



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**YÜKSEK DAYANIMLI ÇİMENTOLU HARÇLARDA FARKLI BOY VE
HACİMLERDEKİ POLİPROPİLEN LİFLERİN PERFORMANSI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖMER FARUK PORTAKAL

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. ÖZLEM ÇALIŞKAN

BİLECİK, 2026

10792529

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

**YÜKSEK DAYANIMLI ÇİMENTOLU HARÇLARDA FARKLI BOY VE
HACİMLERDEKİ POLİPROPİLEN LİFLERİN PERFORMANSI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÖMER FARUK PORTAKAL

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. ÖZLEM ÇALIŞKAN

BİLECİK, 2026
10792529

BEYAN

Yüksek Dayanımlı Çimentolu Harçlarda Farklı Boy ve Hacimlerdeki Polipropilen Liflerin Performansı başlıklı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine uygun olarak tez/dönem projemi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez/dönem projesi olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Ömer Faruk PORTAKAL

..../.....2026

İmza

Bölüm I. Yapay Zekâ Kullanım Durumu

- ☒ Bu tezin/projenin yazım süreçlerinde yapay zekâ tabanlı araçlardan **faýdalandım**.
☐ Bu tezin/projenin yazım süreçlerinde yapay zekâ tabanlı herhangi bir araçtan **faýdalanmadım**.

Bölüm II. Yapay Zekâ Kullanım Detayları

**Bu bölüm yalnızca yapay zekâ kullanımı beyan edilmiş ise doldurulacaktır. Aksi durumda boş bırakılmalıdır.*

Tezinizde/projenizde kullandığınız yapay zekâ araçlarını ve sürümünü listeleyiniz:

OpenAI ChatGPT – GPT-5.6

**Yapay zekâ araçlarını tezin/projenin aşağıdaki aşamalarında ilgili amaçlar için kullandım.
(Birden fazla seçenek işaretlenebilir):**

- ☐ Cümle oluşturma
☐ Literatür tarama
☐ Çeviri
☒ Düzenleme/dil kontrolü
☐ Veri işleme ve analizi
☐ Veri görselleştirme
☐ Görüntü üretme
☐ Kaynakça düzenleme
☐ Diğer (Belirtiniz):.....

Bu çalışmada yapay zekâ kullanımı *Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber*'e ve akademik dürüstlük ilkelerine uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup yapay zekâ araçlarından alınan destek, etik kurallar ve kaynak gösterme esaslarına uygun biçimde belirtilmiştir. Yapay zekâ kullanımı, çalışmanın özgünlüğüne, bilimsel etik kurallarına ve ilgili mevzuata aykırı olmayacak biçimde gerçekleştirilmiştir. Usulsüz yapay zekâ kullanımı (örneğin: kaynak göstermeksizin metin üretimi, otomatik içerik üretiminin özgün eser gibi sunulması, yanıltıcı kaynak gösterimi vb.) tarafımdan kesinlikle yapılmamıştır. Yapay zekâ araçlarının sağladığı bilgilerin doğruluğunu kontrol ettiğimi, yanlış veya eksik bilgi bulunması halinde tüm sorumluluğun tarafıma ait olduğunu; ayrıca çalışmamla ilgili bu beyana aykırı bir durumun herhangi bir zamanda tespit edilmesi durumunda ortaya çıkabilecek akademik ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi beyan ederim.

Ömer Faruk PORTAKAL

....../....../2026

İmza:

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasında, farklı boy ve hacimlerde polipropilen liflerin yüksek dayanımlı çimentolu harçların performanslarına etkilerini tespit ederek literatüre katkı sunulması amaçlanmıştır.

Bu çalışmanın planlanması, yürütülmesi ve tamamlanması sürecinde bilgi, deneyim ve tecrübelerini benimle paylaşan, her aşamada yol gösteren, eleştiri ve önerileriyle çalışmaya yön veren değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Özlem ÇALIŞKAN'a en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Deneyisel çalışmaların her aşamasında bilgi ve tecrübesiyle yol gösteren, desteğini her zaman hissettiren Sayın Öğr. Gör. Ahmet Ferdi ŞENOL'a içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmada kullanılan malzemelerin temini ve deneyisel süreçlerde verdikleri desteklerden dolayı katkıda bulunan, Polyfibers, Vezirhan Çimento, Bursa Çimento ve Şelale Beton firmalarına şükranlarımı sunarım.

Bugünlere ulaşmamda çok büyük pay sahibi olan maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, gösterdikleri sabır, anlayış ve sonsuz güven, karşılaştığım zorlukları aşmamda en büyük motivasyon kaynağım olan başta rahmetli Babam ve Ailem'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasını, sevgisiyle yolumu aydınlatan, sabrı, anlayışı ve koşulsuz desteğiyle her an yanımda olan kıymetli eşim Emine PORTAKAL'a ve hayatımıza umut, neşe ve anlam katan, gülümsemesiyle bize yeniden başlama gücü veren canım oğlum Uraz Han PORTAKAL'a ithaf ediyorum. Hayatıma kattıkları değer, bu çalışmanın satırlarına sığmayacak kadar büyüktür.

ÖZET

Polipropilen lifler (PL); düşük yoğunlukları, ekonomik olmaları, kolay temin edilebilmeleri, kimyasal etkilere ve korozyona karşı dayanıklılıkları nedeniyle çimento esaslı kompozitlerde yaygın olarak kullanılan sentetik liflerdir. PL kullanımı, özellikle çatlak oluşumunun ve ilerlemesinin sınırlandırılması, gevrek kırılma davranışının iyileştirilmesi ve eğilme performansının artırılması açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Bununla birlikte, PL'lerin çimento esaslı kompozitlerin performansı üzerindeki etkileri lif boyu, hacimsel lif oranı, karışım özellikleri ve maruz kalınan çevresel koşullara bağlı olarak değişmektedir.

Bu tez çalışmasında, farklı lif boyları ve hacimsel lif oranlarında PL kullanımının yüksek dayanımlı harçların taze, fiziksel, mekanik ve yüksek sıcaklık sonrası özellikleri üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Bu amaçla CEM I tipi Portland çimentosu, silis dumanı, nehir kumu ve süperakışkanlaştırıcı kullanılarak yüksek dayanımlı kontrol harcı üretilmiş; karışımlara 6, 12 ve 18 mm uzunluklarındaki PL'ler %0.3, %0.6 ve %0.9 hacimsel oranlarında ilave edilmiştir. Üretilen harçlarda işlenebilirlik, ultrases geçiş hızı (UPV), görünür porozite, su emme, eğilme ve basınç dayanımı özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca numuneler 200, 400 ve 600 °C sıcaklıklara maruz bırakılarak yüksek sıcaklık sonrası kütle kaybı, eğilme ve basınç dayanımları incelenmiş ve elde edilen deneysel veriler arasındaki ilişkiler istatistiksel analizlerle değerlendirilmiştir.

Deney sonuçları, PL kullanımının yüksek dayanımlı harçların özellikleri üzerinde lif boyu ve hacimsel lif oranına bağlı olarak farklı etkiler oluşturduğunu göstermiştir. PL ilavesinin özellikle eğilme davranışını iyileştirdiği, buna karşılık lif boyu ve hacimsel lif oranının artmasının işlenebilirlik ve iç yapı özelliklerini olumsuz etkileyebildiği belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık sonrası performansın ise lif boyu, hacimsel lif oranı ve sıcaklık seviyesine bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği görülmüştür. Sonuç olarak, PL katkılı yüksek dayanımlı harçların tasarımında lif boyu ve hacimsel lif oranının birlikte değerlendirilmesinin önemli olduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Polipropilen lif, yüksek dayanımlı harç, lif boyu, hacimsel lif oranı, mekanik özellikler, yüksek sıcaklık.

