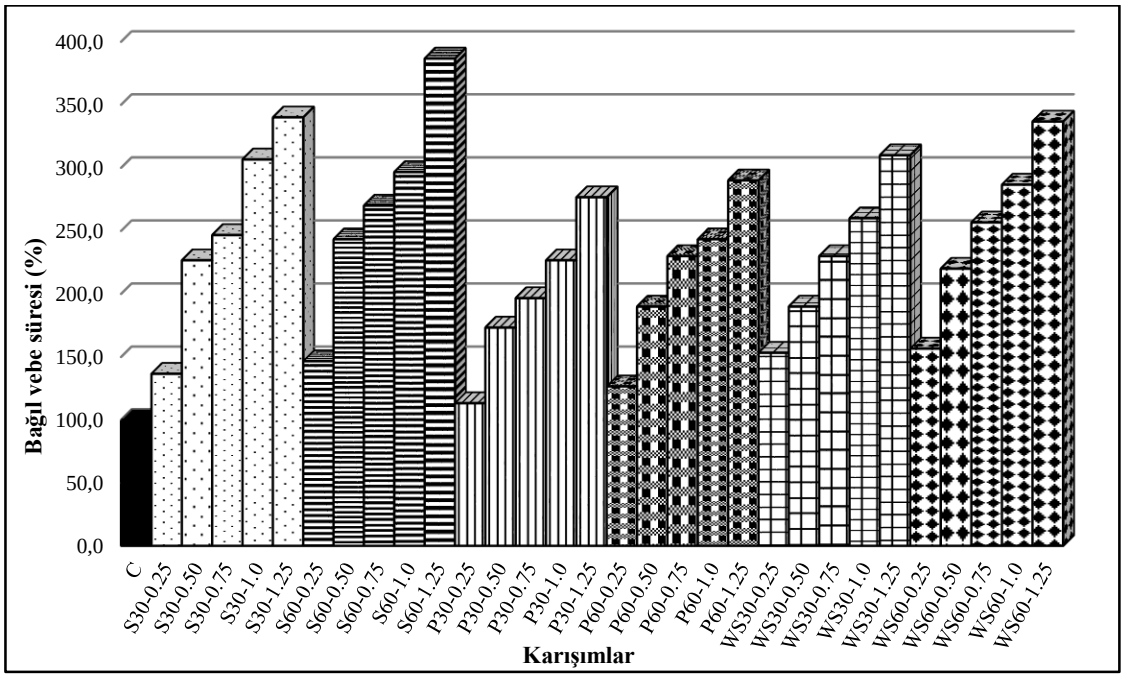
Tez kapsamında SSB karışımları üzerinde gerçekleştirilen test ve deneylerden elde edilen bulgular ve bulgulara yönelik tartışmalar bu başlık altında detaylı olarak sunulmuştur. Üretilen numunelerin taze hal ve sertleşmiş hal özellikleri değerlendirilmiş ve 60 mm uzunluğundaki liflerin daha iyi performans sunduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak 60 mm uzunluğundaki lifler kullanılarak yüksek sıcaklık etkisi değerlendirilmiştir. Yapılan test ve deneylere ait değerlendirmeler gözlenen konu ile ilgili başlık altında olmak üzere tartışılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan test ve deneylere ait sonuçlar Çizelge 4.1'de özetlenmiştir

Çizelge 4.1. Test ve deney sonuçları

Karışım	Vebe süresi (s)	Su emme kapasitesi (%)	Basınç dayanımı (MPa)	Yarmada-çekme dayanımı (MPa)	Eğilme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)
C	30	1,67	58,10	3,28	4,95	31,85
S30-0,25	41	2,02	60,10	3,35	5,27	30,58
S30-0,50	68	2,18	62,21	3,84	5,38	30,79
S30-0,75	74	2,22	62,64	5,27	5,56	32,90
S30-1,0	92	2,44	63,38	6,17	5,98	32,37
S30-1,25	102	2,64	55,46	6,66	6,99	30,90
S60-0,25	44	2,1	61,74	3,63	5,38	32,69
S60-0,50	73	2,39	60,79	4,92	6,18	32,27
S60-0,75	81	3,09	63,32	5,76	6,82	30,16
S60-1,0	89	3,59	64,65	6,93	7,22	31,64
S60-1,25	116	4,11	53,18	7,41	7,47	33,03
P30-0,25	34	1,92	59,14	3,43	5,01	31,23
P30-0,50	52	1,99	60,56	3,58	5,12	31,06
P30-0,75	59	2,12	60,44	4,21	5,21	31,55
P30-1,0	68	2,26	57,33	4,17	5,07	32,17
P30-1,25	83	2,48	55,13	4,01	5,01	29,76
P60-0,25	38	2,32	59,09	3,56	5,24	31,86
P60-0,50	57	2,54	59,32	4,27	5,48	33,32
P60-0,75	69	2,61	58,24	4,72	5,62	31,64
P60-1,0	73	2,57	57,98	4,43	5,41	30,38
P60-1,25	87	2,79	53,07	4,35	5,17	29,64
WS30-0,25	46	1,95	60,56	3,89	5,12	32,02
WS30-0,50	57	2,08	59,79	4,43	5,34	32,56
WS30-0,75	69	2,23	62,12	5,12	5,63	32,28
WS30-1,0	78	2,56	62,88	5,99	6,01	33,47
WS30-1,25	93	2,75	56,33	6,21	6,74	30,23
WS60-0,25	47	2,01	60,45	4,17	5,47	32,45
WS60-0,50	66	2,25	62,45	4,53	6,11	30,33
WS60-0,75	77	2,86	58,56	5,86	6,68	31,28
WS60-1,0	86	3,06	63,44	6,38	6,99	32,56
WS60-1,25	101	3,75	54,20	6,71	7,15	33,13

4.1. Lif Türü, Boyu ve Dozajının SSB'nin Taze Hal Özelliklerine Etkisi

Hazırlanan karışımların kontrol karışımına göre bağıl Vebe süreleri Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. SSB karışımlarının kontrol karışımına göre bağıl Vebe süreleri

Lif türüne ve dozajına bakılmaksızın, lif takviyesi ile betonların işlenebilirliği olumsuz etkilenmiştir. Ayrıca, lif türünden bağımsız olarak lif dozajı ve uzunluğundaki artışla birlikte bu olumsuz etki daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır (Şekil 4.1). Lif kullanımının SSB'nin işlenebilirliğini olumsuz etkilemesinin iki ana nedeni olduğu düşünülmektedir. İlk olarak, lifler karışımın hareketliliğini sınırlayan iç sürtünmeyi arttırmaktadır. İkinci olarak, liflerin yüksek özgül yüzey alanına sahip olması, betonun viskozitesini azaltmaya yardımcı olacak hamur miktarını azaltarak işlenebilirliği olumsuz yönde etkilemektedir. Vebe sürelerine dayanarak, lifli SSB'lerin yerleştirilmesi ve sıkıştırılması için daha fazla çaba gerektiği anlaşılmaktadır. Benzer sonuçlar, Ghahari vd. (2017), Rooholamini vd. (2018a) ve Haghnejad & Modarres (2021) tarafından yapılan çalışmalarda da vurgulanmaktadır.

30 mm ve 60 mm çelik lif kullanımıyla Vebe süreleri sırasıyla, %36 ile 2.4 kat ve %46 ile 2.86 kat artmıştır. Çelik liflerin uzunluğunun 30 mm'den 60 mm'ye çıkarılması, Vebe süresini %7-13 oranında arttırarak işlenebilirliği daha da olumsuz etkilemiştir. Bu durumun sebebinin, liflerin kancalı uçlarının geometrisi ve çelik malzemenin yüksek özgül ağırlığından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Daha uzun liflerin karışım içinde birbirine takılma olasılığının yüksek olması ve daha fazla iç sürtünmeye neden olması, karışımın hareketini daha da kısıtlayabilmektedir. Uygunoğlu (2011), en boy oranı yüksek olan çelik liflerin beton karışımlarının işlenebilirliğini zorlaştırabileceğini bildirmiştir. Daha uzun lifler, karışıma eşit şekilde dağılmayı zorlaştırmaktadır. Benzer şekilde, Shahidan vd. (2015), lif uzunluğu arttıkça farklı lif oranları için Vebe sürelerinin %24'e kadar arttığını gözlemlemiştir.

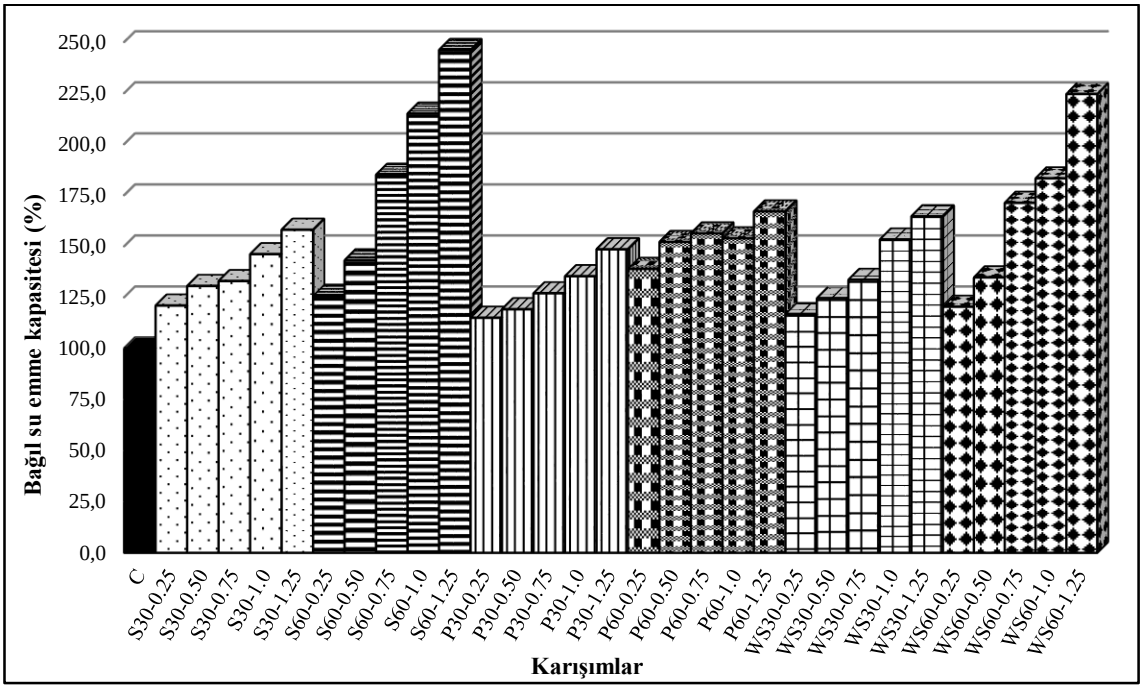
WS lif kullanıldığında ise 30 mm ve 60 mm lif uzunlukları için sırasıyla, %53 ile 2.1 kat ve %56 ile 2.36 kat Vebe süresi artışına neden olduğu görülmektedir. WS'de lif uzunluğu artışı ise %1-8 oranında artışa neden olmaktadır. Atık çelik kullanımı ile Vebe süresinin çelik lifli karışımlara göre daha üstün perfromans sergilediği görülmektedir. Bu durumun, çelik liflerin kancalı uçlarının karışımların hareketliliğini daha fazla azalttığından kaynaklandığı düşünülmektedir (Guerini vd., 2018)(Şekil 3.2).

PP lif içeren karışımlar incelendiğinde, 30 mm ve 60 mm lif uzunluğu için sırasıyla, Vebe süresinin %13 ile 1.76 kat ve %26 ile 1.9 kat arttığı görülmektedir. PP lif uzunluğunun 60 mm'ye çıkarılması sonucunda ise %5-11 aralığında arttığı tespit edilmiştir. PP lifler, beton içinde daha homojen bir şekilde karıştırılabilirken, çelik ve atık çelik lifler karıştırma sürecinde birbirine kenetlenebilmekte ve bu da işlenebilirliği olumsuz etkileyebilmektedir (Guerini vd., 2018). Çelik ve atık çelik liflerinin içeriği arttıkça, kenetlenme daha yoğun hale gelebilmektedir. Bu durum, PP liflere kıyasla Vebe süresi üzerinde daha büyük bir olumsuz etki yaratmaktadır. Bu fenomen, lif takviyesinin avantajları ile işlenebilirlikteki potansiyel olumsuzluklar arasında bir denge kuracak şekilde lif içeriğinin optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu optimizasyon sayesinde, beton karışımının hem yerleştirme kolaylığı sağlanmış olacak hem de dayanıklılığı arttırılabilecektir. Bu bulgular, Haghnejad & Modarres (2021), Siamardi vd. (2021) ve Sharbatdar vd. (2022) tarafından yapılan önceki çalışmalar ile uyumludur.

Lif içeren karışımların kontrol karışımına göre Vebe sürelerini karşılaştırdığımızda, en çok artışın sırasıyla, çelik, WS ve PP lif içeren karışımlarda görüldüğü anlaşılmaktadır. Karışımlarda kullanılan lif uzunluğunun artışı sonucunda, her lif türü için Vebe süreleri benzer artış gösterirken, çelik lif içeren karışımların lifin boy değişiminden en fazla etkilendiği, PP lif içeren karışımların ise en az etkilendiği tespit edilmiştir.

4.2. Su Emme Özellikleri

SSB karışımlarının kontrol karışımına göre bağıl su emme kapasiteleri Şekil 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 4.2. SSB numunelerinin kontrol numunesine göre bağıl su emme kapasitesi değerleri

Karışımların, CEB-FIP (1989) raporunda belirtilen yüksek kaliteli beton için önerilen sınır olan %3'ün altında su emme kapasitesine sahip olduğu görülmektedir (Çizelge 4.1). Ancak, S60-0.75, S60-1.0, S60-1.25, WS60-1.0 ve WS60-1.25 karışımları bu eşiği aşmıştır. Bu durumun, söz konusu karışımların sıkıştırılabilirliğinin düşük olmasından kaynaklanan hapsolmuş hava boşluklarının fazlalığından meydana geldiği düşünülmektedir.

Lif türünden bağımsız olarak, lif içeriği arttıkça su emme kapasitesinde de bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış, özellikle 60 mm lif takviyeli karışımlarda daha belirgin hale gelmektedir (Şekil 4.2). Liflerin, matris içindeki boşlukları birbirine bağlayarak veya ayırarak betonun boşluk yapısını etkileyebileceği bilinmektedir (Liang vd., 2022a). Bu bağlamda, liflerin boşluklar arasında köprüler oluşturabilmesi nedeniyle su geçirgenliğini arttırabileceği düşünülmektedir. Ayrıca liflerin kümelenmesi veya sıkıştırma etkileri nedeniyle ek boşlukların oluşmasına da neden olabileceği literatürde vurgulanmaktadır (Islam & Gupta, 2016; Algin & Gerginci, 2020; Topçu vd., 2017; Chen vd., 2020; Yap vd., 2022).

Lif sıkıştırma etkilerinden kaynaklanan boşluklar, su emme kapasitesindeki artışa sebep olan birincil faktör olarak tespit edilmiştir. Çelik lifler, özellikle yüksek dozajlarda, daha sert yapıları ve sıkıştırmaya karşı yüksek dirençleri nedeniyle, PP ve WS liflere göre betonda daha yüksek su emme kapasitesine yol açmıştır. Öte yandan, PP lifli karışımların su emme kapasitesindeki artış diğer karışımlara göre daha az olmuştur. Bu durumun, PP liflerin beton içinde daha az kenetlenmesi ve esnek yapıları sayesinde boşlukları azaltmada daha etkili olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Simões vd., 2018).

30 mm ve 60 mm çelik lif takviyeli SSB karışımlarının, kontrol karışımına göre sırasıyla %21-58 ve %26 ile 1.46 kat artışla diğer karışımlara göre daha yüksek su emme kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Çelik lif uzunluğunun 30 mm'den 60 mm'ye çıkarılması, su emme kapasitesini %4-55 oranında arttırmıştır. Çelik lifli karışımların sıkıştırılması zor olduğundan sıkıştırma esnasında artakalan boşluklar bu duruma neden olmuştur.

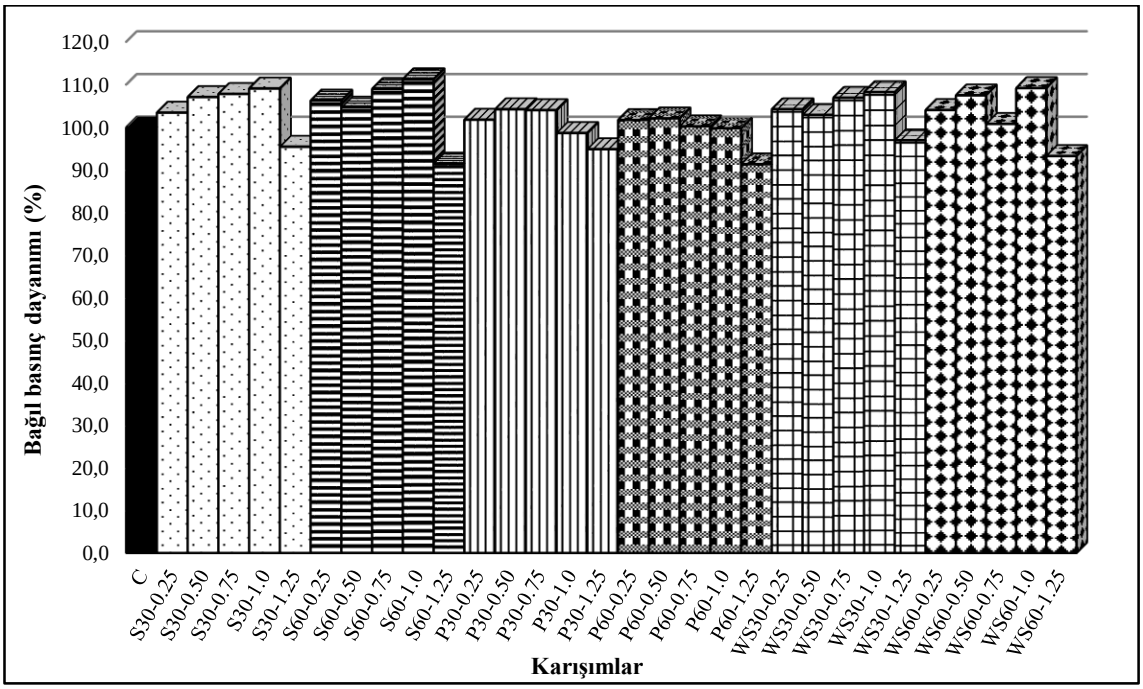
Benzer şekilde, 30 mm ve 60 mm WS lif takviyesi, betonun su emme kapasitesinde sırasıyla %17-65 ve %20 ile 1.25 kat artışa yol açmıştır. WS lif uzunluğunun artışı sonucunda, su emme kapasitesinde %3-36 oranında bir artış gözlemlenmiştir. WS lif takviyeli karışımlarda çelik lif takviyeli karışımlara göre genellikle daha düşük su emme kapasitesi değerleri elde edildiği görülmektedir. Bunun sebebinin, WS liflerin sıkıştırma esnasında oluşturduğu boşlukların iki ucu kancalı çelik liflere göre daha az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kontrol karışımına kıyasla, 30 mm ve 60 mm uzunluğundaki PP lifli karışımlar, su emme kapasitesinde sırasıyla, %15-49 ve %39-67 oranlarında bir artış göstermiştir. PP liflerin uzunluğunun 60 mm'ye çıkarılmasıyla, %0.25 lifli karışımda su emme kapasitesinde %21, %1.25 lifli karışımda ise %12 artış gözlemlenmiştir. Bu bulgular, daha önce yapılan çalışmalarda farklı lif türleriyle hazırlanan SSB karışımlarında su emme kapasitesinin %5 ile %80 arasında arttığına dair elde edilen sonuçlarla paralellik göstermektedir (Benouadah vd., 2017; Algin & Gerginci, 2020; Kilic & Gokce, 2021).

4.3. SSB Karışımlarının Mekanik Performansı

4.3.1. Basınç Dayanımı

SSB karışımlarının kontrol karışımına göre bağıl basınç dayanımları Şekil 4.3'de görülmektedir.