ABSTRACT

Polypropylene fibers (PFs) are synthetic fibers widely used in cement-based composites due to their low density, cost-effectiveness, easy availability, and resistance to chemical attack and corrosion. The use of PFs provides significant advantages, particularly in limiting crack initiation and propagation, improving brittle fracture behavior, and enhancing flexural performance. However, the effects of PFs on the performance of cement-based composites vary depending on fiber length, fiber volume fraction, mixture characteristics, and environmental exposure conditions.

In this thesis, the effects of different PF lengths and volume fractions on the fresh, physical, mechanical, and post-high-temperature properties of high-strength mortars were experimentally investigated. For this purpose, a high-strength control mortar was produced using CEM I Portland cement, silica fume, river sand, and a superplasticizer. PFs with lengths of 6, 12, and 18 mm were incorporated into the mixtures at volume fractions of 0.3%, 0.6%, and 0.9%. The workability, ultrasonic pulse velocity (UPV), apparent porosity, water absorption, flexural strength, and compressive strength of the produced mortars were determined. In addition, the specimens were exposed to temperatures of 200, 400, and 600 °C, and their post-exposure mass loss, flexural strength, and compressive strength were evaluated. The relationships among the experimental results were also assessed through statistical analyses.

The experimental results showed that the effects of PF incorporation on the properties of high-strength mortars varied depending on fiber length and volume fraction. PF incorporation particularly improved the flexural behavior, whereas increasing fiber length and volume fraction could adversely affect workability and internal structure characteristics. The post-high-temperature performance was also found to vary considerably depending on fiber length, fiber volume fraction, and exposure temperature. Overall, the findings demonstrated the importance of considering fiber length and volume fraction together in the design of PF-reinforced high-strength mortars.

Keywords: Polypropylene fiber, high-strength mortar, fiber length, fiber volume fraction, mechanical properties, high temperature.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1. Polipropilen Liflerin Genel Özellikleri.....	10
2.2. Polipropilen Liflerin Taze Harç ve Beton Özelliklerine Etkisi.....	11
2.3. Polipropilen Liflerin Mekanik Özelliklere Etkisi.....	12
2.3.1. Basınç dayanım özelliklerine etkisi.....	12
2.3.2. Eğilme ve çekme dayanımlarına etkisi	13
2.4. Yüksek Dayanımlı Harç ve Betonlarda Polipropilen Lif Kullanımı	14
2.5. Literatürdeki Boşluk.....	15
3. MATERYAL VE METOT	18
3.1. Harç Üretiminde Kullanılan Malzemeler	18
3.2. Polipropilen liflerin özellikleri	19
3.3. Karışım Tasarımı ve Harç Üretimi	20
3.4. Numune Üretimi ve Kürleme	22
3.5. Taze Harç Deneyleri.....	24
3.5.1. İşlenebilirlik (yayılma tablası deneyi)	24
3.6. Sertleşmiş Harç Deneyleri	25
3.6.1. Ultrases geçiş hızı	25
3.6.2. Eğilme dayanımı deneyi.....	26
3.6.3. Basınç dayanımı deneyi	27
3.6.4. Görünür porozite ve su emme deneyleri	28
3.6.5. Yüksek sıcaklık deneyleri	29
4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA	32
4.1. İşlenebilirlik.....	32
4.2. Ultrases Geçiş Hızı	33

4.3. Eğilme Dayanımı	35
4.3. Basınç Dayanımı	38
4.4. Porozite ve Su Emme	39
4.5. Yüksek Sıcaklık Performansı	42
4.5.1. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan serilerin kütle kaybı	43
4.5.2. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan serilerin eğilme dayanımı performansı	45
4.5.3. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan serilerin basınç dayanımı performansı	47
4.6. Ultrases Geçiş Hızı- Basınç Dayanımı İlişkisi	50
4.7. Görünür Porozite- Basınç Dayanımı İlişkisi	51
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	53
5.1. Sonuçlar	53
5.2. Öneriler	58
KAYNAKÇA	59

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Polipropilen Liflerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri .	10
Tablo 3.1. Toz Halindeki Malzemelerin Kimyasal Özellikleri	18
Tablo 3.2. Polipropilen Liflerin Özellikleri	20
Tablo 3.3. Harç Serilerinde Kullanılan Lif Uzunlukları ve Oranları	21
Tablo 3.4. Yüksek Dayanımlı Harç Serilerinin Karışım Miktarları (kg/m ³)	22
Tablo 4.1. Harç Numunelerinin Kontrol Numunesine Göre Performans Değişim Oranları (%)	41
Tablo 4.2. Yüksek sıcaklık sonrası harç numunelerinin kontrol numunesine göre performans değişim oranları (%)	50

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Çimento, silis dumanı ve nehir kumu	18
Şekil 3.2. Silis Dumanı, Çimento ve Nehir Kumunun Tane Boyut Dağılımı	19
Şekil 3.3. Polipropilen Lifler.....	20
Şekil 3.4. Mikser ve Polipropilen Liflerin Karışıma Dahil Edilmesi.....	22
Şekil 3.5. Kalıplara Yerleştirilmiş Numuneler	23
Şekil 3.6. Kırılma İşlemi	23
Şekil 3.7. Üretilen Numunelere Ait Görünümler	24
Şekil 3.8. Yayılma Tablası Deneyi	25
Şekil 3.9. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi.....	26
Şekil 3.10. Eğilme Dayanımı Deneyi.....	27
Şekil 3.11. Basınç Dayanımı Deneyi	28
Şekil 3.12. Görünür Porozite ve Su Emme Deneyi.....	29
Şekil 3.13. Yüksek Sıcaklık Deneylerinde Uygulanan Sıcaklık-Zaman Eğrisi	30
Şekil 3.14. Harç Numunelerine Yüksek Sıcaklık Uygulaması	31
Şekil 4.1. Lif Uzunluğu ve Lif Hacim Oranının Yayılma Çapına Etkisi	33
Şekil 4.2. Harç Serilerinin Ultrases Geçiş Hızı Ölçüm Sonuçları (28 günlük kür)	34
Şekil 4.3. 7 ve 28 Günlük Kırılma Sürelerinde Harç Serilerinin Eğilme Dayanımları	35
Şekil 4.4. Polipropilen Lif Katkılı Harç Numunelerinin Eğilme Dayanımı Deneyi Öncesi ve Sonrası Genel Görünümleri.....	37
Şekil 4.5. 7 ve 28 Günlük Kırılma Sürelerinde Serilerin Basınç Dayanımı Değerleri.....	38
Şekil 4.6. Serilerin 28 Günlük Görünür Porozite ve Su Emme Kapasitesi.....	40
Şekil 4.7. Farklı Sıcaklıklara Maruz Bırakılan Polipropilen Lif Katkılı Harç Numunelerinin Genel Görünümleri.....	42
Şekil 4.8. Yüksek Sıcaklığa Maruz Kalan Serilerin Kütle Kaybı Oranları.....	43
Şekil 4.9. Yüksek Sıcaklıklara Maruz Kalan Serilerin Eğilme Dayanımı Değerleri	45

Şekil 4.10. Yüksek Sıcaklıklara Maruz Kalan Serilerin Basınç Dayanımı Değerleri.....	47
Şekil 4.11. Harç Serilerinin 28 Günlük Ultrases Geçiş Hızı ve Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki.....	50
Şekil 4.12. Görünür Porozite ile 28 Günlük Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki	522