Şekil 4.3. SSB numunelerinin kontrol numunesine göre bağıl basınç dayanımları

Lif türünden bağımsız olarak karışıma lif ilave edilmesiyle kontrol karışımına kıyasla basınç dayanımlarında genel olarak az miktarda bir artış gözlemlenmiştir. Çelik liflerin %1'e kadar eklenmesi, basınç dayanımını %3 ila %11 arasında arttırırken, WS lif

takviyesinde bu artış %3 ila %9 arasında olmuştur. Bu artışın, büyük ölçüde yatay gerilmelerin azaltılması ve yük altında çatlakların yayılmasının engellenmesi sayesinde gerçekleştiği düşünülmektedir (Madhkhan vd., 2012; Ouedraogo vd., 2021).

Ancak, daha yüksek çelik lif içeriğinde, karışımların sıkıştırılabilirliği azaldığı için basınç dayanımında %5 ila %9 arasında bir düşüş olmuştur. Bu durum diğer araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir (Rooholamini vd., 2023). %1'den daha fazla WS lif içeren karışımlarda da basınç dayanımında %3 ila %7 arasında bir azalma olmuştur. Bunun sebebi, artan lif içeriğinin matris içinde boşluklar oluşturarak malzemenin genel bütünlüğünü ve taşıma kapasitesini azaltmasıdır (Jafarifar vd., 2017). Sonuç olarak, Şekil 4.4'te görüldüğü gibi oluşan çeper etkisi numunelerin homojenliğini bozmakta ve malzemenin ayrışmasına sebep olabilmektedir. Bu düzensiz dağılım sonucunda da basınç dayanımında azalma görülebilmektedir (Mardani vd., 2021). Bu azalma, performans ve yapısal bütünlüğü dengelemek için lif içeriğinin optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu optimizasyon ile elde edilecek nihai ürünün, amaçlanan uygulama için gerekli mekanik özellikleri karşılaması sağlanabilir.



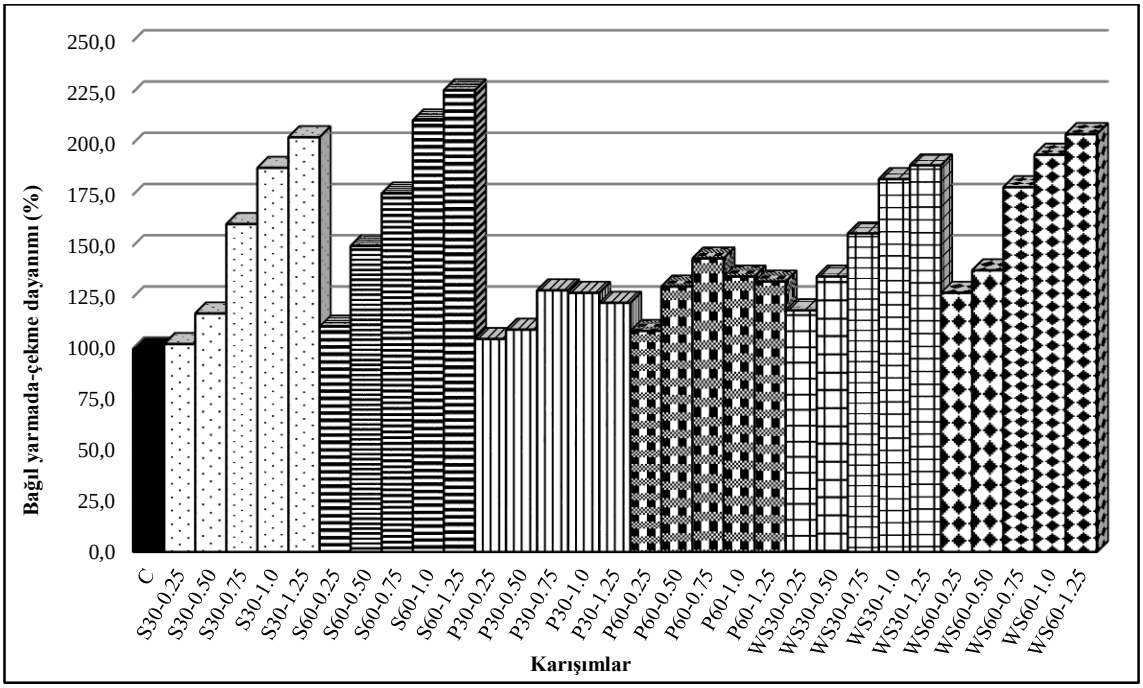
Şekil 4.4. SSB numunelerinde çeper etkisi kaynaklı ayrışma

PP lif takviyesi, SSB karışımlarının yoğunluğunu azalttığı ve lif oranıyla paralel olarak artan s/ç oranına bağlı olarak basınç dayanımını %5 ila %10 arasında düşürdüğü anlaşılmıştır (Çizelge 3.4 ve Şekil 4.3).

Benzer gözlemler Yazıcı vd. (2015) ile Öztürk (2017) tarafından da rapor edilmiştir. PP lif takviyesi, belirli bir noktada basınç dayanımını arttırabilirken, optimum dozajın aşılması, işlenebilirlikteki azalma ve gözenekliliğin artması nedeniyle olumsuz etkiler yaratabilmektedir (Saidani vd., 2016; Fallah & Nematzadeh, 2017). Bu etki, Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, PP lif takviyeli karışımların kontrol karışımına kıyasla daha yüksek su emme kapasitesi değerlerinde belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir.

4.3.2. Yarmada-Çekme Dayanımı

SSB numunelerinin kontrol karışımına göre bağıl yarmada-çekme dayanımları Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. SSB numunelerinin kontrol numunesine göre bağıl yarmada-çekme dayanımları

Çelik ve WS lif takviyeli SSB karışımlarında, artan lif içeriği ve uzunluğu ile yarmada-çekme dayanımında iyileşme sağlanmıştır. PP lifli karışımlarda ise, lif içeriği ve uzunluğu arttıkça çekme dayanımında küçük bir artış gözlemlenmiş ve bu artış %0.75 lif içeriğinde zirve yapmıştır. Bu zirveden sonra dayanımda bir miktar azalma meydana gelmiştir. Bu

azalmaya rağmen, PP lif takviyeli SSB karışımlarında, kontrol karışımına kıyasla daha yüksek yarmada-çekme dayanımı elde edilmiştir. Özellikle daha yüksek lif içeriğine sahip numunelerde, karışımların basınç dayanımı/yarmada-çekme dayanımı oranları (BD/YÇD), kontrol karışımına göre daha düşük olmuştur (Çizelge 4.2). Bu durum, lif takviyesinin SSB'nin basınç dayanımından daha fazla yarmada-çekme dayanımını iyileştirmede etkili olduğunu göstermektedir. Bu iyileşme, esas olarak liflerin yük transfer kapasitesine ve köprüleme etkisi sayesinde mikro çatlakların büyümelerini engelleyerek çatlağın yayılmasını önleme yeteneklerine bağlanmaktadır (Ostertag & Yi, 2007; Park vd., 2012; Yazıcı, 2012; Yoo vd., 2014; Yu vd., 2015).

30 mm ve 60 mm çelik lif takviyesi, yarmada-çekme dayanımını sırasıyla, %2 ile 1.03 kat ve %11 ile 1.26 kat arttırmıştır. Liflerin uzunluğunun 30 mm'den 60 mm'ye çıkarılması yarmada-çekme dayanımını %8-11 oranında yükseltmiştir. Benzer şekilde, 30 mm ve 60 mm atık çelik lifler, yarmada-çekme dayanımını sırasıyla, %18-89 ile %27 ile 1.04 kat arttırmıştır. WS lif uzunluğunun arttırılmasıyla, yarmada-çekme dayanımında yaklaşık %7-8 oranında bir artış gözlemlenmiştir. En düşük lif içeriğinde atık çelik liflerin, diğer lif içeriklerinde ise genellikle çelik liflerin daha iyi performans sergilediği görülmektedir. WS liflerin 30 mm lifli karışımların en düşük lif içeriğinde daha iyi performans sergilemesinin sebebinin, karışımlarda kullanılan atık çelik liflerin daha düşük olan en/boy oranından (Çizelge 3.3) kaynaklandığı düşünülmektedir. Lif dozajı arttıkça bu etki azalmış ve iki ucu kancalı çelik liflerin matris içindeki genel performansı WS liflere baskın gelmiştir.

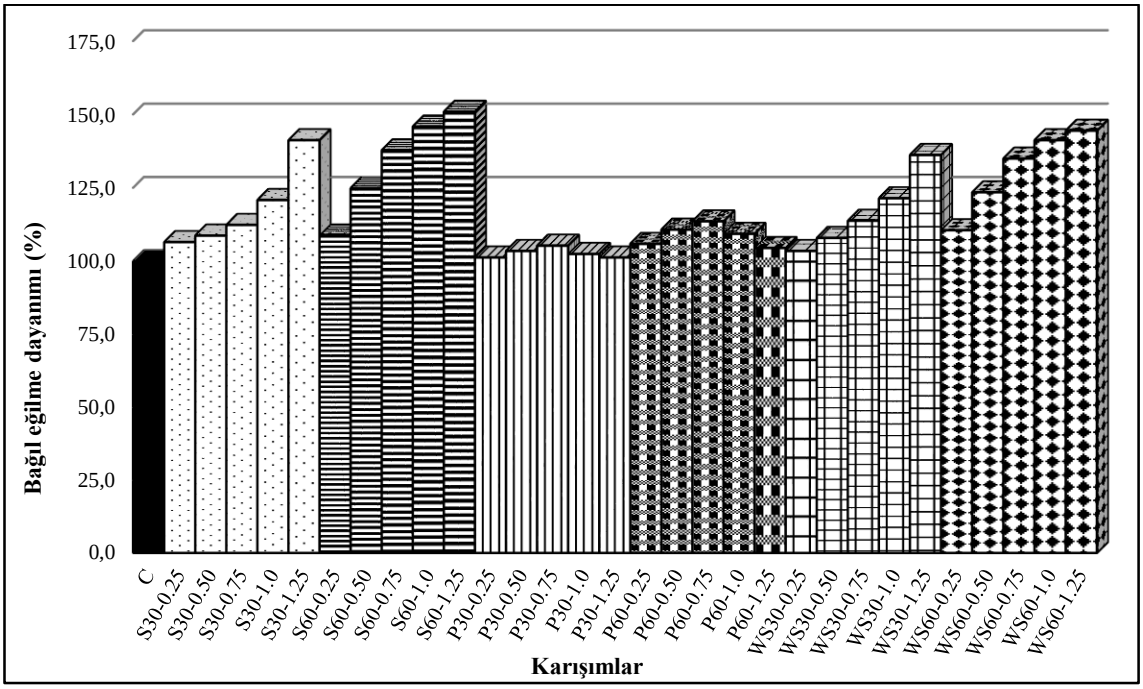
30 mm ve 60 mm PP lif takviyeli karışımlarda, yarmada-çekme dayanımında sırasıyla, %4-28 ve %8-44 arasında bir iyileşme sağlanmıştır. PP liflerin uzunluğunun 60 mm'ye çıkarılması ile %4-12 oranında bir iyileşme olmuştur. PP liflerin boy etkisinin çelik ve WS liflere göre daha yüksek olduğu fakat eğilme dayanımı performansı açısından büyükten küçüğe sırasıyla çelik, WS ve PP olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.2. SSB karışımlarının basınç dayanımı/yarmada-çekme dayanımı oranları

Karışımlar	BD/YÇD
C	17,71
S30-0.25	17,94
S30-0.50	16,20
S30-0.75	11,89
S30-1.00	10,27
S30-1.25	8,33
S60-0.25	17,01
S60-0.50	12,36
S60-0.75	10,99
S60-1.00	9,33
S60-1.25	7,18
P30-0.25	17,24
P30-0.50	16,92
P30-0.75	14,36
P30-1.00	13,75
P30-1.25	13,75
P60-0.25	16,60
P60-0.50	13,89
P60-0.75	12,34
P60-1.00	13,09
P60-1.25	12,20
WS30-0.25	15,57
WS30-0.50	13,50
WS30-0.75	12,13
WS30-1.00	10,50
WS30-1.25	9,07
WS60-0.25	14,50
WS60-0.50	13,79
WS60-0.75	9,99
WS60-1.00	9,94
WS60-1.25	8,08

4.3.3. Eğilme Dayanımı

Şekil 4.6'da SSB karışımlarının kontrol karışımına göre bağıl eğilme dayanımları sunulmuştur. Lif takviyesinin, lif türü veya uzunluğu fark etmeksizin eğilme dayanımında önemli bir iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir. Sharbatdar vd. (2022) tarafından elde edilen bulgularla tutarlı olarak, çelik ve WS liflerin, PP liflere kıyasla eğilme dayanımını daha fazla arttırdığı belirlenmiştir.. Bu sonuç, eğilme dayanımı çok daha yüksek olan çelik ve atık çelik liflerin beton matrisinde daha güçlü bağlar oluşturarak eğilme sırasında daha iyi performans sergilemesine bağlı olarak açıklanabilir.



Şekil 4.6. SSB numunelerinin kontrol numunesine göre bağıl eğilme dayanımları

Çelik ve WS lifler, yüksek çekme dayanımları sayesinde eğilme dayanımını arttırmıştır. SSB karışımlarının eğilme dayanımı, çelik ve WS liflerin daha uzun ve daha yüksek dozajlarıyla iyileşmiştir. PP lifli karışımlarda ise eğilme dayanımı %0.75'lik lif içeriğinden sonra azalmaya başlamıştır. Ancak, %1 ile %1.25 oranlarında lif içeriklerinde bile, PP lif takviyeli karışımlarda kontrol karışımına göre daha yüksek eğilme dayanımı elde edilmiştir. Eğilme dayanımındaki iyileşmenin, liflerin çatlakların oluşmasını ve yayılmasını engellemesinden ve çatlak yönlerini değiştirerek matris içinde daha etkili bir şekilde dağıtmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Hesami vd., 2016; Mardani vd., 2018; Qin vd., 2019; Ahmadi vd., 2021; Liang vd., 2022a). Ancak, optimum lif içeriğinin aşılması, lif kümelenmesine yol açarak karışımın homojenliğini bozmuş, lifler ile çimento matrisi arasındaki bağı zayıflatmış ve betonun gözenekliliğini arttırmıştır. Bu durum, betonun dayanım özelliklerini olumsuz yönde etkileyerek, özellikle yüksek lif içeriğiyle hazırlanan karışımlarda istenmeyen mekanik performans düşüşlerine neden olabilmektedir. Başka araştırmacılar tarafından da belirtildiği gibi bu faktörler, matris içinde zayıf bölgelerin gelişmesine neden olarak malzemenin genel dayanımını önemli ölçüde azaltmaktadır (Madhkhan vd., 2012; Benouadah vd., 2017; Haghnejad & Modarres, 2021; Liang vd., 2022a). Ancak, bazı çalışmalarda PP liflerin eğilme dayanımı

üzerinde önemli bir etkisi olmadığı veya olumsuz etkisi olduğu bildirilmiştir (Roesler vd., 2008; Rooholamini vd., 2018a; Ahmadi vd., 2021).

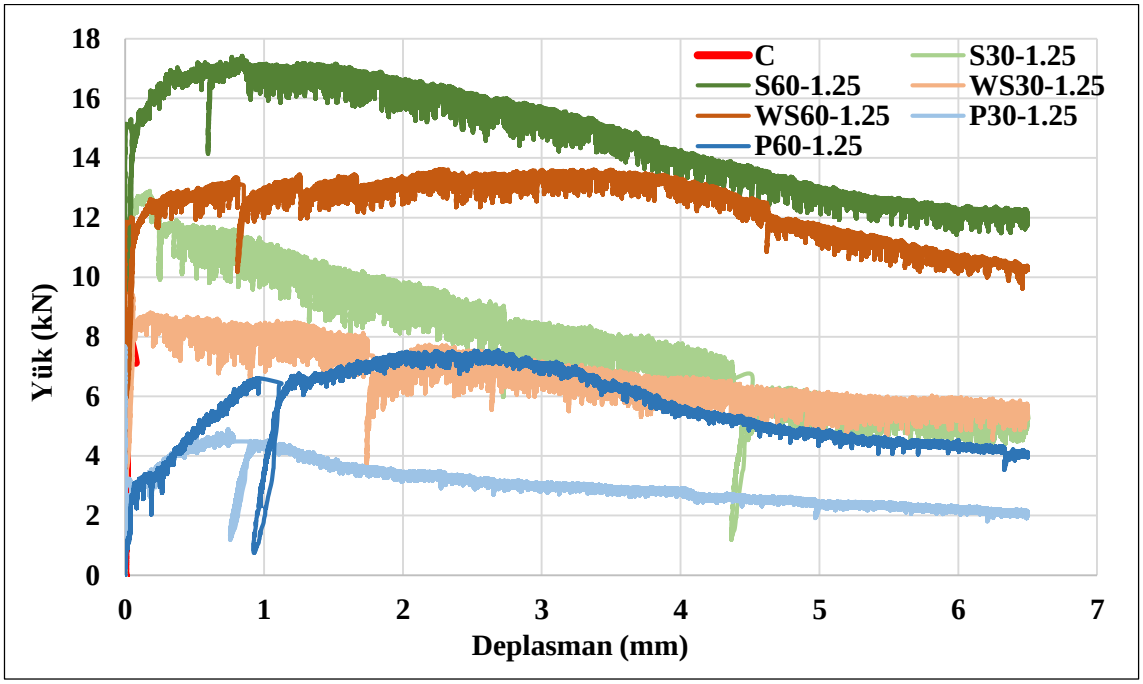
30 mm ve 60 mm çelik lif takviyesi ile kontrol karışımına göre eğilme dayanımında %6-41 ve %9-51 oranlarında artış olduğu gözlemlenmiştir. Çelik lif uzunluğunun 60 mm'ye çıkarılması sonucunda ise eğilme dayanımında %3-7 oranında bir iyileşme görülmüştür. Benzer olarak, 30 mm ve 60 mm atık çelif lif takviyesi ile eğilme dayanımında %3-36 ve %10-44 oranlarında iyileşme sağlanmıştır. WS liflerin uzunluğunun 30 mm'den 60 mm'ye çıkarılması ile, %7-8 oranında bir iyileşme sağlanmıştır. WS lifler çelik lifler ile kıyaslandığında, oldukça benzer sonuçlar elde edildiği ve atık çelik liflerin kayda değer bir iyileşme sağladığı görülmektedir.

30 mm ve 60 mm uzunluğundaki PP lifli karışımlarda ise, eğilme dayanımındaki artış oranları sırasıyla %1-5 ve %4-14 arasında olmuştur. PP liflerin uzunluğunun 60 mm'ye çıkarılması ile %4-12 oranında bir iyileşme olmuştur. Ancak, çelik lifler ve atık çelik liflerin, PP liflere kıyasla belirgin şekilde daha iyi performans sergilediği gözlemlenmektedir (Şekil 4.6). Bu davranışın, çekme dayanımı daha yüksek olan çelik ve atık çelik liflerin beton matrisine daha güçlü bağlanarak, yük taşıma kapasitesini daha etkili şekilde artırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

4.4. Enerji Yutma Kapasitesi

Şekil 4.7'de, %1.25 oranında çelik, WS ve PP lif takviyeli SSB karışımlarının yük-deplasman eğrileri sunulmuştur. Bu karışımların ve çalışmadaki diğer karışımların yük deplasman eğrileri kullanılarak elde edilen kırılma enerjileri Çizelge 4.3'de verilmiştir. Beklendiği gibi, lif takviyeli karışımlarda, artan lif içeriği ve uzunluğu ile belirgin şekilde daha yüksek kırılma enerjileri elde edilmiştir. Bu trend, önceki çalışmalarda elde edilen bulgularla uyumlu olmuştur (Alkan, 2004; Madhavi vd., 2014; Wang vd., 2019). Lif takviyesi, betonun kırılma enerjisini artırarak (Jia vd., 2011; Scorza vd., 2021) daha sünek bir davranış sergilemesine (Sukontasukkul vd., 2019; Majeed Abed vd., 2024) katkı sağlamakta ve bu da betonun çatlak büyümesini engelleyerek dayanımını artırmaktadır (Yazici vd., 2015; Liang vd., 2022a). Bu bulgular, lif içeriği ve uzunluğunun, özellikle

kırılma enerjisi gibi önemli mekanik parametreler üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

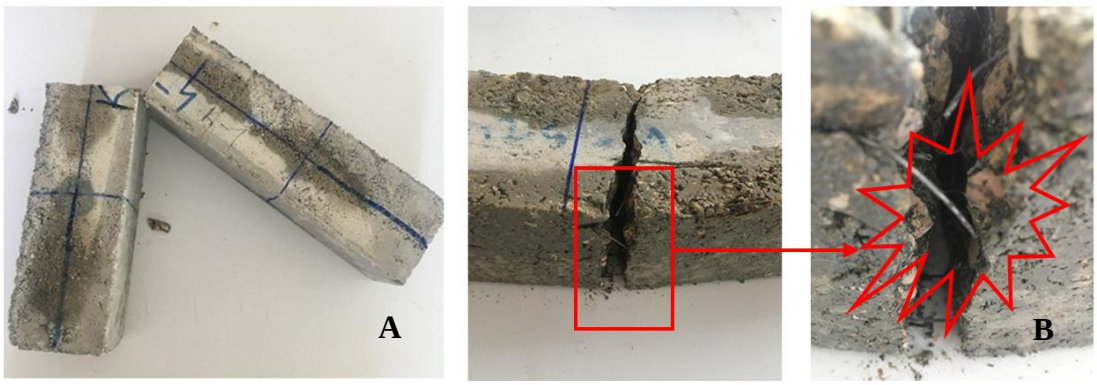


Şekil 4.7. %1,25 oranında S, PP ve WS lif içeren SSB numunelerinin yük-deplasman eğrileri

Kontrol karışımının ani ve gevrek bir şekilde kırıldığı (Şekil 4.8 A) durumun aksine, lif takviyeli numuneler, bir tepe noktasına ulaştıktan sonra yük taşımaya devam ederek kayda değer bir performans sergilemiştir. Liflerin köprüleme etkisi, çatlak yayılmasını önemli ölçüde azaltmış ve böylece deformasyon kapasitesini arttırmıştır (Karahan, 2006). Bu köprüleme etkisi, kirişlerin çatlamış kesitlerinde (Şekil 4.8 B) görünür olup, daha sünek davranışa ve deplasmanın artmasına katkı sağlamıştır. Lifler, çatlakların birleşmesini engelleyerek, betondaki mikro çatlaklardan kaynaklanan enerji kaybını azaltmış ve daha yüksek deformasyon kapasitesine sahip daha dayanıklı yapıların oluşmasına olanak tanımıştır (Rooholamini vd., 2018b). Bu durum, önceki çalışmalarda elde edilen sonuçlar ile tutarlılık göstermiştir (Dirikgil, 2009; Sharbatdar vd., 2022). Şekil 4.7'de görülen tırtıklı eğri oluşumunun, yükleme esnasında beton matrisinde bulunan liflerin yük karşılaması esnasında ortaya çıkan lif sıyrılmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.3. SSB karışımlarının kırılma enerjileri

Karışımlar	Kırılma enerjisi (J/m^2)
C	31
S30-0.25	1167
S30-0.50	3440
S30-0.75	3493
S30-1.00	3561
S30-1.25	4263
S60-0.25	3086
S60-0.50	3075
S60-0.75	7297
S60-1.00	8556
S60-1.25	9563
P30-0.25	633
P30-0.50	1017
P30-0.75	1228
P30-1.00	1395
P30-1.25	1559
P60-0.25	919
P60-0.50	1523
P60-0.75	1758
P60-1.00	3161
P60-1.25	2680
WS30-0.25	449
WS30-0.50	2613
WS30-0.75	2736
WS30-1.00	2964
WS30-1.25	3521
WS60-0.25	2509
WS60-0.50	3122
WS60-0.75	6128
WS60-1.00	7011
WS60-1.25	8189



Şekil 4.8. Eğilme testi sonrası numuneler, A) Kontrol numunesi, B) Lifli numune

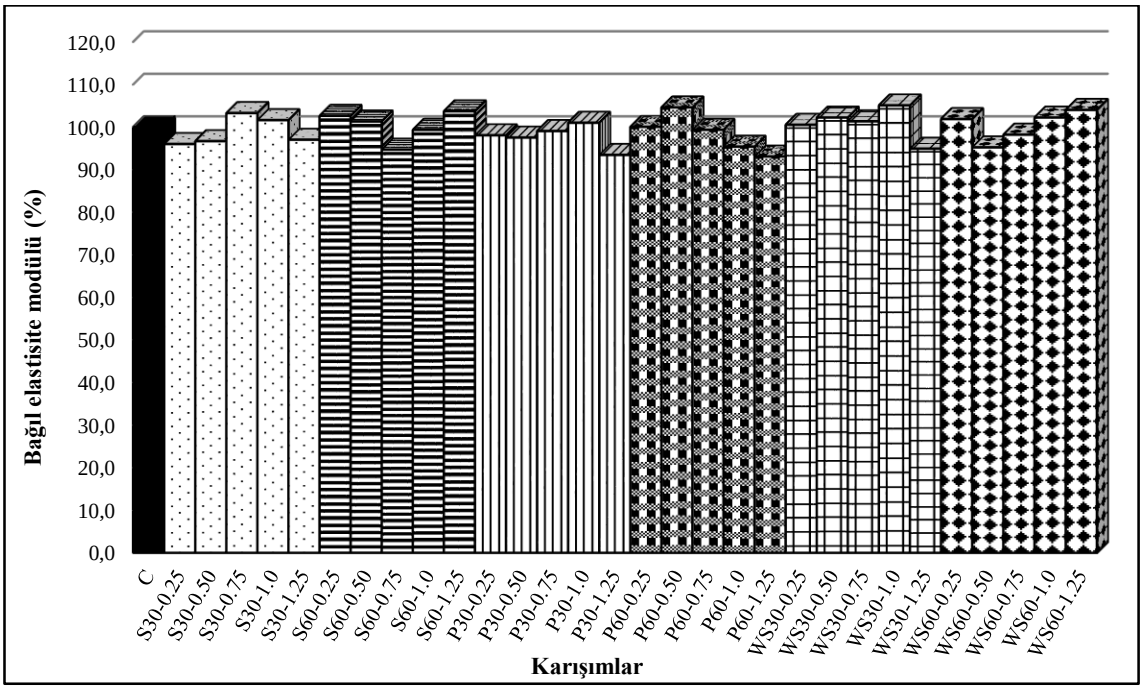
30 mm ve 60 mm uzunluğunda çelik lif takviyesi bulunan karışımlar, kontrol karışımına kıyasla kırılma enerjisinde sırasıyla, 37-137 kat ve 99-308 kat arasında belirgin bir artış göstermiştir. Çelik liflerin uzunluğunun 60 mm'ye çıkarılması, kırılma enerjisinde 2.24-2.64 kat arasında bir iyileşmeye yol açmıştır. Benzer şekilde, 30 mm ve 60 mm uzunluğundaki WS lifler, kırılma enerjisinde sırasıyla, 14-113 kat ve 80-264 kat arasında bir artış sağlamıştır. WS liflerin uzunluğunun 30 mm'den 60 mm'ye çıkarılması, kırılma enerjisinde 2.32 ile 5.59 kat arasında önemli bir iyileşme gözlemlenmiştir. 30 mm ve 60 mm uzunluğunda PP lif takviyesi içeren karışımlar ise, sırasıyla, 20-50 kat ve 29-86 kat arasında artış sergilemiştir. PP lif uzunluğunun 60 mm'ye çıkarılması sonucunda, kırılma enerjisinde 1.45-1.72 kat arasında bir artış elde edilmiştir. Bu sonuçlardan, lif uzunluğunun arttırılmasıyla kırılma enerjisinin en fazla etkilendiği karışımların WS lifli, en düşük etkiyi ise PP lifli karışımların gösterdiği anlaşılmıştır.

Etkili yük transferi, lifler ile matris arasındaki bağın ne kadar güçlü olduğu ile değişkenlik göstermektedir. Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi, çelik liflerin üstün bağlanma özellikleri nedeniyle betonun kırılma enerjisine en fazla olumlu etkisi olduğu, dolaysıyla PP ile WS liflerine kıyasla daha verimli bir yük transferi sağladığı doğrulamaktadır. Atık çelik lifleri, çelik liflerine benzer bir davranış sergilerken, PP lifler, matristen daha kolay sıyrılabilmekte ve bu da köprüleme etkinliklerini sınırlamaktadır. Bu bulgulara benzer sonuçlar literatürdeki bazı çalışmalar sonucunda da elde edilmiştir (Li, 2011; Madhkhan vd., 2012; Rooholamini vd., 2018a). Yuan vd. (2020), çelik liflerin SSB'de hem kırılma enerjisini hem de tokluğu arttırmada önemli etkisi olduğunu vurgulamıştır.

Bu çalışma, çelik ve WS lif uzunluğunun kırılma enerjisini arttırmadaki önemli rolünü vurgulamaktadır. Daha uzun lifler, matrisle daha geniş bir bağ yüzeyi oluşturarak çekme gerilmesine karşı daha yüksek direnç göstererek kırılma enerjisinde önemli bir artışa yol açmaktadır. Buna karşılık, daha kısa lifler, daha küçük bağ alanlarına sahip oldukları için daha kolay bir şekilde sıyrılabildiğinden kırılma direncinde sağladıkları artış uzun liflere kıyasla çok daha az olabilmektedir. Bu bulgular, literatürdeki bazı çalışmalarla benzerlik göstermektedir (Yoo vd., 2014; Yu vd., 2015; Ouedraogo vd., 2021).

4.5. Elastisite Modülü

SSB karışımlarının kontrol karışımına göre bağıl elastisite modülü değerleri Şekil 4.9'da görülmekte olup, 29.64 ile 33.47 GPa arasında değişmektedir (Çizelge 4.1).



Şekil 4.9. SSB numunelerinin kontrol numunesine göre bağıl elastisite modülü değerleri

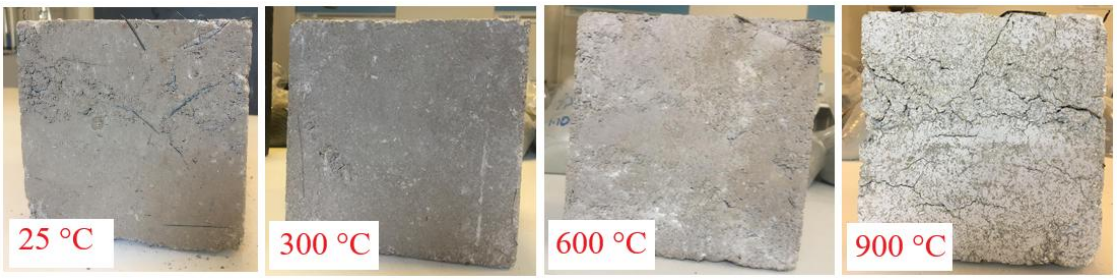
Şekilden elde edilen sonuçlara göre, lif türünün, uzunluğunun veya dozajının elastisite modülü üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı görülmektedir. Bu gözlem, birçok araştırmacı tarafından da vurgulanmıştır (Şahin & Köksal, 2011; LaHucik vd. 2017; Ouedraogo vd. 2021). SSB karışımlarının elastisite modülü üzerine yapılan araştırmaların oldukça sınırlı sayıda olduğu anlaşılmıştır. SSB'nin elastik özellikleri, genellikle kür süresi, basınç dayanımı, hamur hacmi ve agrega türü gibi faktörlerden etkilenebilmektedir (ACI 207.5R-99). Genel olarak, SSB'nin elastisite modülünün, geleneksel betonla karşılaştırıldığında benzer veya biraz daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Tayabji vd., 1995). Bu durumun, karışımda bağlayıcı hacminin daha düşük, rijitliği sağlayan agrega fazının daha fazla miktarda olduğundan kaynaklandığı vurgulanmıştır (Calis & Yıldızel, 2019; Keleş vd., 2024).

4.6. Yüksek Sıcaklık Koşullarında Davranış

Farklı sıcaklık derecelerine maruz bırakılan lifli ve lifsiz SSB karışımlarının sertleşmiş hal özellikleri; yüksek sıcaklık sonrası numunelerde oluşan yüzeysel hasar, basınç yükü altındaki kırılma davranışı, basınç dayanımı ve su emme kapasitesindeki değişimler kapsamında detaylı olarak incelenmiştir.

4.6.1. Yüksek Sıcaklık Sonrası Numunelerde Oluşan Yüzeysel Hasar

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan bütün SSB numunelerinde sıcaklık artışına paralel olarak karakteristik renk değişimleri gözlemlenmiştir. Bu değişimler, farklı lif türlerine rağmen tutarlı bir şekilde aynı sıcaklık seviyelerinde benzer renk geçişleri göstermiştir. Lif türünden bağımsız olarak renk değişimleri aynı olduğundan örnek olarak sadece WS lif içeren karışımların renk değişimi sunulmuştur. WS lif takviyeli numunelerde; 25°C'de standart gri renk, 300°C'de soluk sarımsı bir ton, 600°C'de belirgin kırmızımsı renk ve 900°C'de yeşilimsi-gri tonların hakim olduğu görülmüştür (Şekil 4.10). Bu renk evrimi, beton bileşenlerindeki termokimyasal dönüşümlerle doğrudan ilişkilidir. 300°C'den itibaren gözlenen sarı tonlar, kimyasal olarak bağlı olmayan suların kaybının genel olarak tamamlandığını ve çimento hidratasyon ürünlerinin hızla ayrışmaya başladığını göstermektedir (Bao vd., 2023). 600°C'deki kırmızımsı rengin demir oksit oluşumunu (Beytekin vd., 2025) ve 900°C'deki yeşilimsi tonların ise agregalardaki mineralojik dönüşümleri yansıttığı (Guo vd., 2021) değerlendirilmektedir. Renk değişimlerinin tüm numunelerde paralellik göstermesi, termal bozunma mekanizmalarının lif türünden bağımsız olarak benzer şekilde ilerlediğini ortaya koymaktadır. Ancak, lif kullanımı ve kullanım oranının artışıyla numune yüzeylerinde daha boşluklu bir yapı olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.10. Yüksek sıcaklık sonrası SSB numunelerinin renk değişimi

900 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra 24 saat boyunca açık hava şartlarında bekletilen numunelerde belirgin yapısal bozulmalar gözlemlenmiştir (Şekil 4.11). Bu durum, yüksek sıcaklıkta kalsiyum hidroksitin ($Ca(OH)_2$) kalsiyum oksit CaO ve suya (H_2O) ayrışması sonucu ortaya çıkmaktadır (Kaya vd., 2023). Bu kimyasal dönüşüm sırasında yaklaşık %40 oranında hacim kaybı meydana gelmekte, ardından havadaki nem ve karbondioksit ile temas eden CaO, tekrar $Ca(OH)_2$ ve kalsiyum karbonata ($CaCO_3$) dönüşerek genleşmeye neden olmaktadır (Şahin vd., 2024). Bu karşıt reaksiyonlar, beton içinde ciddi iç gerilmeler oluşturmakta ve yapısal bütünlüğün bozulmasına yol açmaktadır.

Liflerin köprüleme etkisi sayesinde çatlak ilerlemesi büyük ölçüde engellenmiş olduğu düşünülmektedir (Irshidat et al., 2021). Ancak bu olumlu etkinin, liflerin termal dayanımıyla doğrudan ilişkili olduğu bilinmektedir (Agra vd., 2021). Buna bağlı olarak, 300, 600 ve 900 °C sıcaklıklara maruz bırakılan lifler üzerinde yapılan mikroskobik incelemeler (Şekil 4.12 ve Şekil 4.13), liflerin yapısal değişimlerini açıkça ortaya koymaktadır.

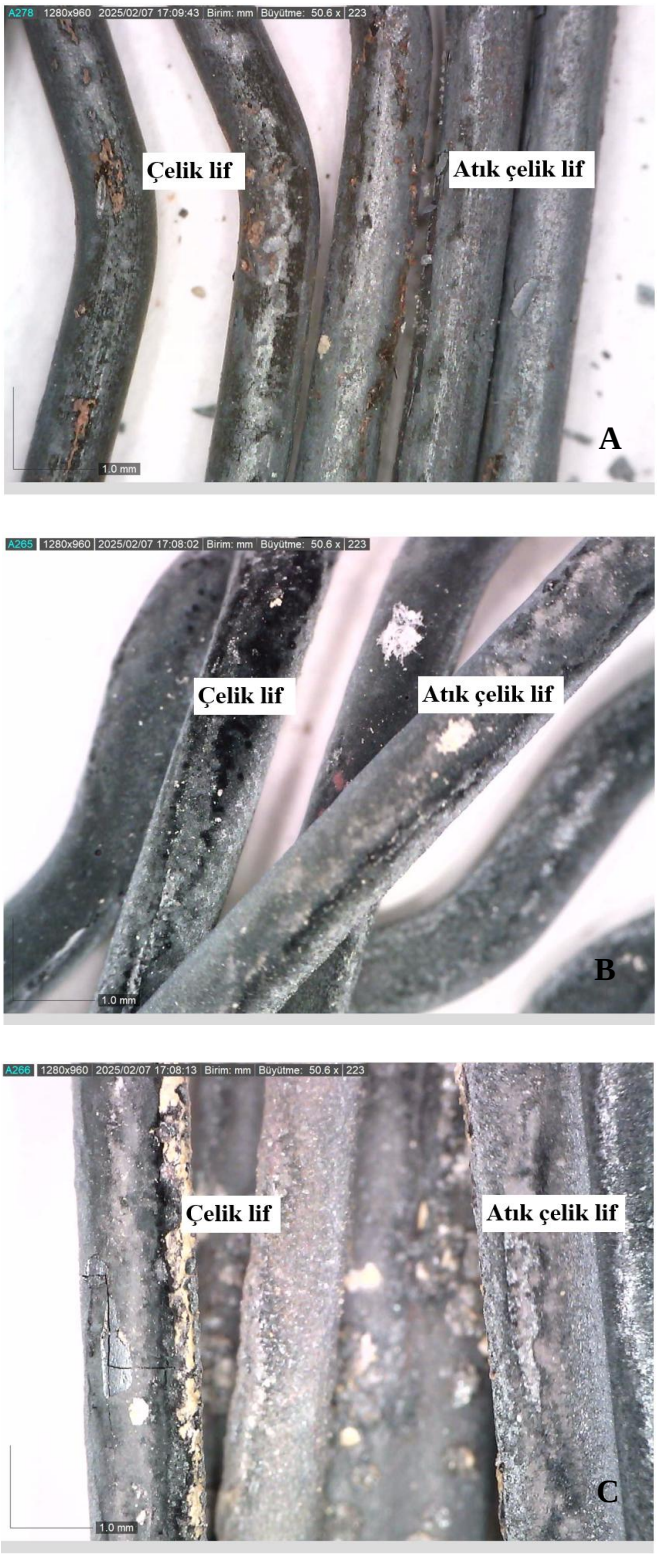
300 °C'de S ve WS liflerde önemli bir bozulma gözlenmezken, 600°C'de her iki lif türünde de yüzey çatlakları ve lokal erimeler başlamaktadır. 900°C'ye ulaşıldığında ise liflerde ciddi çatlaklar, kopmalar ve belirgin bir gevrek kırılgan davranış gözlenmektedir. Özellikle bu yüksek sıcaklıkta, liflerin taşıyıcılık özelliğini büyük ölçüde kaybettiği ve matrisle olan bağlantılarının zayıfladığı tespit edilmiştir. PP lifler ise 170°C'de tamamen eridiğinden, yüksek sıcaklık performansı açısından diğer lif türlerine göre daha sınırlı kalmıştır.



Şekil 4.11. 900°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra 24 saat boyunca hava koşullarında bekletilen SSB numuneleri

Lif türü	Fiziksel hasar		
	300°C	600°C	900°C
Çelik			
Atık Çelik			
Polipropilen			

Şekil 4.12. SSB karışımlarında kullanılan 300, 600 ve 900 °C sıcaklığa maruz bırakılan liflerin fiziksel değişimleri



Şekil 4.13. SSB karışımlarında kullanılan A) 300, B) 600 ve C) 900 °C sıcaklığa maruz bırakılan liflerin mikroskop görüntüleri

4.6.2. Farklı Sıcaklık Derecelerine Maruz Bırakılan SSB Karışımlarının Basınç Yükü Altındaki Kırılma Davranışlarının Gözlemsel Olarak İncelenmesi

Lif kullanımı ile sıcaklık değişiminin, basınç yükü altındaki numunelerin kırılma davranışlarına etkisini incelemek amacıyla, basınç dayanımı testi sonrası numunelerin kırılma biçimleri analiz edilmiştir. Bu doğrultuda kontrol ve lif takviyeli SSB numuneleri, 300, 600 ve 900 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanımı testine tabi tutulmuş olup, elde edilen kırılma biçimleri Şekil 4.14'te sunulmuştur. S ve WS lifli karışımlarda benzer kırılma biçimleri gözlemlendiğinden örneklem olarak yalnızca WS lif içeren karışımlara ait kırılma davranışları değerlendirilmiştir.