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

b: Numunenin Kare Kesitinin Uzunluğu (mm)

d: Numunenin kalınlığı, derinliği (mm)

f: Eğilme Dayanımı (N/mm² veya MPa)

F: Kırılma Anındaki Maksimum Yük (N)

L: Dönüştürücüler Arasındaki İletim Mesafesi (m)

***m*₀** : 20 °C'deki Başlangıç Numune Ağırlığı

***m*₁** : Yüksek Sıcaklık Uygulaması Sonrasındaki Numune Ağırlığı

M: Kütle Kaybı (%)

P: Görünür Porozite (%)

T: Darbe Geçiş Süresi (s)

V: Ultrases Geçiş Hızı (m/s)

***w*₀**: 105 °C'de 24 Saat Etüvde Kurutulan Numunenin Kuru Ağırlığı

***w*₁** : Suya Doygun Yüzey Kuru Durumdaki Ağırlığı

***w*₂** : Numunenin Su İçerisinde İken Arşimet Terazisi ile Ölçülen Ağırlığı

WA: Su Emme (%)

DSC: Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi

EDS: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi

PL: Polipropilen Lif

SEM: Taramalı Elektron Mikroskobu

SD: Silis Dumanı

SP: Süper Akışkanlaştırıcı

TGA: Termogravimetrik Analiz

UPV: Ultrases Geçiş Hızı

XRD: X- Işını Kırınımı

XRF: X- Işınları Floresansı

1. GİRİŞ

Hızla değişen ve gelişen yapı model ve teknikleri yüksek dayanımlı harç ve beton taleplerini artırmıştır. İlk kez 1927 yılında Amerika’da bir günde erken dayanımı 41.6 MPa olan yüksek performanslı beton ile tünel inşa edilmiş ve 1930 yılında ise Japonya’da 102 MPa dayanımında ilk yüksek dayanımlı beton üretilmiştir (Topçu, 2026). Yüksek dayanımlı harç ve beton; düşük su/çimento oranına sahip, mineral ve kimyasal katkı kullanılarak doğru granülometri ile elde edilmektedir (Karımov, 2024). Bu tür harçlarda silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi ince mineral katkılar sayesinde çimento matrisi geçirimsiz bir yapıya kavuşmakta, kapiler boşluklar azalmakta ve buna bağlı olarak hem basınç dayanımı hem de dayanıklılık özellikleri önemli ölçüde iyileşmektedir (Erdoğan, 2013). Ayrıca süperakışkanlaştırıcı gibi kimyasal katkılar çimentolu harçların işlenebilirlik, mekanik ve dayanıklılık performanslarını artırmaktadır (Şimşek vd., 2004)

Yüksek dayanımlı harçların mekanik performansını ve dayanıklılık özelliklerini geliştirmek amacıyla, çelik donatıya alternatif takviye malzemelerine olan ilgi giderek artmaktadır. Bu yaklaşımın temelinde, tarih boyunca harçların güçlendirilmesinde kullanılan saman ve at kılı gibi doğal liflerden edinilen deneyimler yer almaktadır. Günümüzde bitkisel liflerin yanı sıra cam, çelik, bazalt ve polipropilen gibi yapay lifler harçlarda takviye elemanı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Lif kullanımının harç ve betonların basınç dayanımı, eğilme dayanımı, tokluk, donma-çözülme direnci, aşınma dayanımı, darbe dayanımı, rötre, yüksek sıcaklık etkisi sonrasını birçok mekanik ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirdiği bildirilmiştir (Portakal vd., 2026). Özellikle lif ilavesi, yüksek dayanımlı çimento esaslı harçlarda mikro çatlakların ilerlemesini sınırlandırarak kırılma davranışını azaltmakta, eğilme ve çekme dayanımını artırmakta ve bu sayede belirli uygulamalarda geleneksel çelik donatıya alternatif veya tamamlayıcı bir takviye yöntemi olarak değerlendirilmektedir (Arvizu-Montes vd., 2025). Ülkemizde lif takviyeli harç ve beton üretiminde en yaygın tercih edilen takviye malzemeleri çelik ve polipropilen liflerdir (Yaprak vd., 2004)

Polipropilen lifler, propilen monomerinin uygun katalizörler eşliğinde yüksek basınç ve kontrollü sıcaklık koşullarında polimerizasyonu sonucunda elde edilen sentetik liflerdir (Kara, 2011). Hafif, kimyasal dayanımlarının yüksek ve üretim maliyetlerinin az olmasından dolayı inşaat ve tekstil başta olmak üzere birçok sektörde geniş kullanım alanlarına sahiptir (Hossain, vd., 2024). Uzunluk, yapısal formları ve işlevleri bakımından polipropilen lifler, makro ve mikro olmak üzere ikiye ayrılır (Blazy ve Blazy, 2021). Boyu 30 mm'ye kadar olan, çok sayıda ince filamentin bir araya getirilmesiyle elyafımsı yapıda üretilen, harç içerisinde

homojen olarak dağılabilen ve oluşan mikro çatlakların makro çatlaklara dönüşmesini engelleyen polipropilen lifler, mikro polipropilen lif olarak adlandırılmaktadır (Bahadır, 2010). Makro liflerin uzunlukları ise genellikle 30 ile 50 mm arasında olup, geleneksel çelik çubuklar şeklinde donatının yerini alabildikleri ve yapıya etki eden yükleri aktarabildikleri için yapısal lifler olarak da adlandırılırlar (Blazy ve Blazy, 2021). Polipropilen lifler inşaat sektöründe yol kaplama betonlarında, ağır tonajlı araçların kullandığı endüstriyel döşemelerde, havalimanı pist uygulamalarında, püskürtme beton ve birçok uygulamada kullanılırken, mikro liflerin kılcal çatlakları azaltma özelliklerinden dolayı hazır sıva ve tamir harcı gibi çimentolu harç uygulamalarında kullanılmaktadır (Topçu vd., 2017).

Polipropilen liflerin önemli fiziksel özelliklerinden biri suyu bünyesine kabul etmeyen bir yapıya sahip olmasıdır. Suyu bünyesine kabul etmemesi ve kimyasal bir etkileşim içerisinde olmaması polipropilen liflerin hidrofobik bir özelliğidir (Abdulkareem vd., 2022). Bu özellik ile polipropilen lifleri çimentolu harçlarda su/çimento oranını etkilemeden kararlılıklarını korumaktadırlar (Oktay vd., 2014). Çimentolu esaslı harç ve beton içerisinde boşluk oranını azalttığı, bu nedenle de karışımlarda kullanımı artmıştır. Yapılan çalışmalarda, lif boyutunun ve hacimsel kullanım oranının artmasıyla birlikte liflerin karışım içerisinde topaklanma eğilimi gösterdiği, bunun sonucunda boşluk oranının arttığı ve işlenebilirliğin olumsuz yönde etkilendiği bildirilmiştir (Topçu vd., 2017).

Literatürde yapılan çalışmalarda, polipropilen lif kullanımının basınç dayanımı üzerindeki etkisinin %0.1–%0.6 hacimsel lif oranlarında sınırlı düzeyde olumlu olduğu, ancak bu artışın genel olarak düşük ve ihmal edilebilir seviyede kaldığı belirtilmiştir. Buna karşılık, lif boyunun ve hacimsel lif oranının artmasıyla birlikte karışım içerisindeki lif dağılımının olumsuz etkilendiği, topaklanma ve boşluk oluşumunun arttığı, bunun sonucunda ise basınç dayanımının azaldığı bildirilmiştir. Ayrıca, yüksek sıcaklığa maruz kalan polipropilen lif takviyeli harç ve betonlarda liflerin eriyerek matris içerisinde boşluklar oluşturduğu ve bu boşlukların basınç dayanımında önemli kayıplara neden olduğu literatürde rapor edilmiştir (Şenol ve Çalışkan, 2026a).

Polipropilen liflerin basınç dayanımı üzerindeki etkisinin sınırlı olmasına karşın, çatlak kontrolündeki etkinliği ve sünekliği artırması nedeniyle çimento esaslı harçlarda kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Literatürde, polipropilen liflerin yüksek çatlak köprüleme kapasitesi sayesinde çimentolu harçların eğilme ve çekme dayanımlarını artırdığı yaygın olarak rapor edilmiştir. Ayrıca, uygun lif boyu ve hacimsel lif oranının kullanılması durumunda, eğilme ve çekme dayanımlarındaki iyileşmenin yanı sıra enerji yutma

kapasitesinin ve kırılma sonrası davranışın da önemli ölçüde geliştirildiği bildirilmektedir (Lee vd., 2016).

Bu çalışmada, farklı lif boyları ve hacimsel lif oranları kullanılarak üretilen polipropilen lif (PL) katkılı yüksek dayanımlı harçların taze, mekanik ve dayanıklılık özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, yüksek dayanımlı harç üretiminde CEM I 42.5 Portland çimentosu, silis dumanı, nehir kumu ve süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Standart harç karışımına 6, 12 ve 18 mm lif boylarında ve %0.3, %0.6 ve %0.9 hacimsel oranlarında PL ilave edilerek 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler 7, 28 ve 90 gün süreyle su küründe bekletilmiştir. Taze harç özelliklerini belirlemek amacıyla yayılma tablası deneyi gerçekleştirilmiş, sertleşmiş harç numunelerinde ise eğilme ve basınç dayanımı, görünür porozite ve su emme deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklığın harçların performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla numuneler 200 °C, 400 °C ve 600 °C sıcaklıklara maruz bırakılmış; bu numunelerde kütle kaybı, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deney sonuçları kullanılarak ultrases geçiş hızı-görünür porozite- basınç dayanımı ilişkileri incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Chen ve Liu (2004), yaptıkları çalışmada karbon, polipropilen, çelik, karbon-çelik, karbon-polipropilen ve polipropilen-çelik ilaveli yüksek dayanımlı betonların, 20, 200, 400, 600 ve 800 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç dayanımları, yarmada çekme dayanımları ile numunelerde meydana gelen fiziksel değişimlerini incelemişlerdir. Lifsiz yüksek dayanımlı numunelerde sıcaklık etkisiyle numunelerin parçalandığı, sıcaklığın artması ile patlamanın daha da şiddetlendiğini tespit etmişlerdir. Polipropilen liflerin bu patlamaları engellediği, karbon ve çelik liflerin ise patlamaları hafiflettiğini ifade etmişlerdir. Lif katkılı betonların yüksek ısıya maruz kalması sonucu meydana gelecek dayanım ve dayanıklılık kayıplarını azaltacağını bildirmişlerdir. Hibrit lifli betonlarda ise basınç ve çekme dayanımlarındaki kayıpları iyileştirdiği, polipropilen lifli hibrit karışımlarda ise bu iyileşmenin biraz daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Topçu ve Canbaz (2007), çelik ve polipropilen lif ile üç farklı oranda uçucu kül kullanılarak elde edilen beton numunelerin mekanik performanslarını belirlemek için tahribatsız ve tahribatlı deneyler yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda lif ilavesinin işlenebilirliği azalttığı, uçucu kül ilavesinin ise değiştirmedini ifade etmişlerdir. Yapılan basınç, yarılmada çekme ve eğilme deneylerinde ise uçucu kül ilavesinin olumsuz etki ettiğini lif ilavesinin ise dayanımları yükselttiğini belirtmişlerdir. Yapılan tahribatsız ölçümlerde uçucu kül oranının artması ile ultrasonik darbe hızının azaldığı lif ilavesinin darbe hızını artırdığı, Schmidt geri tepme çekiç testi sonuçlarında ise basınç dayanımlarının uçucu kül kullanımı ile azaldığı lif ilavesi ile artış gösterdiği sadece 2. Tip polipropilen lif kullanımının küçük oranda basınç dayanımını düşürdüğünü bildirmişlerdir.

Tanrıöven (2009) yüksek sıcaklık etkisi altında betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin olumsuz etkilendiğini belirterek, polipropilen ve çelik liflerin birlikte ilave edildiği betonların basınç dayanımları, elastisite modülü, yarmada çekme dayanımları ve eğilme dayanımlarına etkilerini inceleyen bir çalışma yürütmüştür. %0.1, %0.5, %1.5 ve %2.0 hacminde çelik lifler ile %0.05, %0.1, %0.15 ve %0.2 hacminde polipropilen lif ilaveli numuneler ile kontrol numuneler dahil 270 adet silindir, 90 adet küp olmak üzere toplam 360 adet numune hazırlamış, oda sıcaklığı, 100 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklıklara maruz bırakılarak 7, 28 ve 90 günlük periyotlarla deneylere tabi tutmuştur. DeneySEL çalışma sonucunda lif katkısının basınç dayanımı ile elastisite modülünü iyileştirmediği aksine düşürdüğünü, yarmada çekme dayanımlarını artırdığını bildirmiştir. Eğilmede çekme dayanımlarında ise 200 °C sıcaklığa kadar dayanımlarda artış olurken bunun üzerindeki

sıcaklıklarda çekme dayanımları azalırken, 600 °C ve 800 °C sıcaklıklarda %1.00/%0.10, %1.50/%0.15 ve %2.00/%0.20 çelik lif/polipropilen lif oranlarında tekrar artış olduğunu bildirmiştir.

Dirikgil (2009), çalışmasında hacimce %0.1, %0.2, %0.3, %0.4, %0.5 oranlarında iki farklı tip polipropilen lif katkılı betonların, 24.5 °C, 100 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcak etkisi altında basınç dayanımları, yarmada çekme dayanımları, eğilmede çekme dayanımları, elastisite modülü ve enerji yutma kapasitesi değerlerini incelemiştir. Deneysel çalışma sonucunda betonun maruz kaldığı sıcaklık arttıkça, basınç dayanımı, elastisite modülü ve enerji yutma kapasitelerinde azalma olduğunu bildirmiş, 24.5 °C sıcaklığa maruz bırakılan %0.1, %0.2 ve %0.3 oranındaki lif katkılı betonlarda yarmada çekme dayanımında bir değişim olmadığı, %0.4 ve %0.5 katkılı betonlarda ise artış olduğu belirtilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinin ise yarmada çekme dayanımını düşürdüğü, lif katkısının 200 °C ye kadar eğilme dayanımını iyileştirdiği daha yüksek sıcaklıklarda ise kontrol numuneye kıyasla düşürdüğü bildirilmiştir. Çalışmasında polipropilen liflerin eğilme ve yarmada çekme dayanımlarını iyileştirdiği bu nedenlerle yapılarda %0.4 oranında kullanımının uygun olacağını ifade etmiştir.

Nili ve Afroughsabet (2010) silis duman katkılı 0.36 ve 0.46 s/ç oranına sahip, 12 mm uzunluğunda %0.2, %0.3 ve %0.5 hacimli polipropilen lifli betonların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve darbe dayanımlarını belirlemeye yönelik bir çalışma yapmışlardır. 2 adet silis dumanı ve lifsiz, 2 adet silis dumanı katkılı, 6 adet lif katkılı, 6 adet ise silis dumanı ve lif katkılı olmak üzere toplam 16 adet seri numune hazırlamışlardır. Yapılan deneylerde basınç dayanımının lif oranı ile doğru orantılı olduğu; lif miktarı arttıkça basınç dayanımının da arttığını, silis dumanı ilavesinin basınç dayanımını %30 artırdığını belirlemişlerdir. Genel olarak silis dumanlı lifli numunelerde, lifsiz silis dumanlı numunelere kıyasla daha iyi bir performans ve dayanıklılık gösterdiğini ifade etmişlerdir.