Kırılma davranışı incelendiğinde, sıcaklık artışına bağlı olarak belirgin bir evrim gözlenmiştir. Lif kullanımı ile çekme dayanımındaki artışın, yanal deformasyonları sınırlandırdığı ve yüksek sıcaklık sonrası numunelerin bütünlüğünü korumasına katkı sağladığı gözlemlenmiştir. 300 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda, çimento hidratasyon ürünlerindeki bozunmanın sınırlı düzeyde kalması (Mardani-Aghabaglou vd., 2018) ve liflerin köprüleme etkisi (Bao vd., 2023) sayesinde numunelerin bütünlüğünün korunduğu ve tam dağılmanın önlendiği tespit edilmiştir. Özellikle çelik ve atık çelik lif takviyeli numunelerde bu stabilizasyon etkisi belirgin şekilde görülmüştür.

PP lifli karışımlarda gözlenen davranış diğer lif türlerinden belirgin şekilde farklılık göstermektedir. PP liflerin nispeten düşük erime sıcaklığı (170 °C, Tablo 3), beton matrisinde karakteristik mikro boşluk ağları oluşturmaktadır (Şekil 4.15). Bu boşluklar, basınç testleri sırasında stres yoğunlaşma bölgeleri haline gelerek çatlak oluşumunu kolaylaştırmakta ve özellikle %1.25 gibi yüksek dozajlı karışımlarda yüzey bütünlüğünü önemli ölçüde bozmaktadır (Şekil 4.14). Ancak, paradoksal bir şekilde, bu erime davranışı yüksek sıcaklık performansı açısından avantaja dönüşebilmektedir. Literatür verileri, PP liflerin erimesi sonucu oluşan boşluk ağlarının, 300°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda beton içinde biriken buhar basıncının dağıtılmasına olanak sağladığını ve böylece patlama (spalling) direncini artırdığını göstermektedir. PP liflerin bu ikili etkisi - bir yanda oda sıcaklığındaki mekanik performansı olumsuz etkilerken diğer yanda yüksek

sıcaklıkta patlama direncini artırması - mühendislik uygulamalarında dikkatli bir optimizasyon gerektirmektedir.

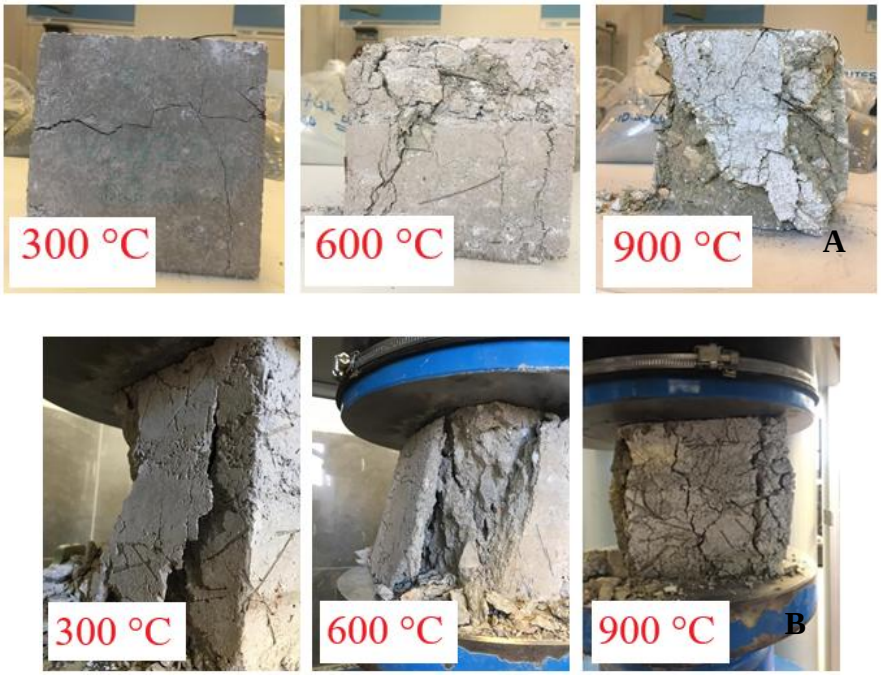
400-600°C aralığında, $Ca(OH)_2$'nin dehidroksilasyonu (Mardani-Aghabaglou vd., 2016) sonucu malzeme yapısında bozulmaların başlaması; 600°C'nin üzerinde ise kireçtaşı agregalarının ayrışması (Durgun vd., 2022) nedeniyle oluşan mikro yapısal hasarlar, çatlak oluşumunu önemli ölçüde arttırmıştır. Bu sıcaklık seviyesinde, S ve WS liflerin çatlak önleme kapasitelerinde önemli düşüşler gözlenmiştir. Liflerin termal genleşme katsayıları ile beton matrisi arasındaki uyumsuzluk, arayüzey bölgesinde mikro çatlakların oluşmasına yol açmakta ve bu durum numunelerin boyutsal kararlılığını olumsuz etkilemektedir (Haddad vd., 2008; Gao vd., 2024). Bu bağlamda, sıcaklığın artması ile numunelerin ezilerek dağıldığı ve pul pul döküldüğü gözlemlenmiştir. Bu bulgular, yüksek sıcaklık koşullarında lif takviyesinin beton performansı üzerindeki kritik rolünü ortaya koymaktadır.

PP lif içeren karışımlarda ise durum daha kritik olmaktadır. PP liflerin 170°C'de tamamen erimesi sonucu oluşan boşluklar, 600°C'de malzeme bütünlüğünü ciddi şekilde bozmaktadır (Şekil 4.14). Bu karışımlarda gözlenen yoğun çatlak ağları ve yapısal dağılma, PP liflerin bu sıcaklık seviyesinde tamamen işlevsiz hale geldiğini göstermektedir.

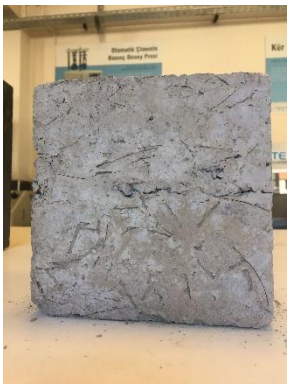
900 °C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde gözlenen yapısal bozulmalar oldukça ileri düzeyde olmuştur. Basınç dayanımı testleri sonucunda, numunelerin neredeyse tamamen dağıldığı ve çatlakların geniş ölçekte yayılım gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durumun temel nedeni olarak, beton matrisindeki kimyasal bağlı suların buharlaşması ve bunun sonucunda porozitede meydana gelen kritik artış gösterilebilir (Düğenci vd., 2015).

Ayrıca, C-S-H jelinin büyük oranda bozunması ve kalsiyum karbonatın ($CaCO_3$) dekompozisyonu, malzemenin iç yapısında geri dönüşümsüz hasarlara yol açmaktadır (Bangi & Horiguchi, 2012; Liang vd., 2025). Ancak, S ve WS lif takviyeli numunelerde bu olumsuz etkiler kısmen kontrol altına alınabilmiştir. PP lifli karışımlarda ise betonun

hem dış kabuğunun hem de içyapısının neredeyse tamamen parçalandığı görülmüştür (Şekil 4.14).



Şekil 4.14. SSB numunelerinin, 300, 600 ve 900 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanımı testi sonrası kırılma biçimleri, A) WS lif takviyeli numune, B) PP lif takviyeli numune



Şekil 4.15. PP lifli karışımda lif erimesi kaynaklı boşluk oluşumu

Bu çalışmada, SSB karışımlarının yüksek sıcaklık koşullarındaki performansı, basınç dayanımı ve su emme kapasitesindeki değişimler temelinde değerlendirilmiştir. Farklı sıcaklığa maruz bırakılan SSB karışımlarının basınç dayanımı, su emme kapasitesi ve

ağırlık kayıpları Çizelge 4.4'te özetlenmiştir. Deneysel sonuçlar, sıcaklık artışına bağlı olarak su emme kapasitesinde önemli artışlar olduğunu göstermektedir. 300°C'de %6-57 oranında gözlenen su emme artışı, 900°C'ye ulaşıldığında 1.58 ile 2.87 kat aralığında artmıştır. Basınç dayanımındaki kayıplar ise 600°C'de %20-40 aralığında iken, 900°C'de bu kayıp %84-93'e yükselmiştir. Özellikle PP lif içeren karışımlarda belirgin olan ağırlık kayıpları, 900°C'de %9-16 arasında değişim göstermiştir.

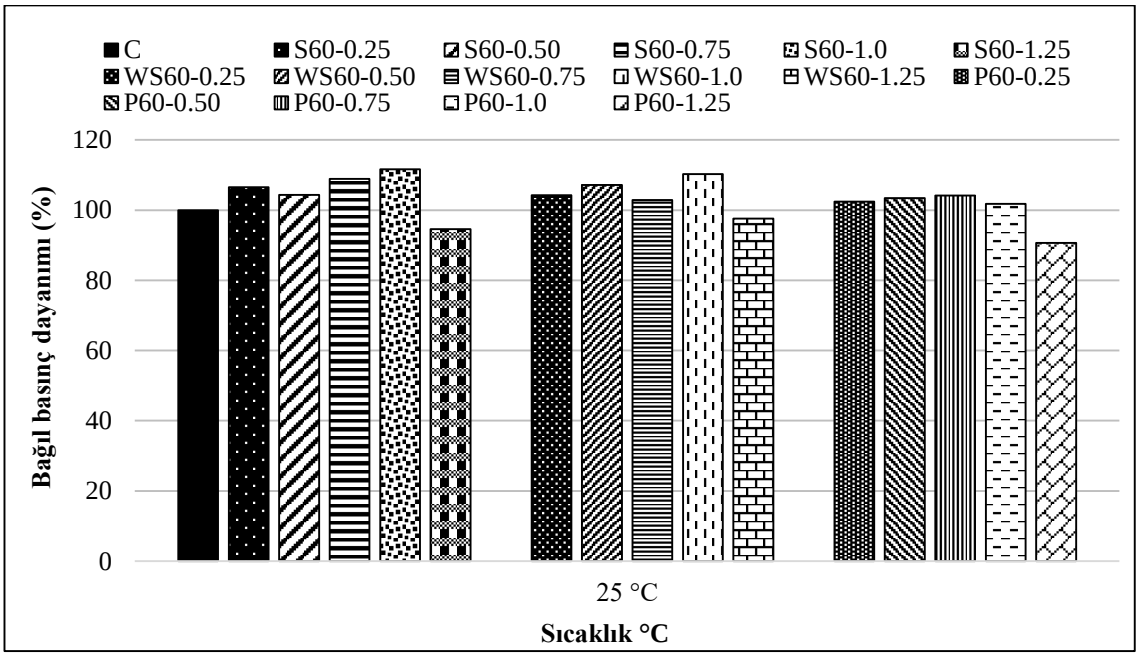
Çizelge 4.4. SSB karışımlarının su emme kapasiteleri, basınç dayanımları ve ağırlık kayıpları

Sıcaklık	**25 °C**		**300 °C**			**600 °C**			**900 °C**		
Karışım	**BD* (MPa)**	**SEK ** (%)**	**BD (MPa)**	**SEK (%)**	**AK *** (%)**	**BD (MPa)**	**SEK (%)**	**AK (%)**	**BD (MPa)**	**SEK (%)**	**AK (%)**
C	59,70	1,55	64,53	2,18	1,73	35,67	4,07	5,19	5,53	6,01	10,86
S60-0.25	63,61	2,19	65,18	2,45	1,89	41,09	4,23	5,40	9,09	6,07	11,52
S60-0.50	62,27	2,31	63,71	2,76	2,19	41,58	5,11	5,62	9,46	6,85	11,11
S60-0.75	65,02	2,91	67,66	3,39	2,50	42,81	6,23	6,32	9,49	8,92	11,13
S60-1.0	66,64	3,37	71,55	4,24	3,11	44,95	7,38	7,07	10,12	10,83	10,86
S60-1.25	56,48	4,01	59,03	5,19	3,36	37,04	9,27	7,89	8,93	12,43	12,21
WS60-0.25	62,23	2,11	62,87	2,23	1,97	43,71	3,95	4,88	8,19	5,46	11,30
WS60-0.50	63,98	2,33	64,22	2,71	2,33	45,87	4,67	5,53	8,02	6,51	11,57
WS60-0.75	61,44	2,67	65,15	3,16	2,66	46,31	5,51	6,40	7,55	7,89	11,57
WS60-1.0	65,81	3,21	68,01	3,90	3,07	48,99	6,73	6,25	9,46	9,78	9,53
WS60-1.25	58,25	3,75	61,47	4,93	2,88	43,26	8,56	6,96	9,51	11,67	12,52
P60-0.25	61,12	2,09	57,94	2,87	2,49	46,55	4,51	6,00	6,16	6,53	14,16
P60-0.50	61,73	2,21	56,21	3,17	2,77	47,84	5,29	6,96	4,82	7,50	12,26
P60-0.75	62,16	2,56	57,83	3,69	2,89	46,78	6,42	6,57	5,89	8,48	13,73
P60-1.0	60,77	2,98	55,14	4,41	3,06	48,51	7,60	7,13	5,78	10,62	14,17
P60-1.25	54,10	3,32	47,32	5,22	3,74	43,47	9,53	7,84	4,69	12,85	14,79

*** basınç dayanımı, ** su emme kapasitesi, *** ağırlık kaybı**

4.6.3. SSB Karışımlarının Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı Değişimi

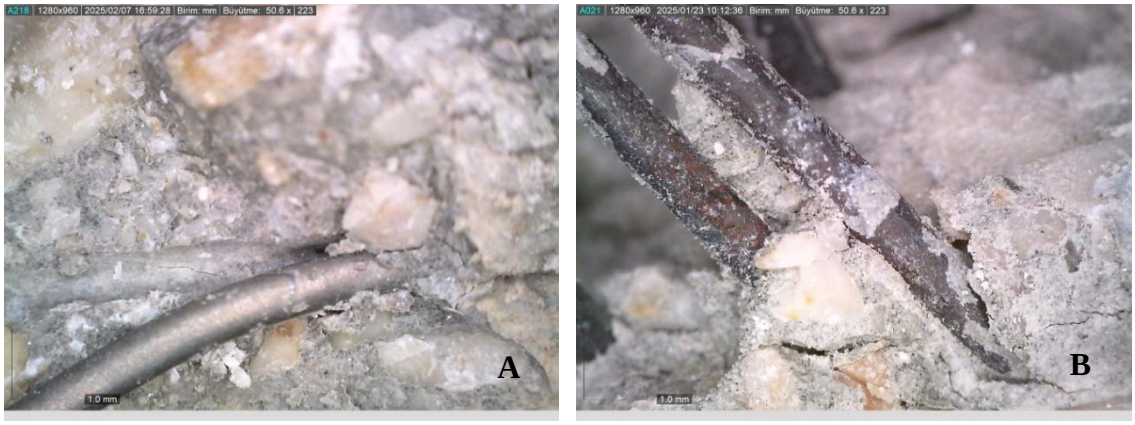
Tüm SSB karışımlarının kontrol karışımına kıyasla 25°C sıcaklıktaki bağıl basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.16'te sunulmuştur.



Şekil 4.16. Tüm SSB numunelerinin kontrol numunesine kıyasla 25°C sıcaklıktaki bağıl basınç dayanımları

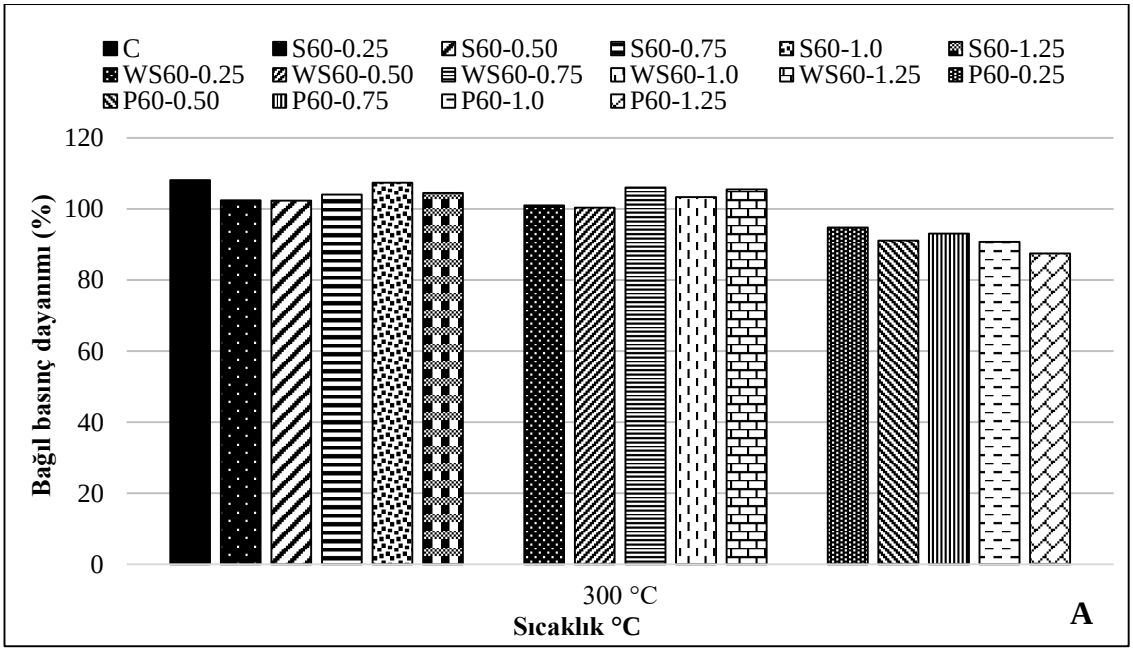
25°C sıcaklıktaki numuneler incelendiğinde, lif türünden bağımsız olarak, lif takviyeli SSB karışımlarının basınç dayanımında genel bir artış gözlenmiştir. Bu artış, liflerin yatay gerilmeleri azaltılması ve çatlak ilerlemesini engellenmesi sayesinde olmuştur (Madhkhan vd., 2012; Ouedraogo vd., 2021). S lifler maksimum %11, WS lifler %9 ve PP lifler %4 oranında dayanım artışı sağlamıştır. Benzer sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir (Saidani vd., 2016; Fallah & Nematzadeh, 2017). Basınç dayanımı açısından, S ve WS lifli SSB karışımları için optimum lif kullanım oranlarının %1.0 ve PP lifli karışım için %0.75 olduğu belirlenmiştir. Bu oranın üzerinde lif kullanımı ile karışımların basınç dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından da rapor edilmiştir (Paul vd., 2020; Yuan & Jia, 2021). Bu durumun, lif mikarının artışı ile liflerin homojen dağılımının zorlaştığı (Mardani-Aghabaglou vd., 2018), sıkıştırılabilirliğin azalması (Jafarifar vd., 2017) ve kümelerin

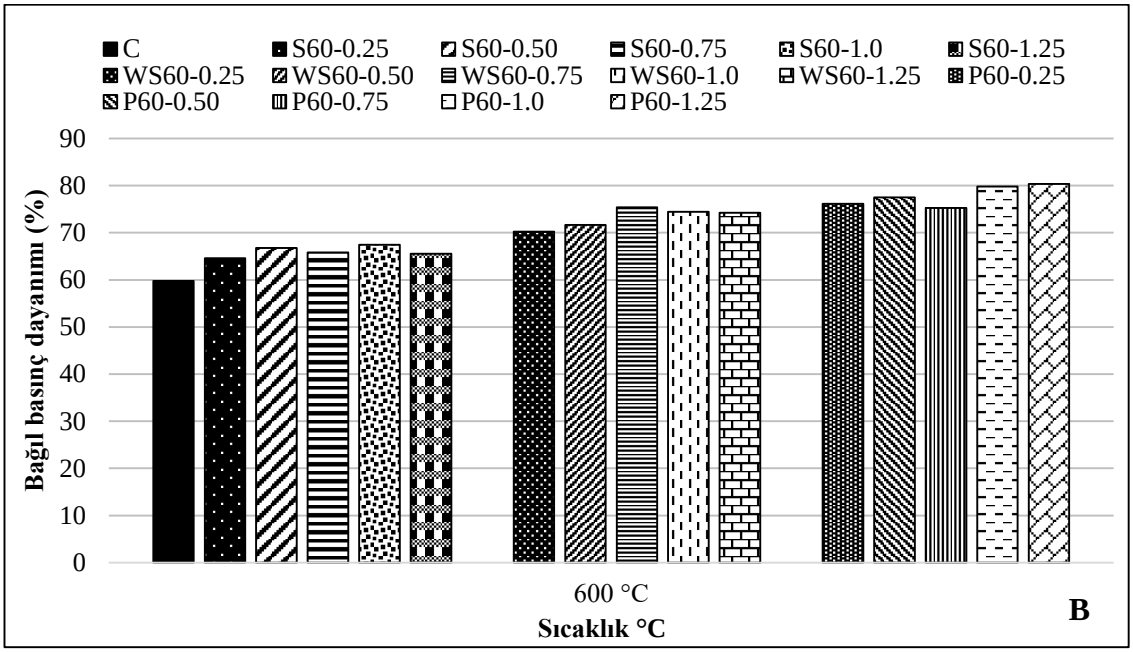
oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Rooholamini vd., 2023). %1.25 oranında S ve WS lif taviyeli karışımlarda lif kümelenmesinin oluştuğu Şekil 4.17'den de anlaşılmıştır.