Tezel (2010) kendiliğinden yerleşen betona çelik ve polipropilen lif ilave etmenin akış süresini artırarak, işlenebilirlik ve taze beton özelliklerine olumsuz etki ettiğini ifade etmiştir. Farklı tip çelik ve polipropilen lif katkılı kendiliğinden yerleşen betonların işlenebilirlik özelliklerine etkilerini tespit etmek için U ve V-hunisi, U ve L-kutusu deneylerinin yapıldığını ifade etmiş, mekanik özelliklerine etkilerini ise basınç, eğilme ve elastisite modülü tespiti ile yapıldığını belirtmiştir. Sertleşmiş beton deneylerinde lif ilavesinin basınç dayanımını artırdığı, elastisite modülünü ise etkilemediğini bildirmiştir.

Karahan ve Atış (2011) polipropilen lif ve uçucu kül içeren betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında %0.0, %0.05, %0.1 ve %0.2 hacimli polipropilen lif ve kütle olarak %15 ve %30 oranında uçucu kül içeren betonların birim ağırlık, işlenebilirlik, basınç dayanımı, elastisite modülü, su emme, kuruma büzülmesi ve donma-çözülme özelliklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda uçucu kül ilavesinin işlenebilirliğe pozitif, polipropilen liflerin ise negatif etki ettiğini belirtmişlerdir. Uçucu kül ve lifli betonların basınç dayanımı, elastisite modülü ve kuruma büzülmesine olumlu etki yaptığını ifade etmişlerdir.

Açıkgenç vd., (2012) polipropilen lif ilavesinin betonun taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerine olan etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Mikro ve makro tiplerdeki liflerin, 300, 350 ve 400 dozlu, su/çimento oranı 0.4 ve 0.6 olan betonlara ilave edilmesi ile çökme, basınç, kapiler su emme, aşınma ve eğilmede çekme dayanımı deneyleri yapmışlardır. Çalışmalarında polipropilen liflerin çökme miktarını azaltarak işlenebilirliği olumsuz etkilediği, lif miktarının belli bir orandan sonra kullanımının basınç dayanımını düşürdüğü, lif miktarının artışının eğilme dayanımı ve aşınma direncini artırdığını belirlemişlerdir.

Topçu vd., (2017) çalışmalarında farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip polipropilen lifli harçların, birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme, elastisite modülü ve mikro yapısını incelemişlerdir. 3, 6, 9 ve 12 mm boylarında polipropilen lifler hacimce %0.6, %0.8, %0.9 ve %1.1 oranlarında kullanılarak toplam 48 seri numune hazırlamışlardır. Yapılan deneysel çalışma sonucunda; referans numunelere oranla basınç dayanımlarında %3-17 oranında azalma olduğunu, eğilme dayanımlarının yükseldiğini, lif miktarı arttıkça ultra ses geçiş hızının düştüğünü, elastisite modülünün azaldığını, su emme oranlarının arttığını belirlemişlerdir.

Yiğit (2020), Türkiye’de en çok kullanılan kaplama malzemelerinden olan asfaltın sıcaklık, araç trafiği gibi sebeplerle yüzeyinde meydana gelen deformasyon ve çökmelerin iyileştirilmesi amacıyla birçok katkı maddesi kullanımının olduğunu ifade etmiştir. Yaptığı çalışmada katkı maddelerine alternatif olarak polipropilen liflerin farklı boy ve hacimlerde kullanımının bu deformasyonlar ve bitümlü kaplamanın diğer mekanik özelliklerine etkilerini incelemiştir. Deneysel çalışma için 6, 12, 19 ve 54 mm liflerin %0.5, %1.0, %2.0 ve %2.5 oranlarında kullanılarak hazırlanan numuneler üzerinde Marshall ve 3 noktalı kiriş eğilme deneyleri yapmıştır. 12 ve 19 mm boylarındaki lif katkılı karışımların Marshall değerlendirme deneyinde en iyi sonucu verdiği belirtilerek, özellikle kent içi yollardaki bozulmaların en önemli sebeplerinden gösterilen alt tabaka deformasyonlarından dolayı yaşanan problemlere

özüm olamayacağını ifade etmiştir. Yol kaplama temellerinin sağlam olması durumunda polipropilen lif kullanımının fayda sağlayabileceğini belirtmiştir.

Rostami vd., (2020) çalışmalarında 48 mm uzunluğunda makro polipropilen liflerin işlenebilirlik, basınç dayanımı, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarına etkilerini incelemiştir. Çalışmaları için sıradan ve aşılınmış anhidrit maleik polipropilen granülleri kullanılarak hidrofobik ve hidrofilik girintili polipropilen lifler üretmişlerdir. Ürettikleri lifleri hacimce %0.55 oranında kullanarak beton numuneleri elde etmişlerdir. Bu numuneler üzerinde yapılan deneysel çalışma sonucunda; girintili ve hidrofilik lif kullanımının işlenebilirliği diğer karışımlara kıyasla daha fazla düşürdüğünü, basınç dayanımını artırdığını belirtmişlerdir. Girintisiz ve hidrofobik lif kullanımı ile yarmada çekme dayanımının %25 arttığını, girintili ve hidrofilik lif kullanımında ise bu artışın %45 olduğunu, eğilme dayanımında da artış oranlarının girintisiz ve hidrofobik lif eklenmesinde %46 ve girintili hidrofilik lif eklenmesi durumunda da %77 olarak bulmuşlardır. Çalışma sonucunda; girintili ve hidrofilik lif kullanımının mekanik ve dayanıklılık özelliklerini olumlu yönde etkilediğini belirlemişlerdir.

Garg ve Garg (2021), yaptıkları çalışmada silis dumanı ve polipropilen lif katkısının beton üzerindeki işlenebilirlik, basınç ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerine etkilerini incelemiştir. Yaptıkları çalışmada, hacimce %4, %8, %12 ve %16 oranlarında silis dumanı, %0.4, %0.8, %1.2 ve %1.6 oranlarında polipropilen lif kullanılarak 10 seri numune hazırlamışlardır. Referans numunesine kıyasla işlenebilirlikte silis dumanlı karışımlarda %24, lifli karışımlarda %42, silis dumanı ve lif bulunan karışımda ise %45 oranında azalma olduğu, silis dumanı ve polipropilen liflerin işlenebilirliği düşürdüğünü belirlemişlerdir. Silis dumanı ve polipropilen lif oranlarıyla doğru orantılı olarak basınç ve çekme dayanımlarını iyileştirdiği, her ikisinin kullanıldığı karışımda dayanımların daha da yüksek olduğunu belirlemişlerdir. %12 silis dumanı ve %1.2 lif katkılı numunede kontrol karışımına kıyasla daha yüksek basınç dayanımı elde etmişlerdir.

Şahin (2022) çelik lif, silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcı katkı içeren yüksek dayanımlı betonlara iki tip çimento ile polipropilen ve bazalt liflerin ilave edilmesiyle, yüksek sıcaklık sonrası performanslarını incelemiştir. Çalışmada iki tip farklı çimento için lifsiz şahit numuneler ile ikili ve üçlü lif grupları olmak üzere 16 seri toplam 80 adet numune hazırlamıştır. Bu numuneler üzerinde çökme, birim hacim ağırlık, hava miktarı, ultrasonik dalga hızı deneyleri ile yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanım deneyleri yapmıştır. Yapılan deneyler ile lif kullanımının çökme miktarını azalttığını, işlenebilirliği düşürdüğünü

belirlemiştir. Lifli betonların birim hacim ağırlıklarının yüksek olduğu, beton içerisindeki hava içeriğini de düşürdüğü belirtilmiştir.