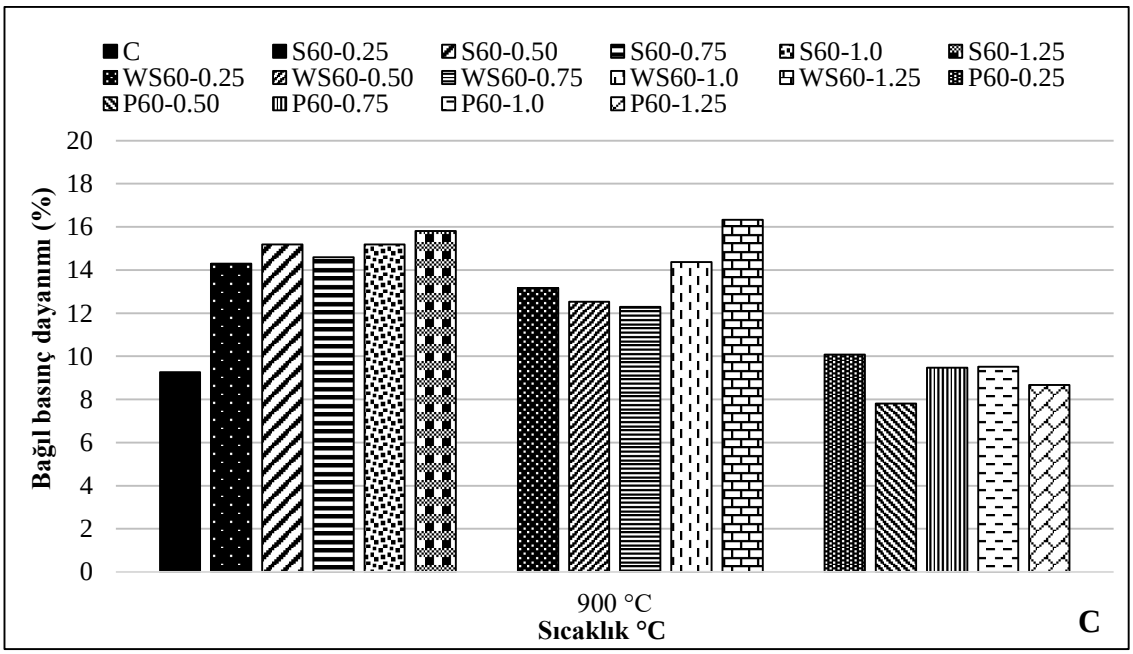


Şekil 4.17. Lif fazlalığından kaynaklanan kümelenmeler ve çatlak oluşumları, A) çelik lifli numune, B) WS lifli numune

300, 600 ve 900°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin 25°C'deki numunelere kıyasla bağıl basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.18 A-C'de sunulmaktadır.







Şekil 4.18. Farklı sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin 25 °C'deki numunelere kıyasla bağıl basınç dayanımları A) 300, B) 600 ve C) 900 °C

300 °C sıcaklığa maruz kalan lif takviyeli SSB karışımlarının basınç dayanımı incelendiğinde, kontrol karışımında %8 oranında daha yüksek bir dayanım artışı kaydedilmiştir. Bu durum, sıcaklık artışına bağlı olarak matris içerisindeki Van der Waals kuvvetlerinin güçlenmesi (Huang vd., 2022), hidrat olmayan çimento tanelerinin hidratasyonunun ilerlemesi (Ji vd., 2024) ve C-S-H fazına kıyasla daha kompakt bir yapıya sahip olan tobermorit jel oluşumunun gerçekleşmesiyle açıklanabilir (Abid vd., 2019).

Lif takviyeli beton karışımlarının yüksek sıcaklık direncinin, liflerin erime noktası, yüzey özellikleri ve termal davranışlarına oldukça bağlı olduğu bildirilmiştir (Shaikh & Taweel, 2015; Liao vd., 2024). S ve WS lifli numunelerde sırasıyla, %2-7 ve %1-6 oranlarında dayanım artışı gözlemlenmiştir (Şekil 4.18A). Bu artışın, daha önce belirtilen etkenler sonucu C-S-H fazının yoğunlaşması ve bunun sonucunda lif-matris aderansının güçlenmesi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir (Ji vd., 2024). Şekil 4.19'da gösterildiği üzere, 300 °C'ye maruz bırakılan S ve WS lifli karışımlarda lif-matris ara yüzeyinin kompakt bir yapı sergilemesi, bu hipotezi desteklemektedir. Ayrıca, çimento hamurunun genleşme katsayısının (10×10^{-6} /°C) çelik lifinkine (8.2×10^{-6} /°C) yakın olması, sıcaklık etkisi altında lif-matris aderansının büyük ölçüde korunmasını sağlamaktadır (Sellevold & Bjøntegaard, 2006; Thomas & Ramaswamy, 2007).

300 °C'ye kadar sıcaklık artışı, PP lif içeren SSB karışımlarının basınç dayanımını olumsuz etkilemiştir ve bu etki, lif dozajı arttıkça daha belirgin hale gelmiştir. PP lifli karışımlarda, sıcaklığın 25°C'den 300 °C'ye yükselmesiyle basınç dayanımında %6-14 oranında azalma gözlemlenmiştir. Literatürde, PP liflerinin 160-170°C'de erimesiyle oluşan boşlukların ozmotik basınç için bir alan sağlayarak yüksek sıcaklık direncini artırdığı belirtilmiştir (Beytekin vd., 2025). Ancak, bu çalışmada aksine bir durum gözlemlenmiş olup, dayanım kaybının, liflerin erimesiyle oluşan mikro boşluklar ve buharlaşma basıncının neden olduğu ikincil çatlaklardan kaynaklandığı düşünülmektedir (Şekil 4.20).

Sıcaklığın 25°C'den 600 °C'ye yükselmesiyle kontrol, S, WS ve PP lifli karışımların basınç dayanımında sırasıyla, %40, %33, %27 ve %22'lik azalma tespit edilmiştir (Şekil

4.18B). Lif türünden bağımsız olarak lif içeren karışımlarda yüksek sıcaklık sonucu dayanım kaybının kontrol karışımına kıyasla daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Beton karışımlarında hidratasyon sonucu oluşan kalsiyum hidroksit $Ca(OH)_2$'in yapısındaki kimyasal olarak bağlı suyun, sıcaklık 500 °C'ye ulaştığında su buharına dönüşerek sönmüş kirecin kalsiyum oksit (CaO)'e dönüşmesine sebep olduğu bilinmektedir (Gautam & Charak, 2024). $Ca(OH)_2$'in sönmemiş kireç ve su buharına dönüşmesinin dayanım açısından büyük bir kayıp yaratmadığı, ancak kirece bağlı suyun buharlaşmasının iç gerilmeler yaratması ve soğuma sırasında kirecin sönmesi sonucu oluşan genleşmenin hasara neden olduğu düşünülmektedir (Kara, 2021; Li vd., 2021). S ve WS liflerin 600 °C sıcaklıkta erimemesi (Şekil 4.21A ve B) ve matriste var olması sonucunda sıcaklık etkisiyle oluşan genleşmeyi kısaltacağından dolayı S ve WS lifli karışımların kontrol karışımına kıyasla yüksek sıcaklık açısından daha üstün performans sergilediği düşünülmektedir. Benzer sonuçlar diğer araştırmacılar tarafında da rapor edilmiştir (Cui vd., 2022; Yang vd., 2024; Yassin vd., 2024; Li vd., 2025). PP lifinin ise 160-170°C'de erimesiyle matriste ekstra boşluk oluşturarak, (Şekil 4.21C) sıcaklık etkisiyle oluşan ozmotik basıncı minimize etme mekanizması ile kontrol karışımına kıyasla yüksek sıcaklık direncinin daha fazla olduğu görülmüştür (Li vd., 2019).

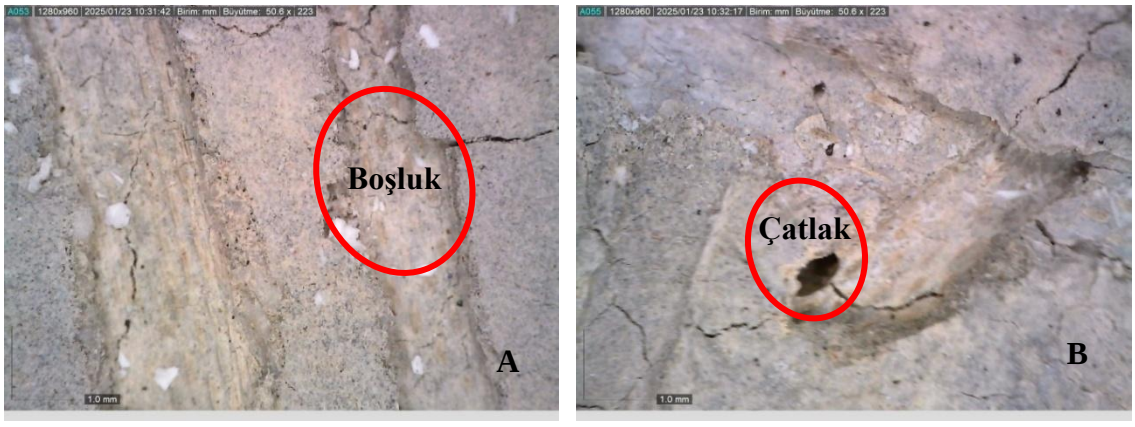
PP lifli karışımlar diğer 2 lif türüne kıyasla 600 °C'de yüksek sıcaklık açısından daha üstün performans sergilemiştir. Söz konusu sıcaklıkta matriste yüksek miktarda ozmotik basıncın oluştuğu bilinmektedir. S ve WS liflerin erimeden kalması buhar basıncının dağılmasını engellemiş, ayrıca liflerin beton matrisiyle termal genleşme katsayıları arasındaki uyumsuzluk (Li vd., 2023) arayüzey bölgelerinde çatlak oluşumunu tetiklemiştir (Şekil 4.21).

Sıcaklığın 25°C'den 900 °C'ye yükselmesiyle kontrol, S, WS ve PP lifli karışımların basınç dayanımında ortalama olarak sırasıyla, %91, %85, %86 ve %91'lik azalma tespit edilmiştir (Şekil 4.18C). Bu aşırı termal bozunma sürecinde, betonun temel bağlayıcı fazı olan C-S-H jelinin kimyasal olarak bağlı suyunu kaybetmesi (Long vd., 2024) ve kireçtaşı agregaların parçalanması (Tanyildizi vd., 2020) dayanım kaybının ana mekanizmaları olarak belirlenmiştir (Şekil 4.22). Özellikle soğuma aşamasında kalsiyum oksitin (CaO) nem ve CO_2 ile reaksiyona girerek $Ca(OH)_2$ ve $CaCO_3$'e dönüşmesi sonucu oluşan

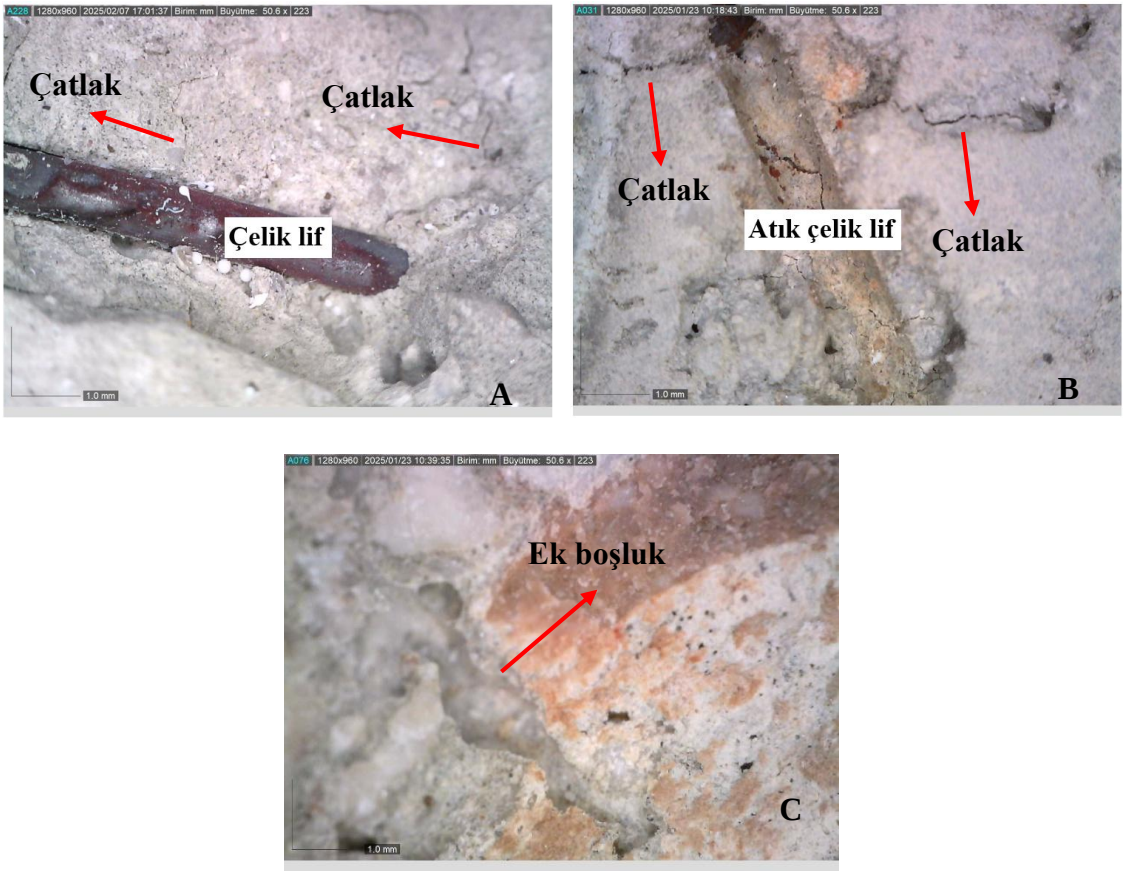
yaklaşık %40'lık hacim artışı (Beytekin vd., 2025), numunelerde gözlemlenen yapısal çökmenin temel nedeni olarak karşımıza çıkmaktadır (Şekil 4.11). S ve WS lifli karışımların yüksek sıcaklık performansının kontrol ve PP lifli karışımlardan daha üstün olduğu anlaşılmıştır. Lif takviyeli karışımlarda, S ve WS liflerin 900 °C'de erimeden kalmasına rağmen, lif-hamur arayüzeyindeki termal uyumsuzlukların şiddetlenmesi (Ba vd., 2016) ve lif yüzeylerinde oluşan makro çatlaklar (Şekil 4.22), dayanım kaybını hızlandıran kritik faktörler olarak tespit edilmiştir. Bu bulgular, ultra yüksek sıcaklıklarda beton performansının büyük ölçüde agrega stabilitesi ve arayüzey bölgesi dayanımı tarafından belirlendiğini ortaya koymaktadır.



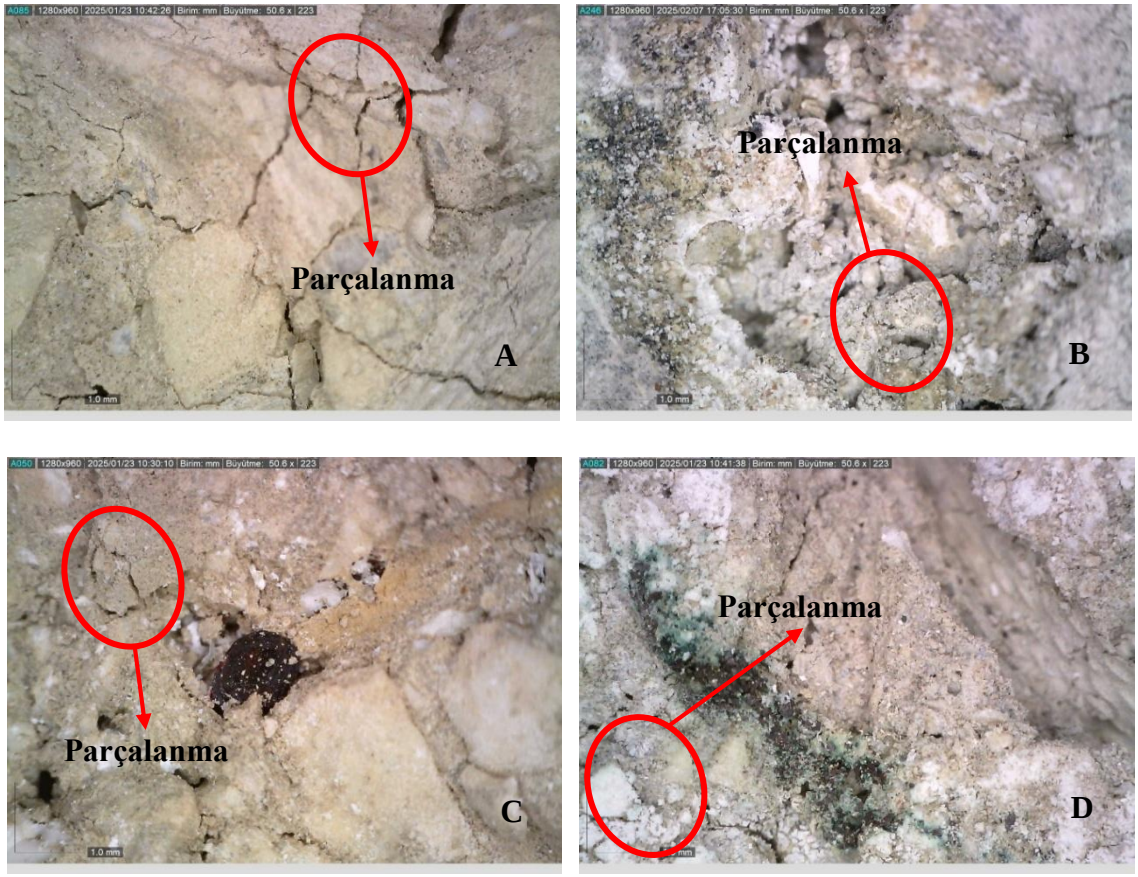
Şekil 4.19. Liflerin matris ile kompakt bir yapı oluşturması, A) çelik lif, B) atık çelik lif



Şekil 4.20. 300 °C maruz bırakılmış PP lifli numuneler, A) lif erimesi kaynaklı boşluk, B) ozmotik basınç kaynaklı çatlak



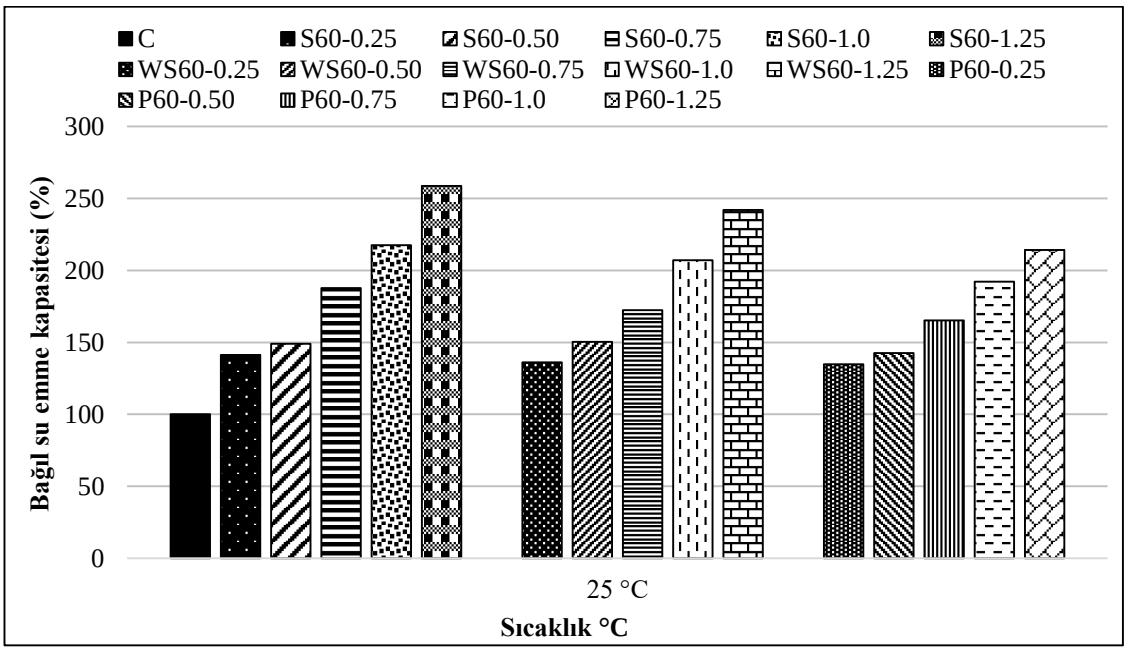
Şekil 4.21. 600 °C sıcaklığa maruz bırakılmış numunelerde liflerin matristeki görünümü, A) S lifli karışım, B) WS lifli numune, C) PP lifli numune



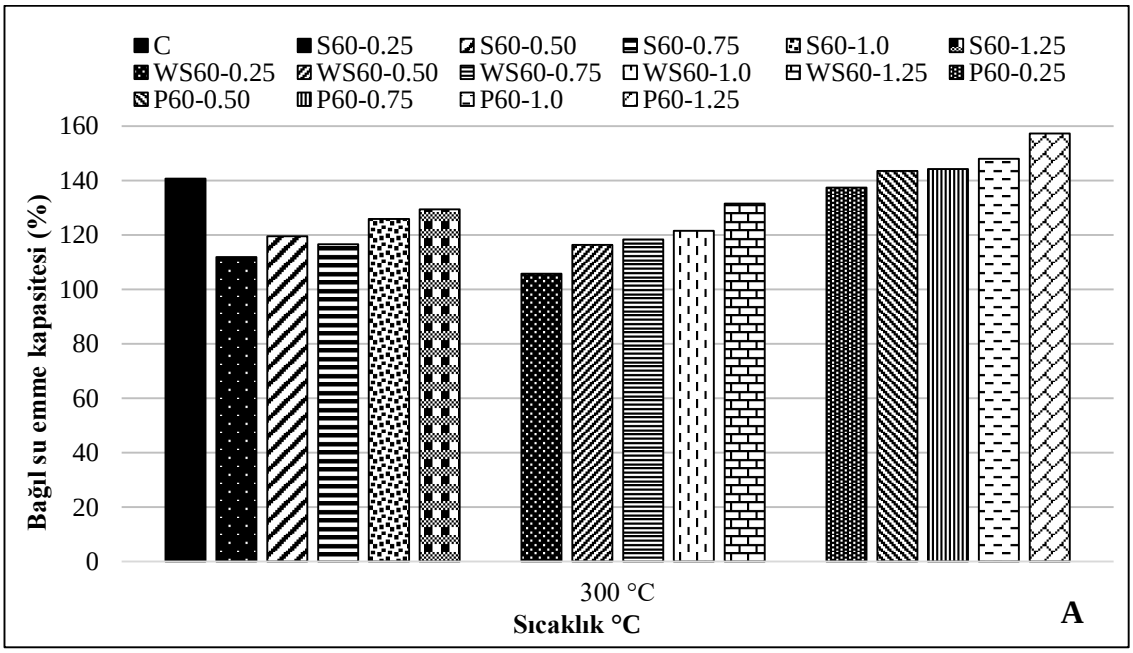
Şekil 4.22. 900 °C sıcaklığa maruz bırakılmış SSB numunelerinde agregaların parçalanması, A) Kontrol numunesi B) S lifli numune, C) WS lifli numune, D) PP lifli numune

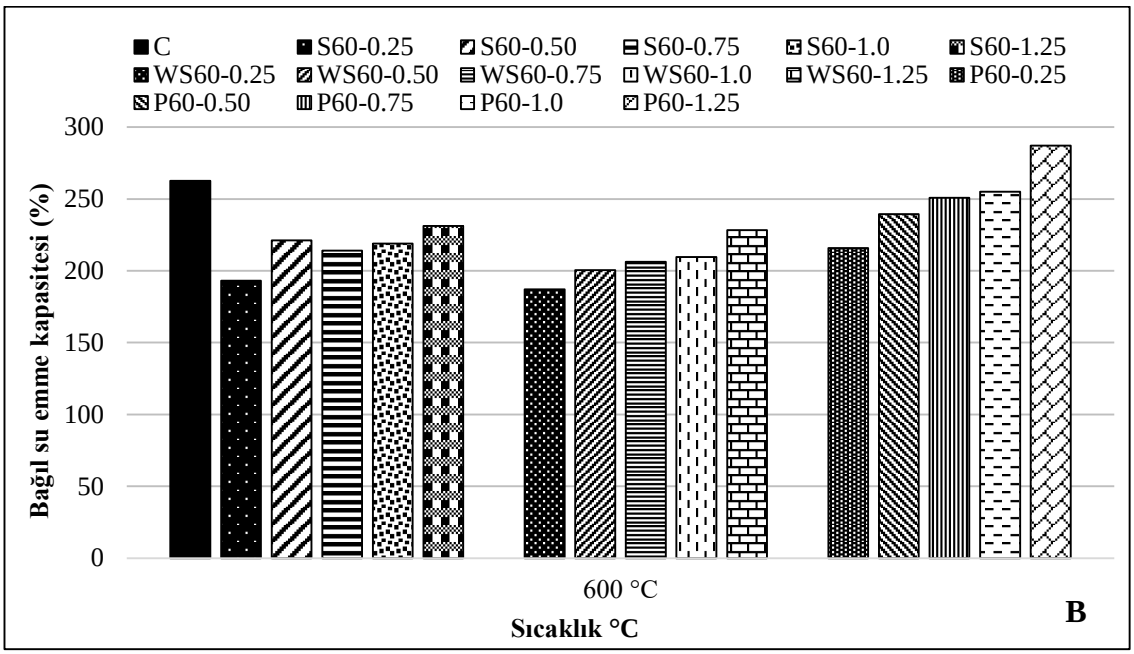
4.6.4. SSB Karışımlarının Yüksek Sıcaklık Sonrası Su Emme Kapasitesi Değişimi

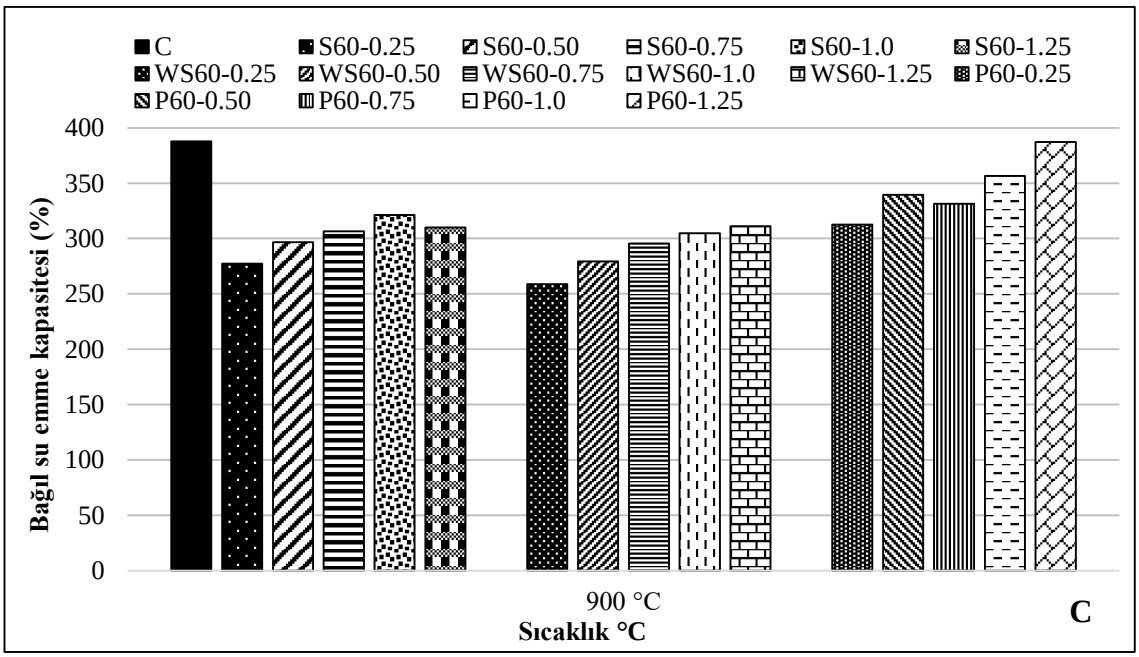
Tüm SSB karışımlarının kontrol karışımına kıyasla 25°C sıcaklıktaki bağıl su emme kapasitesi sonuçları Şekil 4.23'te, 300, 600 ve 900°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin 25°C'deki numunelere kıyasla bağıl su emme kapasitesi ise Şekil 4.24 A-C'de sunulmaktadır.



Şekil 4.23. Tüm SSB numunelerinin kontrol karışımına kıyasla 25°C sıcaklıktaki bağıl su emme kapasitesi sonuçları







Şekil 4.24. Farklı sıcaklığa maruz bırakılan SSB numunelerinin 25°C'deki numunelere kıyasla bağıl su emme kapasitesi değerleri A) 300, B) 600 ve C) 900 °C

Lif türünden bağımsız olarak, lif dozajı arttıkça SSB karışımlarının su emme kapasitesinde sistematik bir artış gözlemlenmiştir. S lifler %41 ile 1.58 kat, WS lifler %36 ile 1.41 kat ve PP lifler %34 ile 1.14 kat su emme artışına yol açmıştır. Bu durum, lif ilavesinin sıkıştırma işlemini zorlaştırması ve liflerin birbirine takılması sonucu artan boşluk hacminden kaynaklanmaktadır (Paul vd., 2020). S ve WS lifli SSB karışımlarının

daha yüksek su emme değerlerine sahip olması, bu liflerin daha sert yapıda olması nedeniyle sıkıştırma işlemini zorlaştırmasının bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Ayrıca, çelik liflerin pürüzsüz yüzeyleri nedeniyle lif-matris aderansının olumsuz etkilenmesi ve buna bağlı olarak boşluk hacminin artmasının da su emme kapasitesindeki yükselmeye katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Benzer sonuçlar farklı araştırmacılar tarafından da beyan edilmiştir (González vd., 2020; Grzesiak vd., 2021; Wang vd., 2022; Khosh & Atapour, 2024; Doğruyol vd., 2024). WS lif takviyeli karışımlarda çelik lif takviyeli karışımlara göre genellikle daha düşük su emme kapasitesi değerleri elde edildiği görülmektedir. Bunun sebebinin ise, WS liflerin sıkıştırma esnasında oluşturduğu boşlukların iki ucu kancalı çelik liflere göre daha az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Öte yandan, PP lif içeren karışımların nispeten daha düşük su emme değerleri sunduğu belirlenmiştir. Bunun sebebinin, PP liflerin esnek yapıları sayesinde boşluk oluşumunu daha az tetiklemesiyle ilişkili olduğu düşünülmektedir (Paul vd., 2020; Yi vd., 2024). Bu sonuçlar, literatürdeki benzer çalışmalarla uyumluluk göstermekte olup, farklı lif türleriyle hazırlanan SSB karışımlarında su emme kapasitesinin %5 ile %80 arasında arttığına dair bulgularla örtüşmektedir (Benouadah vd., 2017; Algin & Gerginci, 2020; Kilic & Gokce, 2021).

300 °C sıcaklık etkisine maruz kalan numunelerde, su emme kapasitesindeki artış oranları lif türüne bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. S, WS ve PP lifli karışımlarda sırasıyla %11-29, %5-31 ve %37-57 oranlarında artış gözlenirken, kontrol karışımında bu artış %40 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.24A). Bu sıcaklık seviyesinde, C-S-H jeli tabakaları arasındaki kimyasal olarak bağlı suların buharlaşması sonucu tabakaların birbirine yaklaşması ve hacim azalması, su emme kapasitesindeki artışın temel nedeni olarak değerlendirilmektedir (Lugaresi vd., 2022). Özellikle PP liflerin bu sıcaklıkta erimesiyle oluşan mikro boşluklar (Şekil 4.20) ve buharlaşma sırasında oluşan ozmotik basınç etkisi, su emme kapasitesindeki belirgin artışı açıklamaktadır.

600 °C sıcaklık seviyesinde ise su emme kapasitesindeki artışlar daha belirgin hale gelmiştir. S, WS ve PP lifli karışımlarda sırasıyla 1.15-1.55 kat, %87 ile 1.46 kat ve 1.11-1.59 kat artış gözlenirken, kontrol karışımında bu artış 1.81 kat'a kadar ulaşmıştır (Şekil 4.24B). Bu aşamada, $Ca(OH)_2$'nin dekompozisyonu ve agregalarda meydana gelen termal

genleşme (Biolzi vd., 2008; Wu vd., 2019), betonun mikro yapısında ciddi hasara yol açmaktadır. Kireçtaşı agregaların parçalanması (Wu vd., 2019; Tanyildizi vd., 2020) ve oluşan su buharının yarattığı ozmotik basınç, boşluk oranını kritik seviyede arttırmaktadır. Çelik liflerin kancalı uç yapısı (Paul vd., 2020) ve sıkıştırma zorluğu (Grzesiak vd., 2021), su emme kapasitesindeki farklılıkların temel nedenleri olarak belirlenmiştir.

900 °C sıcaklık seviyesinde, tüm karışımlarda su emme kapasitesi ciddi oranda artış göstermiştir. S, WS ve PP lifli karışımlarda sırasıyla 1.77-2.21 kat, 1.58-2.11 kat ve 2.12-2.87 kat artış gözlenirken, kontrol karışımında bu artış 2.88 kat'a kadar ulaşmıştır (Şekil 4.24C). Bu aşamada, betonun temel bileşenlerinde meydana gelen geri dönüşümsüz bozunmalar ve agregaların tamamen parçalanması, su emme kapasitesindeki bu aşırı artışın ana nedenidir. Bunun yanında, PP liflerin tamamen buharlaşmasıyla oluşan boşluk ağları ve ozmotik basınç etkisi, bu sıcaklık seviyesindeki davranışı belirleyen temel faktörler olarak öne çıkmaktadır.

5. SONUÇ

- Yüksek sıcaklık öncesinde (25°C ortam koşullarında); lif takviyeli karışımlarda, lif türü veya boyutundan bağımsız olarak, kontrol karışımına kıyasla daha yüksek optimum su içeriği elde edilmiştir. Çelik ve WS lif takviyesi maksimum kuru birim hacim ağırlığı arttırırken, PP lif takviyesi ile maksimum kuru birim hacim ağırlıkta azalmalar görülmüştür.
- Lif takviyesi, özellikle uzun liflerin daha yüksek dozajlarda kullanılması, SSB karışımlarının işlenebilirliğinde azalmaya neden olmuştur. Bu durum, Vebe sürelerindeki artışlar ile desteklenmiştir. İşlenebilirlikte azalma, temel olarak liflerden kaynaklanan içsel sürtünmenin artması ve daha büyük lif yüzeyinin neden olduğu etkin harç miktarındaki azalmadan kaynaklanmıştır. Çelik ve WS lif takviyeli karışımların sıkıştırılabilirliği PP lif takviyeli karışımlara kıyasla düşük olmuştur.
- Lif takviyesi ile azalan sıkıştırılabilme sonucunda, liflerin etrafında oluşan boşluklar su emme kapasitesini arttırmıştır. 60 mm çelik ve WS lifler, su emme kapasitesinde belirgin bir artışa neden olurken, PP lifler su emme kapasitesi üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olmuştur.
- Çelik ve WS lifler, %1 oranında kullanıldığında SSB'nin basınç dayanımını bir miktar arttırmıştır. Ancak, %1'den fazla kullanıldığı durumda, karışım homojenliği ve sıkıştırılabilirliğinin bozulması nedeniyle basınç dayanımında düşüşe neden olmuştur. PP lifli SSB'de, temel olarak lif kümelenmesi, artan su ihtiyacı ve karışımın yoğunluğunda azalma nedenlerine bağlı olarak daha düşük basınç dayanımı elde edilmiştir.
- Lif türüne ve boyutuna bakılmaksızın, lif takviyeli SSB'lerde, kontrol numunesine kıyasla daha yüksek eğilme ve yarmada-çekme dayanımı elde edilmiştir. Çelik lifler, eğilme dayanımı üzerinde en belirgin etkiyi göstermiştir. Bu etki uzun liflerde daha belirgin olmuştur.
- Lif takviyesi ile eğilme yükleri altında daha sünek bir davranış ve kırılma enerjisinde büyük bir artış sağlanmıştır. Çelik lifler, kancalı uçları sayesinde çekmeye karşı daha dirençli bir davranış sergilemiş ve en yüksek kırılma enerjisi çelik lifli SSB'de görülmüştür. Hem daha uzun lifler hem de daha yüksek lif

içeriği, kırılma enerjisini ve gerilme kapasitesini daha da arttırmıştır. Gözlemlenen iyileşmeye göre, WS lif takviyeli SSB ve çelik lif takviyeli SSB büyük oranda benzerlik göstermiş ve WS liflerin SSB çalışmaları için çelik liflerin yerine uygulanabilir ve umut verici bir alternatif sunduğu sonucuna varılmıştır.

- Liflerin varlığı, türü ve içeriği, SSB'nin elastisite modülü üzerinde kayda değer bir etki oluşturmamıştır.

- Yüksek sıcaklık sonrasında; mekanik performans açısından değerlendirildiğinde, çelik ve WS lif takviyeli SSB'de, 25°C ve 300°C sıcaklık seviyelerinde kontrol numunesine kıyasla genellikle daha yüksek dayanım elde edilmiştir. 600°C ve 900°C gibi yüksek sıcaklıklarda lif türüne bağlı olarak SSB'de dayanım kayıpları meydana gelmiştir. PP lifli SSB'de gözlenen dayanım kaybı 600°C'de çelik ve WS lifli SSB'ye göre daha az, 900°C'de daha fazla olmuştur.

- Ağırlık kaybı açısından yapılan incelemelerde, 600°C'de çelik, WS ve PP lif içeren SSB'de sırasıyla, ortalama %6.5, %5.5 ve %7 oranlarında ağırlık kaybı belirlenmiştir. 900°C'de bu kayıplar %9 ile %16 arasında değişmiştir.

- Çelik ve WS lifler, beton matrisindeki mikro çatlak oluşumunu engelleyerek ve çatlak ilerlemesini önleyerek yüksek sıcaklık etkisi altında SSB'nin mekanik dayanımında iyileşmeler sağlamıştır. PP liflerin yüksek sıcaklıklarda erimesi, matris içerisinde boşluk oluşmasına yol açmaktadır. Bu boşluklar, yüksek sıcaklık etkisi altında meydana gelen ozmotik basıncı dengeleyerek PP lifli SSB'nin 600°C ve 900°C gibi yüksek sıcaklıklarda kontrol numunesine kıyasla daha yüksek basınç dayanımı elde edilmesini sağlamıştır.
- Genel olarak değerlendirildiğinde, çelik ve WS lifler yüksek sıcaklık koşullarında PP liflere kıyasla daha üstün performans sergilemiştir.