Azandariani vd., (2023) düşük çekme dayanımına sahip betonun bu zayıf tarafını gidermek için yaygın olarak polipropilen ve poliolefin lif kullanıldığını vurgulamışlardır. Yapmış oldukları bu tespit ile bu iki lif ile takviye edilmiş betonun basınç dayanımı, aşınma direnci, sülfat etkisi ve asit etkisi gibi dayanıklılık ve mekanik özelliklerine etkilerini incelemiştir. Çalışmalarında farklı ebatlarda toplam 78 adet silindirik ve kübik numuneler hazırlamışlardır. Yapılan basınç dayanımı deneylerinde, polipropilen lif ilavesinin basınç dayanımlarını yükselttiği, poliolefin lif ilavesinin de karışımların dayanımını daha fazla arttırdığı bildirilmiştir. Ayrıca asit direnci, klorür iyonu penetrasyon direnci ve sülfat etkisi direnci testleri sonucu yapılan basınç dayanım deneylerinde poliolefin lifli numunelerin en yüksek dayanımlarda olduğu lifsiz numunelerin ise en düşük dayanımlara sahip olduğunu belirlemişlerdir.

Köseoğlu (2024) çalışmasında çelik ve polipropilen lif kullanımının çatlak oluşumlarına karşı gösterdikleri direnç, uzun servis ömrü, mekanik performanslarındaki artış ve ekonomik gerekçelerle yaygınlaştığını ifade etmiştir. Bu amaçlara uyumluluğunu gözlemlemek için farklı hacimsel oranlarda çelik ve polipropilen lif kullanarak, işlenebilirlik, birim hacim ağırlık, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, darbe dayanımı ve rötre deneylerinden oluşan bir çalışma yapmıştır. Deney numuneleri lifsiz şahit numune ve %2 ve %4 hacimlerinde çelik ve polipropilen liflerden tek ve ikili toplam 7 seri karışım elde edilmiştir. Çökme deneylerinde lif katkısı genel olarak işlenebilirliği düşürmüştü fakat çelik lifli karışımların polipropilen lifli karışımlara kıyasla kalıba dökülüp yerleştirilebilmesi konularında daha avantajlı olduğu ifade edilmiştir. Çelik lifli karışımların en yüksek birim hacim ağırlığa sahip oldukları, polipropilen lifli numunelerin ise en düşük birim hacim ağırlığa sahip oldukları bununda polipropilen liflerin karışımlarda daha boşluklu bir yapı oluşturmasının sebep olduğu belirtilmiştir. Çelik lif katkılı karışımların eğilme dayanımlarını iyileştirdiği, polipropilen lifli karışımların ise eğilme dayanımlarının referans numunelerine kıyasla düşürdüğünü ifade etmiştir. Basınç dayanımlarında %2 oranında çelik lif ve polipropilen lif katkılı karışımlar dayanımı düşürürken %4 hacimsel oranlı çelik lif katkılı karışımların dayanımları iyileştirdiği belirtilmiştir. Polipropilen lifli karışımlarda rötre çatlaklarını önlemekte çok başarılı olamadıkları çelik lifli karışımların nispeten daha etkili oldukları, her ikisinin kullanıldığı karışımların ise daha sürekli bir etki oluşturduğu ifade edilmiştir.

Çelik (2025) çimento esaslı harçlarda çelik lif ve polipropilen lif kullanımının 600 °C'ye kadar ulaşan yüksek sıcaklıklar ve sülfat etkisine maruz bırakılması ile meydana gelecek değişimlerin tespiti için mekanik performansları ile mikroyapısal davranışları üzerine bir çalışma yapmıştır. Çalışmasında 6 mm uzunluklarında 0.16 ve 0.35 mm çaplarında çelik lifler ile 6 mm uzunluğunda 30 mikron çapında mikro polipropilen lif kullanmıştır. Karışımlarda her lif ayrı ayrı kullanılarak silis duman ilaveli ve ilavesiz toplam 6 seri numune hazırlanarak, yüksek sıcaklık etkisi sonrasında kireçli su, sodyum sülfat ve potasyum sülfat havuzlarında 7, 28 ve 90 günlük kür havuzlarına alınarak ultra ses geçiş hızı testi, taramalı elektron mikroskobu ile görüntüleme ve basınç dayanım deneyleri yapmıştır. Çalışma sonucunda yüksek sıcaklık etkisi altında eriyen polipropilen liflerin basınç dayanımına doğrudan etki etmediği fakat malzemenin bütünlüğünü koruduğu ve silis dumanı ilave edilmesiyle basınç dayanımının iyileştiği, çelik lif kullanımının ise yüksek ısı karşısında deforme olmaması yangın sonrası ve sülfat etkileri ile meydana gelecek çatlamaları önleyerek basınç dayanımını artırdığı belirtilmiştir. Polipropilen liflerin yüksek sıcaklık etkisi ile eriyerek kompozit içerisinde meydana gelen boşluklar sebebi ile ultra ses geçiş hızının en fazla değişim oranına sahip olduğu, çelik lifli karışımlarda ise bu aranın daha az olduğu bildirilmiştir.

Abdulrahman vd., (2025), yaptıkları çalışmada polimerler ile motive edilmiş 4 tip yapıştırıcının 19 mm uzunluğunda mikrofiber polipropilen lifin hacimce %0.0, %0.5, %0.75, %1 ve %1.5 kullanılmasıyla elde edilen numunelerde işlenebilirlik, basınç dayanımı, aderans dayanımı ve çekme dayanımı gibi mekanik performanslarını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre lif ilavesinin işlenebilirliği bir miktar azalttığı, ancak bazı karışımlarda basınç ve eğilme dayanımını artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, lif katkısının özellikle kayma dayanımını artırdığı ve basınç dayanımı ile yüksek korelasyon gösterdiği belirtilmiştir. Bununla birlikte, lif ilavesinin bazı karışımlarda gözenekliliği artırarak mekanik performansı olumsuz etkileyebileceği ve aderans davranışının karışıma bağlı olarak değişkenlik gösterdiği ifade edilmiştir.

Liu vd., (2026) yaptıkları çalışmada, 3 farklı su/çimento oranı, farklı boy ve hacimlerde polipropilen lif takviyesi ile mekanik performanslarında meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Çalışmada hazırlanan karışım içerisine uçucu kül, demir tozları ve 3 ve 12 mm uzunluklarında polipropilen lif ilave etmişlerdir. Yapılan çalışmalarda polipropilen lif ilavesinin işlenebilirliği bir miktar azalttığı fakat genel olarak akışkanlığın iyi bir seviyede olduğunu vurgulamışlardır. Lif hacmi arttıkça basınç dayanımının azaldığı, 12

mm polipropilen lif ile su/çimento oranının 1.0 olduğu karışımın eğilme dayanımının yüksek olduğu, %0.5 hacimli lif ilaveli karışımlarda da eğilme dayanımında belirgin bir yükselme olduğunu belirterek, ultrasonik ses dalgası ölçümleri ile eğilme dayanımları arasında güçlü bir korelasyon olduğunu belirlemişlerdir. Polipropilen lif ilavesinin tokluk enerji kapasitesini arttırdığı, 12 mm uzunluğundaki liflerin çatlak önleme etkilerinin de daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca %0.5 hacimli lif ilaveli harçların ekonomik ve mekanik performansları yönünden optimum oranda çözüm olduğunu ifade etmişlerdir.