Çalışmanın en önemli bulgularından biri, atık çelik liflerin geleneksel çelik liflerle benzer mekanik performans sergilemesi sayesinde çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayan bir alternatif olarak değerlendirilebileceğidir.

KAYNAKLAR

Abed, M. Z., Khalil, W. I., & Ahmed, H. K. (2024). Tire wastes and durability: the influence of crumb rubber and recycled steel fibre on properties of roller compacted concrete. *International Journal of Pavement Engineering*, *25*(1), 2372628. https://doi.org/10.1080/10298436.2024.2372628

Abid, M., Hou, X., Zheng, W., & Hussain, R. R. (2019). Effect of fibers on high-temperature mechanical behavior and microstructure of reactive powder concrete. *Materials*, *12*(2), 329. https://doi.org/10.3390/ma12020329

Adamu, M., Mohammed, B. S., & Liew, M. S. (2018). Mechanical properties and performance of high volume fly ash roller compacted concrete containing crumb rubber and nano silica. *Construction and Building Materials*, *171*, 521–538. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.138

Agra, R. R., Serafini, R., & de Figueiredo, A. D. (2021). Effect of high temperature on the mechanical properties of concrete reinforced with different fiber contents. *Construction and Building Materials*, *301*, 124242. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124242

Ahmadi, M., Shafabakhsh, G. A., & Hassani, A. (2021). Fracture and mechanical performance of two-lift concrete pavements made of roller compacted concrete and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, *268*, 121144. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121144

Algin, Z., & Gerginci, S. (2020). Freeze-thaw resistance and water permeability properties of roller compacted concrete produced with macro synthetic fibre. *Construction and Building Materials*, *234*, 117382. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117382

Alkan, G. (2004). *Polipropilen lifli betonların mekanik özelliklerinin incelenmesi* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.

Al-Tameemi, A. A., & A'mina, K. M. (2021). Influence of polypropylene fibers reinforcement on the mechanical properties of roller compacted concrete used in airports with partial replacement of cement by cement kiln dust. *Journal of Physics: Conference Series*, *1973*, 012173.

Ashteyat, A. M., Al Rjoub, Y. S., Murad, Y., & Asaad, S. (2022). Mechanical and durability behaviour of roller-compacted concrete containing white cement by pass dust and polypropylene fibre. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, *26*(1), 166–183. https://doi.org/10.1080/19648189.2019.1652694

ASTM International (2020). *Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table (ASTM C1170 / C1170M-20)*. Advancing Standards Transforming Markets. www.astm.org

ASTM International (2020). *Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer (ASTM C1435 / C1435M-20)*. Advancing Standards Transforming Markets. www.astm.org

ASTM International (2021). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete (ASTM C642-21)*. Advancing Standards Transforming Markets. www.astm.org

ASTM International (2022). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression (ASTM C469 / C469-M22)*. Advancing Standards Transforming Markets. www.astm.org

Ba, G., Miao, J., Zhang, W., & Liu, C. (2016). Influence of cracking on heat propagation in reinforced concrete structures. *Journal of Structural Engineering*, *142*(7), 04016035. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001483

Bangi, M. R., & Horiguchi, T. (2012). Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, *42*(2), 459-466. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.11.014

Banthia, N., & Gupta, R. (2004). Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC: fiber synergy in high strength matrices. *Materials and Structures*, *37*(10), 707–716. https://doi.org/10.1007/bf02480516

Bao, J., Zheng, R., Zhang, P., Cui, Y., Xue, S., Song, Q., & Ma, Y. (2023). Thermal resistance, water absorption and microstructure of high-strength self-compacting lightweight aggregate concrete (HSSC-LWAC) after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, *365*, 130071. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130071

Bayqra, S. H., Mardani, A., Özen, S., & Ramyar, K. (2023). Effect of delayed placement of layers on permeability and durability of roller-compacted concrete containing fly ash. *International Journal of Pavement Engineering*, *24*(2), 2075552. https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2075552

Bayqra, S. H., Mardani-Aghabaglou, A., & Ramyar, K. (2022). Physical and mechanical properties of high volume fly ash roller compacted concrete pavement (A laboratory and case study). *Construction and Building Materials*, *314*, 125664. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.109

Behnood, A., & Ghandehari, M. (2009). Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures. *Fire Safety Journal*, *44*(8), 1015–1022. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.07.001

Benouadah, A., Beddar, M., & Meddah, A. (2017). Physical and mechanical behaviour of a roller compacted concrete reinforced with polypropylene fiber. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, *9*(2), 623–635. https://doi.org/10.4314/jfas.v9i2.1

Berry, J. R., & Tayabji, S. D. (2001). *Report on Roller-compacted Concrete Pavements*. ACI committee report.

Beytekin, H. E., Kaya, Y., Mardani, A., & Sezer, F. Ş. (2025). Improving fire resistance of lightweight concrete facade elements by using fibers. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, *25*(2), 70. https://doi.org/10.1007/s43452-025-01133-6

Biolzi, L., Cattaneo, S., & Rosati, G. (2008). Evaluating residual properties of thermally damaged concrete. *Cement and Concrete Composites*, *30*(10), 907–916. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.09.005

Calis, G., & Yildizel, S. A. (2019). Investigation of roller compacted concrete: Literature review. *Challenge Journal of Concrete Research Letters*, *10*(3), 63–74. https://doi.org/10.20528/cjcrl.2019.03.003

Cao, C., Sun, W., & Qin, H. (2000). The analysis on strength and fly ash effect of roller-compacted concrete with high volume fly ash. *Cement and Concrete Research*, *30*(1), 71–75. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00203-3

Chen, H., Xie, C., Fu, C., Liu, J., Wei, X., & Wu, D. (2020). Orthogonal analysis on mechanical properties of basalt polypropylene fiber mortar. *Materials*, *13*(13), 2937. https://doi.org/10.3390/ma13132937

Chhorn, C., & Lee, S. W. (2018). Influencing compressive strength of roller-compacted concrete. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, *171*(1), 3–10. https://doi.org/10.1680/jcoma.16.00009

Chhorn, C., Hong, S. J., & Lee, S. W. (2017). A study on performance of roller-compacted concrete for pavement. *Construction and Building Materials*, *153*, 535–543. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.135

Chi, M., & Huang, R. (2014). Effect of circulating fluidized bed combustion ash on the properties of roller compacted concrete. *Cement and Concrete Composites*, *45*, 148–156. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.001

Cui, K., Liang, K., Chang, J., & Lau, D. (2022). Investigation of the macro performance, mechanism, and durability of multiscale steel fiber reinforced low-carbon ecological UHPC. *Construction and Building Materials*, *327*, 126921. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126921

Debbarma, S., Ransinchung, G. D., & Singh, S. (2019). Feasibility of roller compacted concrete pavement containing different fractions of reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, *199*, 508–525. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.047

Diagnosis and Assessment of Concrete Structures—State of the Art Report. (1989). In *CEB Bulletin No. 192 FIB International*. CEB.

Dirikgil, T. (2009). *Polipropilen lifli betonların yüksek sıcaklık etkisi altında bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin deneysel araştırılması* [Yüksek lisans tezi, Erciyes Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.

Doğruyol, M., Ayhan, E., & Karaşin, A. (2024). Effect of waste steel fiber use on concrete behavior at high temperature. *Case Studies in Construction Materials*, *20*, e03051. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03051

Düğenci, O., Haktanir, T., & Altun, F. (2015). Experimental research for the effect of high temperature on the mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, *75*, 82–88. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.005

Durgun, M. Y., Özen, S., Karakuzu, K., Kobya, V., Bayqra, S. H., & Mardani-Aghabaglou, A. (2022). Effect of high temperature on polypropylene fiber-reinforced mortars containing colemanite wastes. *Construction and Building Materials*, *316*, 125827. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125827

European Standards (2010). T*esting Hardened Concrete - Part 6: Tensile Splitting Strength of Test Specimens (EN 12390-6)*. European Committee For Standardization. www.en-standard.eu

European Standards (2011). *Cement-Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements(EN 197-1)*. European Committee For Standardization. www.en-standard.eu

European Standards (2012). *Testing for Geometric Properties of Aggregates - Part 1: Determination of Particle Size Distribution-Sieve Method (EN 933-1)*. European Committee For Standardization. www.en-standard.eu

European Standards (2013). *Tests for Mechanical and Physical Properties of Aggregates - Part 6: Determination of Particle Density and Water Absorption (EN 1097-6)*. European Committee For Standardization. www.en-standard.eu

European Standards (2019). *Testing Hardened Concrete - Part 3: Compressive Strength of Test Specimens (EN 12390-3)*. European Committee For Standardization. www.en-standard.eu

European Standards (2019). *Testing Hardened Concrete - Part 5: Flexural Strength of Test Specimens (EN 12390-5)*. European Committee For Standardization. www.en-standard.eu

European Tyre & Rubber Manufacturers Association. (2021). *In Europe 95% of all End of Life Tyres were collected and treated in 2019*. https://www.etrma.org/wp-content/uploads/2021/05/20210520_ETRMA_PRESS-RELEASE_ELT-2019.pdf

Fakhri, M. (2016). The effect of waste rubber particles and silica fume on the mechanical properties of roller compacted concrete pavement. *Journal of Cleaner Production*, *129*, 521–530. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.017

Fallah, S., & Nematzadeh, M. (2017). Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Construction and Building Materials*, *132*, 170–187. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.100

Fardin, H. E., & Santos, A. G. D. (2020). Roller compacted concrete with recycled concrete aggregate for paving bases. *Sustainability*, *12*(8), 3154. https://doi.org/10.3390/su12083154

Gao, D., Zhang, W., Tang, J., & Zhu, Z. (2024). Effect of steel fiber on the compressive performance and microstructure of ultra-high performance concrete at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, *435*, 136830. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136830

Gautam, S., & Charak, R. (2024). *Calcium Oxide* (Vol. 88). Calcium-Based Materials: Processing, Characterization, and Applications.

Ghahari, S., Mohammadi, A., & Ramezanianpour, A. (2017). Performance assessment of natural pozzolan roller compacted concrete pavements. *Case Studies in Construction Materials*, *7*, 82–90. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.03.004

Gong, F., Jiang, X., Gamil, Y., Iftikhar, B., & Thomas, B. S. (2023). An overview on spalling behavior, mechanism, residual strength and microstructure of fiber reinforced concrete under high temperatures. *Frontiers in Materials*, *10*, 1258195. https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1258195

González, D. C., Rahman, M., Mínguez, J., Vicente, M. A., & Hindi, R. (2020). Influence of fibers and curing conditions on the pore morphology in plain and fiber-reinforced high-performance concrete through the use of computed tomography scan technology. *Applied Sciences*, *10*(12), 4286. https://doi.org/10.3390/app10124286

Grzesiak, S., Pahn, M., Schultz-Cornelius, M., Harenberg, S., & Hahn, C. (2021). Influence of fiber addition on the properties of high-performance concrete. *Materials*, *14*(13), 3736. https://doi.org/10.3390/ma14133736

Guerini, V., Conforti, A., Plizzari, G., & Kawashima, S. (2018). Influence of steel and macro-synthetic fibers on concrete properties. *Fibers*, *6*(3), 47. https://doi.org/10.3390/fib6030047

Guo, Z., Zhuang, C., Li, Z., & Chen, Y. (2021). Mechanical properties of carbon fiber reinforced concrete (CFRC) after exposure to high temperatures. *Composite Structures*, *256*, 113072. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113072

Habib, A., Houri, A. A., Habib, M., Elzokra, A., & Yildirim, U. (2021). Structural performance and finite element modeling of roller compacted concrete dams: A review. *Latin American Journal of Solids and Structures*, *18*(04), e376. https://doi.org/10.1590/1679-78256467

Haddad, R. H., Al-Saleh, R. J., & Al-Akhras, N. M. (2008). Effect of elevated temperature on bond between steel reinforcement and fiber reinforced concrete. *Fire Safety Journal*, *43*(5), 334–343. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2007.11.002

Haghnejad, M., & Modarres, A. (2021). Effect of freeze-thaw cycles on the response of roller compacted concrete pavement reinforced by recycled polypropylene fibre under monotonic and cyclic loadings. *Road Materials and Pavement Design*, *22*(12), 2704–2720. https://doi.org/10.1080/14680629.2020.1794942

Harrington, D., Abdo, F., Ceylan, H., Adaska, W., Hazaree, C., & Bektas, F. (2010). *Guide for roller-compacted concrete pavements*. Iowa State University.

Hashemi, M., Shafigh, P., Karim, M. R. B., & Atis, C. D. (2018). The effect of coarse to fine aggregate ratio on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, *169*, 553–566. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.216

Hejazi, S. M., Abtahi, S. M., & Safaie, F. (2016). Investigation of thermal stress distribution in fiber-reinforced roller compacted concrete pavements. *Journal of Industrial Textiles*, *45*(5), 896–914. https://doi.org/10.1177/1528083714542827

Hesami, S., Hikouei, I. S., & Emadi, S. A. A. (2016). Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber. *Journal of Cleaner Production*, *133*, 228–234. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.079

Huang, T., Yuan, Q., Zuo, S., Yao, H., Zhang, K., Wang, Y., & Shi, C. (2022). Physio-chemical effects on the temperature-dependent elasticity of cement paste during setting. *Cement and Concrete Composites*, *134*, 104769. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104769

Irshidat, M. R., Al-Nuaimi, N., & Rabie, M. (2021). Hybrid effect of carbon nanotubes and polypropylene microfibers on fire resistance, thermal characteristics and microstructure of cementitious composites. *Construction and Building Materials*, *266*, 121154. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121154

Islam, G. S., & Gupta, S. D. (2016). Evaluating plastic shrinkage and permeability of polypropylene fiber reinforced concrete. *International Journal of Sustainable Built Environment*, *5*(2), 345–354. https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.05.007

Jafarifar, N., Pilakoutas, K., Angelakopoulos, H., & Bennett, T. (2017). Post-cracking tensile behaviour of steel-fibre-reinforced roller-compacted-concrete for FE modelling and design purposes. *Materiales de Construcción*, *67*(326), e122–e122. https://doi.org/10.3989/mc.2017.06716

Jahanbakhsh, P., Saberi K, F., Soltaninejad, M., & Hashemi, S. H. (2023). Laboratory investigation of modified roller compacted concrete pavement (RCCP) containing macro synthetic fibers. *International Journal of Pavement Research and Technology*, *16*(3), 745–759. https://doi.org/10.1007/s42947-022-00161-2

Ji, X., Pan, T., Fu, C., Han, F., Zhao, W., Sha, J., & Liu, J. (2024). Hydration, microstructure and mechanical properties of cement-based materials with heat-modified autoclaved aerated concrete waste. *Construction and Building Materials*, *419*, 135482. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135482

Jia, Y. D., Zhou, Z. W., Qu, Y. D., & Tian, A. S. (2011). Experimental research on the fracture properties of roller compacted steel fiber recycled concrete. *Advanced Materials Research*, *299*, 135–138. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.299-300.135

Kara, I. B. (2021). Effects of cooling regimes on limestone rock and concrete with limestone aggregates at elevated temperatures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *138*, 104618. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104618

Karahan, O. (2006). *Properties of fiber reinforced fly ash concretes* [Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.

Kaya, Y., Biricik, Ö., Bayqra, S. H., & Mardani, A. (2023). Effect of fibre type and utilisation rate on dimensional stability and frost resistance of pavement mortar mixture. *International Journal of Pavement Engineering*, *24*(1), 2154351. https://doi.org/10.1080/10298436.2022.2154351

Keleş, Ö. F., Bayrak, O. Ü., & Bayata, H. F. (2024). Experimental investigation on mechanical properties of sustainable roller compacted concrete pavement (RCCP) containing waste rubbers as alternative aggregates. *Construction and Building Materials*, *424*, 135930. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135930

Kessal, O., Achour, Y., Noui, A., Belkadi, A. A., Benouadah, A., Belagraa, L., & Benammar, A. (2023). Bio-fiber reinforced roller compacted concrete designed for road construction: feasibility of date palm fibers in pavements. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, *27*(3), 1224–1246. https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2077838

Khayat, K. H., & Libre, N. A. (2014). *Roller compacted concrete: field evaluation and mixture optimization*. Missouri University of Science and Technology.

Khosh, B., & Atapour, H. (2024). Assessment of mechanical behavior of sprayed concrete reinforced with waste tire textile fibers. *Scientific Reports*, *14*(1), 8873. https://doi.org/10.1038/s41598-024-59339-2

Kilic, I., & Gok, S. (2021). Strength and durability of roller compacted concrete with different types and addition rates of polypropylene fibers. *Revista de La Construcción*, *20*(2), 205–214. https://doi.org/10.7764/rdlc.20.2.205

Kolase, P. K., & Desai, A. K. (2019). Experimental study on monotonic and fatigue behaviour of polypropylene fibre-reinforced roller-compacted concrete with fly ash. *Road Materials and Pavement Design*, *20*(5), 1096–1113. https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1436466

LaHucik, J., Dahal, S., Roesler, J., & Amirkhanian, A. N. (2017). Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers. *Construction and Building Materials*, *135*, 440–446. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.212

Li, P., Wu, H., Liu, Y., Yang, J., Fang, Z., & Lin, B. (2019). Preparation and optimization of ultra-light and thermal insulative aerogel foam concrete. *Construction and Building Materials*, *205*, 529–542. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.212

Li, Q., Wang, M., Sun, H., & Yu, G. (2021). Effect of heating rate on the free expansion deformation of concrete during the heating process. *Journal of Building Engineering*, *34*, 101896. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101896

Li, X., Lu, C., Cui, Y., & Zhou, L. (2023). Study on the bond properties between steel bar and fiber reinforced concrete after high temperatures. *Structures*, *49*, 889–902. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.02.005

Li, Z., Yang, Y., Wang, Y., Wang, W., & Zhang, B. (2025). Effect of Macro Fibers on Chloride Permeability and Damage of Concrete Under Uniaxial Compression. *Materials*, *18*(4), 784. https://doi.org/10.3390/ma18040784

Li, Z., Zhou, X., Ma, H., & Hou, D. (2011). *Advanced Concrete Technology*. New Jersey, USA.

Liang, J., Liu, K., Wang, C., Wang, X., & Liu, J. (2025). Mechanical properties of steel fiber-reinforced rubber concrete after elevated temperature. *Scientific Reports*, *15*(1), 6965. https://doi.org/10.1038/s41598-024-80458-3

Liang, N., Yan, R., Miao, Q., Cao, G., & Liu, X. (2022a). Effect of multi-scale polypropylene fiber hybridization on compressive constitutive mechanics parameters of roller compacted concrete. *Structural Concrete*, *23*(1), 441–456. https://doi.org/10.1002/suco.202000117

Liang, N., You, X., Yan, R., Miao, Q., & Liu, X. (2022b). Experimental investigation on the mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced roller-compacted concrete pavements. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, *16*(1), 3. https://doi.org/10.1186/s40069-021-00493-6

Liao, Q., Zhao, X. D., Wu, W. W., Lu, J. X., Yu, K. Q., & Poon, C. S. (2024). A review on the mechanical performance and durability of fiber reinforced lightweight cement composites: The roles of fiber and lightweight aggregate. *Journal of Building Engineering*, 109121. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109121

Long, Z., Long, G., Tang, Z., Shangguan, M., Wang, J., Yi, M., & Wang, L. (2024). Analysis of hydration kinetics in high early-strength cementitious system with calcium sulphoaluminate cement and CSH seeds. *Construction and Building Materials*, *448*, 138222. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138222

Lopez-Uceda, A., Agrela, F., Cabrera, M., Ayuso, J., & López, M. (2018). Mechanical performance of roller compacted concrete with recycled concrete aggregates. *Road Materials and Pavement Design*, *19*(1), 36–55. https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1232659

Lugaresi, F., Kotsovinos, P., Lenk, P., & Rein, G. (2022). Review of the mechanical failure of non-combustible facade systems in fire. *Construction and Building Materials*, *361*, 129506. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129506

Madhavi, T. C., Raju, L. S., & Mathur, D. (2014). Polypropylene fiber reinforced concrete - A review. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, *4*(4), 114–118.