2.1. Polipropilen Liflerin Genel Özellikleri

Polipropilen lifler (PL) doğada gaz olarak bulunan propilenin yüksek basınç altında katalize edilmesiyle elde edilir (Ahmed vd., 2020). Suyun yoğunluğundan daha az olan PL'in yoğunluğu yaklaşık olarak 0.91 gr/cm^3 tür ve su emmeyen hidrofobik bir yapıya sahiptir. Çekme dayanımı 270-700 MPa, elastisite modülü 3.0-8.5 GPa ve %15 oranında nihai uzamaya sahip olması liflerin çimentolu harçlarda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azaltmaktadır (Şenol ve Çalışkan, 2026a).

PL'nin çimentolu harç matrisi içerisinde homojen dağılımı oluşan çatlakları kısıtlayarak, genişliklerinin de büyümesini sınırlandırmaktadır. Harçlarda bu etkileri göstermelerini sağlayan önemli faktörler, liflerin tipleri, uzunlukları, çapları ve hacimsel oranlarıdır. Uygun lif tipi, boyu, çapı ve hacimsel oranının doğru belirlenmesi karışımın çatlak önleme, tokluk ve birçok mekanik ile dayanıklılık özelliklerini optimum düzeyde iyileştirmektedir (Şenol ve Çalışkan, 2026a). Tablo 2.1'de PL'nin fiziksel ve mekanik özellikleri gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Polipropilen Liflerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri (Şenol ve Çalışkan, 2026a).

Özellik	PPF
Resim	
Çekme dayanımı (MPa)	270-700
Elastisite modülü (10^3 , MPa)	3-8.5
Erime Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	150-230
Buharlaşma Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	300-360
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	0,91
Lif Çapı (mm)	0.02-0.5
Lif Uzunluk (mm)	0-60

Polipropilen liflerin kullanımına ilişkin önemli araştırma konularından biri, yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışlarıdır. Yaklaşık 160–170 °C sıcaklık aralığında erime özelliği gösteren polipropilen liflerin, yüksek sıcaklığa maruz kalan yüksek dayanımlı çimento esaslı harçlarda eriyerek oluşturduğu boşluklar ve kanallar aracılığıyla su buharının tahliyesini kolaylaştırdığı ve böylece matris içerisinde oluşan buhar basıncını azalttığı belirtilmektedir. Bu mekanizma, özellikle düşük geçirgenliğe sahip yüksek dayanımlı çimento esaslı malzemelerde yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelebilen patlayarak parçalanma (explosive spalling) riskinin azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, polipropilen liflerin çelik esaslı takviye malzemelerinin aksine korozyona uğramaması, çimento esaslı kompozitlerde tercih edilmelerinin önemli nedenlerinden biri olarak gösterilmektedir (Algourdin vd., 2020).

2.2. Polipropilen Liflerin Taze Harç ve Beton Özelliklerine Etkisi

Polipropilen lifler, çimento esaslı harç ve betonlarda kullanımı giderek yaygınlaşan sentetik takviye malzemeleridir. Düşük yoğunluğa sahip olmaları, kimyasal etkilere karşı yüksek dayanıklılık göstermeleri, kolay temin edilebilmeleri ve ekonomik olmaları, yaygın olarak tercih edilmelerinin başlıca nedenleri arasında yer almaktadır. Polipropilen lifler, çatlak oluşumunun ve ilerlemesinin sınırlandırılmasının yanı sıra çimento esaslı kompozitlerin çeşitli mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin iyileştirilmesine de katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, PL kullanımının taze beton ve harçların işlenebilirliği üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Karışıma ilave edilen liflerin katı bileşenler arasındaki iç sürtünmeyi artırması ve karışımın hareketliliğini sınırlandırması sonucunda işlenebilirliğin azaldığı ve buna bağlı olarak çökme (slump) değerlerinin düştüğü bildirilmiştir (Akid vd., 2023).

PL ilavesinin taze çimento esaslı harç ve betonların işlenebilirliğini azaltmasının temel nedenlerinden biri, liflerin karışım içerisindeki iç sürtünmeyi artırmasıdır. Liflerin agrega ve çimento taneleriyle etkileşime girmesi ve karışım içerisindeki toplam temas yüzeyini artırması, akmaya karşı oluşan iç direncin yükselmesine ve dolayısıyla işlenebilirliğin azalmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, karışım içerisinde farklı yönlerde dağılan liflerin üç boyutlu bir ağ yapısı oluşturması, karışım bileşenlerinin serbest hareketini kısıtlayarak taze harç ve betonun akış kabiliyetini sınırlandırmaktadır. Bu etkinin özellikle lif boyunun ve hacimsel lif oranının artmasıyla daha belirgin hale geldiği ve sonuç olarak işlenebilirlikte önemli azalmalara yol açabildiği bildirilmektedir (Bentegri vd., 2020). Lif ilavesine bağlı işlenebilirlik kaybını etkileyen diğer önemli faktörler arasında lif boyu, hacimsel lif oranı ve karışımda kullanılan mineral ve kimyasal katkıları yer almaktadır. Lif boyunun ve hacimsel lif oranının artması, liflerin karışım içerisinde homojen dağılımını

zorlaştırarak topaklanma eğilimini artırabilmekte ve bunun sonucunda işlenebilirlik olumsuz yönde etkilenebilmektedir. Bununla birlikte, PL içeren karışımlarda uygun mineral ve kimyasal katkıların kullanılmasıyla lif ilavesinden kaynaklanan işlenebilirlik kaybının belirli ölçüde telafi edilebildiği bildirilmektedir (Akid vd., 2023). Öte yandan, PL ilavesi sonucunda meydana gelen işlenebilirlik azalması her durumda olumsuz bir özellik olarak değerlendirilmemektedir. Liflerin karışım içerisinde oluşturduğu üç boyutlu ağ yapısının karışımın kohezyonunu ve stabilitesini artırarak segregasyon eğilimini ve suyun karışımdan ayrılmasını sınırlandırabildiği belirtilmektedir. Bu etkinin, özellikle yüksek akışkanlık ve karışım stabilitesinin birlikte sağlanmasının önemli olduğu kendiliğinden yerleşen betonlarda avantaj sağlayabileceği ifade edilmektedir (Matar ve Assaad, 2019).

2.3. Polipropilen Liflerin Mekanik Özelliklere Etkisi

Literatürde, polipropilen liflerin çimento esaslı harç ve betonların basınç, eğilme ve çekme dayanımları ile tokluk ve enerji yutma kapasitesi gibi mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar, PL ilavesinin mekanik performans üzerindeki etkisinin yalnızca lif kullanımına bağlı olmadığını, birçok parametrenin birlikte etkisiyle şekillendiğini ortaya koymaktadır. Liflerin hacimsel kullanım oranı ve geometrik özelliklerinin yanı sıra bağlayıcı malzemelerin türü ve ikame oranı, kimyasal ve mineral katkıları, karışımı oluşturan diğer bileşenlerin miktarları ve oranları ile uygulanan kür koşullarının elde edilen mekanik özellikler üzerinde önemli rol oynadığı ifade edilmektedir (Şenol ve Çalışkan, 2026a).