Madhkhan, M., Azizkhani, R., & Harchegani, M. T. (2012). Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements. *Construction and Building Materials*, *26*(1), 102–112. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.05.009

Mahmoud, M. S., Shanour, A. S., Abdelaziz, G. E., & Hammad, M. S. (2023). Influence of elevated temperature on performance of ultra high strength fibre reinforced self compacting concrete (UHSFRSCC) produced from local materials. *Engineering*

Research Journal (Shoubra), 52(1), 1–11. https://doi.org/10.21608/erjsh.2022.157789.1078

Mardani-Aghabaglou, A. (2011). *Durability of fly ash incorporating roller compacted concrete* [Yüksek lisans tezi, Ege Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.

Mardani-Aghabaglou, A., & Ramyar, K. (2013). Mechanical properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method. *Construction and Building Materials, 38*, 356–364. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.109

Mardani-Aghabaglou, A., Andiç-Çakir, Ö., & Ramyar, K. (2013). Freeze–thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method. *Cement and Concrete Composites*, *37*, 259–266. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.009

Mardani-Aghabaglou, A., Bayqra, S. H., & Nobakhtjoo, A. (2021). Specimen size and shape effects on strength of concrete in the absence and presence of steel fibers. *Revista de La Construcción*, *20*(1), 128–144. https://doi.org/10.7764/rdlc.20.1.128

Mardani-Aghabaglou, A., Özen, S., & Altun, M. G. (2018). Durability performance and dimensional stability of polypropylene fiber reinforced concrete. *Journal of Green Building*, *13*(2), 20–41. https://doi.org/10.3992/1943-4618.13.2.20

Mardani-Aghabaglou, A., Yüksel, C., Hosseinnezhad, H., & Ramyar, K. (2016). Performance of steel micro fiber reinforced mortar mixtures containing plain, binary and ternary cementitious systems. *Journal of Green Building*, *11*(4), 109–130. https://doi.org/10.3992/jgb.11.4.109.1

Meddah, A., Beddar, M., & Bali, A. (2014). Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement. *Journal of Cleaner Production*, *72*, 187–192. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.052

Mohammed, B. S., & Adamu, M. (2018). Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica. *Construction and Building Materials*, *159*, 234–251. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.098

Naik, T. R., Chun, Y. M., Kraus, R. N., Singh, S. S., Pennock, L. L. C., & Ramme, B. W. (2001). Strength and durability of roller-compacted HVFA concrete pavements. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, *6*(4), 154–165. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0680(2001)6:4(15

Naveen, A. P., Priyadarsini, R. S., & Krishna, D. A. (2023). Effect of high temperature on the compressive and flexural performance of fibrous concrete-an experimental investigation. *Materials Today: Proceedings*. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.313

Neocleous, K., Angelakopoulos, H., Pilakoutas, K., & Guadagnini, M. (2011). Fiber-reinforced roller-compacted concrete transport pavements. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Transport*, *164*(2), 97–109. https://doi.org/10.1680/tran.9.00043

Nia, A. A., Hedayatian, M., Nili, M., & Sabet, V. A. (2012). An experimental and numerical study on how steel and polypropylene fibers affect the impact resistance in fiber-reinforced concrete. *International Journal of Impact Engineering*, *46*, 62–73. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2012.01.009

Novák, J., & Kohoutková, A. (2017). Fibre reinforced concrete exposed to elevated temperature. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *246*, 012045.

Omran, A., Harbec, D., Tagnit-Hamou, A., & Gagne, R. (2017). Production of roller-compacted concrete using glass powder: Field study. *Construction and Building Materials*, *133*, 450–458. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.099

Ostertag, C. P., & Yi, C. K. (2007). Crack/fiber interaction and crack growth resistance behavior in microfiber reinforced mortar specimens. *Materials and Structures*, *40*, 679–691. https://doi.org/10.1617/s11527-006-9181-1

Ouedraogo, H. A., Özen, S., Kobya, V., Sağıroğlu, S., & Mardani-Aghabaglou, A. (2021). Comparison of fresh and hardened properties of self-compacting concrete mixture from different aspect ratio of steel fiber viewpoint. *Journal of Green Building*, *16*, 115–138. https://doi.org/10.3992/jgb.16.1.115

Öztürk, O. (2017). *Mixture design and mechanical properties of synthetic fiber reinforced roller compacted concrete for pavements.* [Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.

Ozturk, O., & Ozyurt, N. (2022). Sustainability and cost-effectiveness of steel and polypropylene fiber reinforced concrete pavement mixtures. *Journal of Cleaner Production*, *363*, 132582. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132582

Park, S., Kim, D., Ryu, G., & Koh, K. (2012). Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, *34*, 172–184. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.009

Paul, S. C., van Zijl, G. P., & Šavija, B. (2020). Effect of fibers on durability of concrete: A practical review. *Materials*, *13*, 4562. https://doi.org/10.3390/ma13204562

Pittman, D. W. (1986). Construction of roller-compacted concrete pavements. *Transportation Research Record*, *1062*, 13–19.

Qin, Y., Zhang, X., Chai, J., Xu, Z., & Li, S. (2019). Experimental study of compressive behavior of polypropylene-fiber-reinforced and polypropylene-fiber-fabric-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, *194*, 216–225. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.042

Rao, S. K., Sravana, P., & Rao, T. C. (2016). Abrasion resistance and mechanical properties of Roller Compacted Concrete with GGBS. *Construction and Building Materials*, *114*, 925–933. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.004

RILEM TC 50-FM. (1985). Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Materials and Structures*, *18*(106), 285–290, 1985. https://doi.org/10.1007/BF02472918

Roesler, J., Bordelon, A., Gaedicke, C., Park, K., & Paulino, G. (2008). Fracture behavior and properties of functionally graded fiber-reinforced concrete. *AIP Conference Proceedings*, *973*, 513–518. https://doi.org/10.1063/1.2896831

Roller-compacted Mass Concrete. (1999). In *ACI Committee Report, Part 1*. www.concrete.org

Rooholamini, H., Hassani, A., & Aliha, M. R. M. (2018a). Evaluating the effect of macro-synthetic fiber on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology. *Construction and Building Materials*, *159*, 517–529. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.002

Rooholamini, H., Hassani, A., & Aliha, M. R. M. (2018b). Fracture properties of hybrid fibre-reinforced roller-compacted concrete in mode I with consideration of possible

kinked crack. *Construction and Building Materials*, *187*, 248–256. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.177

Rooholamini, H., Karimi, A., & Safari, J. (2023). A statistical fatigue life prediction model applicable for fibre-reinforced roller-compacted concrete pavement. *Road Materials and Pavement Design*, *24*(1), 103–120. https://doi.org/10.1080/14680629.2021.2011382

Şahin, H. G., Mardani, A., & Beytekin, H. E. (2024). Effect of silica fume utilization on structural build-up, mechanical and dimensional stability performance of fiber-reinforced 3D printable concrete. *Polymers*, *16*(4), 556. https://doi.org/10.3390/polym16040556

Şahin, Y., & Köksal, F. (2011). The influences of matrix and steel fiber tensile strengths on the fracture energy of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, *25*(4), 1801–1806. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.084

Saidani, M., Saraireh, D., & Gerges, M. (2016). Behaviour of different types of fiber reinforced concrete without admixture. *Engineering Structures*, *113*, 328–334. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.01.041

Sarsam, S. I., Al-Rawi, A., & Tawfeek, S. D. (2014). Assessing the impact of cement content and type on the durability of roller compacted concrete using NDT. *International Journal of Scientific Research in Knowledge*, *2*(1), 48. https://doi.org/10.12983/ijsrk-2014-p0048-0056

Scorza, D., Luciano, R., Mousa, S., & Vantadori, S. (2021). Fracture behaviour of hybrid fibre-reinforced roller-compacted concrete used in pavements. *Construction and Building Materials*, *271*, 121554. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121554

Sellevold, E. J., & Bjøntegaard, Ø. (2006). Coefficient of thermal expansion of cement paste and concrete: Mechanisms of moisture interaction. *Materials and Structures*, *39*, 809–815. https://doi.org/10.1617/s11527-006-9086-z

Selvam, M., & Singh, S. (2023). Comparative investigation of laboratory and field compaction techniques for designing roller compacted concrete pavements (RCCP). *International Journal of Pavement Engineering*, *24*(1), 2177850. https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2177850

Selvam, M., Kalyan, N. S. S. P., Kandasami, R. K., & Singh, S. (2023). Assessing the effect of different compaction mechanisms on the internal structure of roller compacted concrete. *Construction and Building Materials*, *365*, 130072. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130072

Shafigh, P., Hashemi, M., Nam, B. H., & Koting, S. (2020). Optimum moisture content in roller-compacted concrete pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, *21*(14), 1769–1779. https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1567919

Shah, I., Li, J., Yang, S., Zhang, Y., & Anwar, A. (2022). Experimental investigation on the mechanical properties of natural fiber reinforced concrete. *Journal of Renewable Materials*, *10*(5), 1307. https://doi.org/10.32604/jrm.2022.017513

Shahidan, S., Abdul Rahim, M., Nik Zol, N. S., Azizan, M. A., & Ismail, I. (2015). Properties of Steel Fiber Reinforcement Concrete with Different Characteristic of Steel Fiber. *Applied Mechanics and Materials*, *773*, 28–32. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.773-774.28

Shaikh, F. U. A., & Taweel, M. (2015). Compressive strength and failure behaviour of fibre reinforced concrete at elevated temperatures. *Advances in Concrete Construction*, *3*(4), 283–293. https://doi.org/10.12989/acc.2015.3.4.283

Shamsaei, M., Aghayan, I., & Kazemi, K. A. (2017). Experimental investigation of using cross-linked polyethylene waste as aggregate in roller compacted concrete pavement. *Journal of Cleaner Production*, *165*, 290–297. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.109

Sharbatdar, M. K., & Rahmati, F. (2022). Experimental evaluation of multi-functional effects of fibers on mechanical and performance properties of Roller-compacted concrete pavements (RCCP). *Construction and Building Materials*, *316*, 125890. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125890

Shen, X., Li, X., Liu, L., Chen, X., & Du, J. (2024). Research on Mechanical Properties of Steel-Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete after High temperature Treatments. *Applied Sciences*, *14*(9), 3861. https://doi.org/10.3390/app14093861

Siamardi, K., & Shabani, S. (2021). Evaluation the effect of micro-synthetic fiber on mechanical and freeze-thaw behavior of non-air-entrained roller compacted concrete pavement using response surface methodology. *Construction and Building Materials*, *295*, 123628. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123628

Simões, T., Costa, H., Dias-da-Costa, D., & Júlio, E. (2018). Influence of type and dosage of micro-fibers on the physical properties of fiber reinforced mortar matrixes. *Construction and Building Materials*, *187*, 1277–1285. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.058

Sukontasukkul, P., Chaisakulkiet, U., Jamsawang, P., Horpibulsuk, S., Jaturapitakkul, C., & Chindaprasirt, P. (2019). Case investigation on application of steel fibers in roller compacted concrete pavement in Thailand. *Case Studies in Construction Materials*, *11*, e00271. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00271

Tanyildizi, H., Şengür, A., Akbulut, Y., & Şahin, M. (2020). Deep learning model for estimating the mechanical properties of concrete containing silica fume exposed to high temperatures. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, *14*, 1316–1330. https://doi.org/10.1007/s11709-020-0646-z

Tayabji, S. D., Sherman, T. W., Keifer, O., Nanni, A., Piggott, R. W., Pittman, D., Ragan, S. A., & Scott, J. A. (1995). State-of-the-art report on roller-compacted concrete pavements. In *ACI Committee Report*. ACI.

Thomas, J., & Ramaswamy, A. (2007). Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *19*(5), 385–392. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:5(385)

Topçu, İ., Demirel, O., & Uygunoğlu, T. (2017). Physical and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced mortars. *Journal of Polytechnic*, *20*(1), 91–96.

Türk Standartları Enstitüsü. (2016) *Beton karışım tasarımı hesap esasları (TS 802)*. https://www.tse.org.tr

Üte, A. A. (2008). *Effect of fly ash and polypropylene fibers on properties of roller-compacted concrete* [Yüksek lisans tezi, Ege Üniversitesi]. YÖK Tez Merkezi.

Uygunoğlu, T. (2011). Effect of fiber type and content on bleeding of steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, *25*(2), 766–772. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.008

Wang, C., Chen, W., Hao, H., Zhang, S., Song, R., & Wang, X. (2018). Experimental investigations of dynamic compressive properties of roller compacted concrete (RCC). *Construction and Building Materials*, *168*, 671–682. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.112

Wang, J., Dai, Q., Si, R., & Guo, S. (2019). Mechanical, durability, and microstructural properties of macro synthetic polypropylene PP fiber-reinforced rubber concrete. *Journal of Cleaner Production*, *234*, 1351–1364. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.272

Wang, Y., Zhang, S., Niu, D., & Fu, Q. (2022). Quantitative evaluation of the characteristics of air voids and their relationship with the permeability and salt freeze-thaw resistance of hybrid steel-polypropylene fiber-reinforced concrete composites. *Cement and Concrete Composites*, *125*, 104292. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104292

Williams, S. G. (2014). Construction of roller-compacted concrete pavement in the Fayetteville Shale Play Area, Arkansas. *Transportation Research Record*, *2408*(1), 47–54. https://doi.org/10.3141/2408-06

Wu, B., Yu, Y., & Zhao, X. Y. (2019). Residual mechanical properties of compound concrete containing demolished concrete lumps after exposure to high temperatures. *Fire Safety Journal*, *105*, 62–78. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.02.008

Wu, H., Lin, X., & Zhou, A. (2020b). A review of mechanical properties of fibre reinforced concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, *135*, 106117. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106117

Wu, Z., Libre, N. A., & Khayat, K. H. (2020a). Factors affecting air-entrainment and performance of roller compacted concrete. *Construction and Building Materials*, *259*, 120413. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120413

Yaman, İ. Ö., & Ceylan, H. (2013). Silindirle sıkıştırılmış beton yollar. *Beton 2013 Hazır Beton Kongresi*, 21–23.

Yang, M., Xiong, Y., Shang, X., Wang, Z., Zhao, J., Liu, Y., & Yuan, Y. (2024). Effect of steel fibers on the stress-strain behavior of aligned steel fiber ultra-high performance concrete under uniaxial compression. *Journal of Building Engineering*, *98*, 111092. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111092

Yap, S. P., Goh, Y., Goh, W. X., Mo, K. H., Liu, M. Y. J., & Ibrahim, H. A. (2022). Relationship between microstructure and performance of polypropylene fiber reinforced cement composites subjected to elevated temperature. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, *26*(5), 1792–1806. https://doi.org/10.1080/19648189.2020.1734489

Yassin, A. M., Mohie Eldin, M., Hafez, M. A., & Elnaggar, M. A. (2024). The flexural behavior and mechanical properties of super high-performance concrete (SHPC) reinforced using the hybridization of micro polypropylene and macro steel fibers. *Buildings*, *14*(7), 1887. https://doi.org/10.3390/buildings14071887

Yazıcı, H. (2012). The effect of steel micro-fibers on ASR expansion and mechanical properties of mortars. *Construction and Building Materials*, *30*, 607–615. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.051

Yazici, Ş., Mardani-Aghabaglou, A., Tuyan, M., & Üte, A. A. (2015). Mechanical properties and impact resistance of roller-compacted concrete containing

polypropylene fibre. *Magazine of Concrete Research*, *67*(16), 867–875. https://doi.org/10.1680/macr.14.00242

Yi, F., Kazmi, S. M. S., Hu, B., & Wu, Y. F. (2024). Mitigating the brittle behavior of compression cast concrete using polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, *440*, 137435. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137435

Yildizel, S. A., Tayeh, B. A., & Uzun, M. (2022). The evaluation of calcium carbonate added and basalt fiber reinforced roller compacted high performance concrete for pavement. *Case Studies in Construction Materials*, *17*, e01293. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01293

Yoo, D. Y., Shin, H. O., Yang, J. M., & Yoon, Y. S. (2014). Material and bond properties of ultra-high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers. *Composites Part B: Engineering*, *58*, 122–133. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.081

Yoo, D., Yoon, Y., & Banthia, N. (2015). Flexural response of steel-fiber-reinforced concrete beams: Effects of strength, fiber content, and strain-rate. *Cement and Concrete Composites*, *64*, 84–92. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.001

Yu, R., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2015). Development of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): Towards an efficient utilization of binders and fibres. *Construction and Building Materials*, *79*, 273–282. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.050

Yuan, C., Chen, W., Pham, T. M., Hao, H., Cui, J., & Shi, Y. (2020). Influence of concrete strength on dynamic interfacial fracture behaviour between fibre reinforced polymer sheets and concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, *229*, 106934. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.106934

Yuan, Z., & Jia, Y. (2021). Mechanical properties and microstructure of glass fiber and polypropylene fiber reinforced concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*, *266*, 121048. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121048

Zdiri, M., Ben Ouezdou, M., & Neji, J. (2008). Theoretical and experimental study of roller-compacted concrete strength. *Magazine of Concrete Research*, *60*(7), 469–474. https://doi.org/10.1680/macr.2007.00002

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Murteda ÜNVERDİ
Doğum Yeri ve Tarihi : ADANA / 29.08.1997
Yabancı Dil : İngilizce, Arapça

Eğitim Durumu
Lise : Seyhan Danişment Gazi Anadolu Lisesi
Lisans : Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi
Yüksek Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi

Çalıştığı Kurum/Kurumlar : Bursa Uludağ Üniversitesi

İletişim (e-posta) : murtedaunverdi@uludag.edu.tr
unverdi.murteda@gmail.com

Akademik çalışmalar :

SCI, SSCI ve AHCI İndekslerine Giren Dergilerde Yayınlanan Makaleler

I. "3D-printed geogrids' tensile performance: impact of filament type"
Ok B., Ünverdi M., Seyedzavvar M., Boga C., Sarıcı T.
RAPID PROTOTYPING JOURNAL, cilt.31, sa.7, ss.1473-1488, 2025 (SCI-Expanded)

II. "Investigation of the Microstructural and Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Roller-Compacted Concrete Under High-Temperature Exposure"
Ünverdi M., Kaya Y., Mardani N., Mardani A.
MATERIALS, cilt.18, sa.11, ss.2430, 2025 (SCI-Expanded)

III. "Predicting compressive and splitting tensile strength of high volume fly ash roller compacted concrete using ANN and ANN-biogeography based optimization models"
Ünverdi M., Kazemi R., Kaya Y., Mardani N., Mardani A., Mirjalili S.
SCIENTIFIC REPORTS, cilt.15, sa.1, ss.21794, 2025 (SCI-Expanded)

Diğer Dergilerde Yayınlanan Makaleler

I. "Dolgu ile İyileştirilen Zeminlerde Dolgu ve Temel Parametrelerinin Taşıma Gücüne Etkilerinin Araştırılması"

OK B., SARICI T., ÜNVERDİ M., ÇOLAKOĞLU H.

Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi , cilt.11, sa.2, ss.629-647, 2021 (Hakemli Dergi)

Hakemli Bilimsel Toplantılarda Yayımlanmış Bildiriler

I. "Lif Türünün Silindirle Sıkıştırılmış Beton Karışımlarının Optimum Su Muhtevası Üzerindeki Etkisi"

Ünverdi M., Kaya Y., Mardani A.

3rd International Ege Congress On Scientific Research, İzmir, Türkiye, 20 - 22 Aralık 2024, cilt.3, ss.741-752, (Tam Metin Bildiri)

II. "Determination of Mix Proportion For RCC Mixtures Produced By Maximum Density Method"

Ünverdi M., Kaya Y., Mardani A.

6th International Anatolian Scientific Research Congress, Konya, Türkiye, 8 - 10 Kasım 2024, cilt.1, ss.354-362, (Tam Metin Bildiri)

Desteklenen Projeler

I. ÜNVERDİ. M., SEYEDZAVVAR. M., BOĞA. C., SARICI. T., OK. B.(Yürütücü), "3D baskı yöntemiyle geogrid üretimine yeni bir bakış açısı", Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı, 02.02.2023 - 01.08.2024.

II. ÜNVERDİ. M., KAYA. Y., MARDANİ. A.(Yürütücü), "Lif İçeren Silindirle Sıkıştırılmış Beton Karışımlarının Taze ve Sertleşmiş Hal Özelliklerinin İncelenmesi Lif Türü Uzunluğu ve Kullanım Oranının Etkisi", Yükseköğretim Kurumları tarafından destekli bilimsel araştırma projesi, Araştırmacı, 10.03.2025, Devam ediyor.