2.3.1. Basınç dayanım özelliklerine etkisi

Polipropilen lif ilavesinin çimento esaslı harç ve betonların basınç dayanımı üzerindeki etkileri birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda PL içeren karışımların basınç dayanımlarında farklı sonuçlar elde edilmekle birlikte, genel olarak lif ilavesinin basınç dayanımı üzerinde belirgin bir iyileşme sağlamadığı bildirilmektedir. Bununla birlikte, PL'lerin basınç dayanımına katkısı sınırlı olsa da liflerin çatlak ilerlemesini sınırlandırarak kırılma sürecinin daha kontrollü gerçekleşmesine katkı sağladığı belirtilmektedir. Bu etkinin özellikle uygun hacimsel lif oranlarında daha belirgin olduğu ve liflerin çatlak gelişimini kontrol ederek ani ve gevrek kırılma eğilimini azaltabildiği ifade edilmektedir (Al-Khaja, 1995).

PL ilavesinin basınç dayanımını olumsuz etkileyebildiği durumlarda belirleyici parametrelerden biri hacimsel lif oranıdır. Lif miktarının artması, liflerin karışım içerisinde

homojen olarak dağılmasını zorlaştırarak topaklanma eğilimini artırabilmektedir. Lif topaklanması ise karışımın işlenebilirliğini azaltarak kalıba yerleştirme ve sıkıştırma işlemlerini güçleştirmekte, buna bağlı olarak matris içerisindeki boşluk oranının artmasına neden olabilmektedir. Artan boşluk oranı ve yetersiz sıkışma sonucunda daha heterojen ve kusurlu bir iç yapı oluşması, basınç dayanımındaki azalmanın başlıca nedenleri arasında gösterilmektedir (Ramezaniapour vd., 2013).

2.3.2. Eğilme ve çekme dayanımlarına etkisi

Polipropilen lif ilavesinin, çimento esaslı harç ve betonların düşük çekme kapasitesinden kaynaklanan gevrek kırılma davranışının iyileştirilmesinde etkili olduğu bildirilmektedir. Karışım içerisinde homojen olarak dağılan PL'ler, mikro donatı işlevi görerek çatlakların başlamasını ve ilerlemesini sınırlandırmaktadır. Liflerin çimento esaslı matris içerisinde farklı yönlerde ve rastgele dağılım göstermesi, yükleme sırasında oluşan gerilmelerin daha geniş bir alana aktarılmasına katkı sağlamakta ve yerel gerilme yığılmalarını sınırlandırmaktadır. Böylece çatlak gelişiminin kontrol altına alınması, özellikle eğilme ve çekme gerilmelerine maruz kalan çimento esaslı kompozitlerin mekanik performansının iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır (Lee vd., 2016).

PL ilavesinin, ilk çatlak oluşumunu geciktirmesinin yanı sıra çatlak sonrası yük taşıma kapasitesinin geliştirilmesinde de etkili olduğu belirtilmektedir. Eğilme yükleri altında lifler, oluşan çatlakların karşılıklı yüzeyleri arasında köprüleme etkisi oluşturarak gerilmelerin çatlak boyunca aktarılmasına katkı sağlamakta ve çatlağın ani şekilde genişlemesini sınırlandırmaktadır. Bu mekanizma, gevrek ve ani kırılma eğilimini azaltarak çatlak sonrası davranışın daha kontrollü gerçekleşmesini sağlamaktadır. Literatürde özellikle uygun ve düşük hacimsel oranlarda PL kullanımının eğilme dayanımında belirli düzeyde artış sağlayabildiği, bununla birlikte tokluk ve enerji yutma kapasitesini iyileştirdiği rapor edilmiştir (Lee vd., 2016).

PL ilavesinin çimento esaslı harç ve betonların çekme davranışı üzerinde de olumlu etkiler sağlayabildiği bildirilmektedir. Çimento esaslı malzemelerin çekme dayanımlarının basınç dayanımlarına kıyasla oldukça düşük olması, çekme gerilmeleri altında çatlak oluşumunu kaçınılmaz hale getirebilmektedir. Matris içerisinde dağılan PL'ler, oluşan mikro çatlaklar arasında köprüleme mekanizması oluşturarak çatlakların açılmasını ve ilerlemesini sınırlandırmakta, aynı zamanda çatlak yüzeyleri arasındaki gerilme aktarımının devam etmesine katkı sağlamaktadır. Yapılan çalışmalarda PL kullanımının çekme dayanımında belirli düzeyde iyileşme sağlayabildiği ve özellikle rötre kaynaklı çatlakların oluşumunu ve

gelişimini sınırlandırarak çimento esaslı harç ve betonların genel performansına katkıda bulunduğu belirtilmektedir (Ramezaniapour vd., 2013).

2.4. Yüksek Dayanımlı Harç ve Betonlarda Polipropilen Lif Kullanımı

Yüksek dayanımlı harç ve betonlar, düşük su/bağlayıcı oranları ve düşük poroziteli yoğun matris yapıları sayesinde yüksek basınç dayanımına sahip çimento esaslı kompozitlerdir. Bununla birlikte, yüksek basınç dayanımlarına karşın sınırlı deformasyon kapasitesine sahip olmaları ve gevrek kırılma eğilimi göstermeleri, bu malzemelerin önemli dezavantajları arasında yer almaktadır. Bu nedenle, son yıllarda yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozitlerin sünekliğini artırmak, çatlak oluşumunu ve ilerlemesini sınırlandırmak ve bazı dayanıklılık özelliklerini geliştirmek amacıyla polipropilen lif (PL) kullanımı yaygınlaşmıştır. Özellikle PL ilavesiyle çatlak gelişiminin kontrol altına alınması ve gevrek kırılma eğiliminin azaltılarak kırılma sürecinin daha kontrollü hale getirilmesi amaçlanmaktadır (Lee vd., 2016).

Yüksek dayanımlı harç ve betonların düşük poroziteli ve yoğun matris yapısı, normal dayanımlı çimento esaslı kompozitlere kıyasla geçirgenliğin daha düşük olmasına neden olmaktadır. Bu durum, yüksek sıcaklık etkisi altında malzeme bünyesindeki suyun buharlaşmasıyla oluşan su buharının dışarıya tahliyesini güçleştirerek iç buhar basıncının artmasına ve buna bağlı olarak patlayarak parçalanma (explosive spalling) riskinin yükselmesine neden olabilmektedir. Polipropilen lifler ise yaklaşık 160–170 °C sıcaklık aralığında eriyerek matris içerisinde boşluklar ve birbirleriyle bağlantılı mikro kanalların oluşmasına katkı sağlamaktadır. Oluşan bu kanallar, su buharının malzeme içerisinden tahliyesini kolaylaştırarak gözenek basıncının azalmasına ve dolayısıyla patlayarak parçalanma riskinin sınırlandırılmasına yardımcı olmaktadır. Bu nedenle PL ilavesinin, özellikle yoğun iç yapıya sahip yüksek dayanımlı çimento esaslı harç ve betonların yüksek sıcaklık ve yangın etkileri altındaki davranışlarının iyileştirilmesinde etkili bir yöntem olduğu bildirilmektedir (Algourdin vd., 2020).

PL ilavesinin yüksek dayanımlı çimento esaslı harç ve betonların mekanik özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde, özellikle eğilme ve çekme davranışlarının iyileştirilmesinde etkili olduğu bildirilmektedir. Matris içerisinde dağılan polipropilen lifler, oluşan çatlakların karşılıklı yüzeyleri arasında köprüleme mekanizması oluşturarak çatlakların ilerlemesini ve genişlemesini sınırlandırmakta, aynı zamanda çatlak sonrası gerilme aktarımının devam etmesine katkı sağlamaktadır. Bu mekanizma sayesinde kompozitin yük altında enerji yutma kapasitesi ve tokluğu artmakta, yüksek dayanımlı harç ve betonların

karakteristik gevrek kırılma eğilimi sınırlandırılarak daha kontrollü ve sünek bir kırılma davranışı elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, PL kullanımının sağladığı bu mekanik avantajlara karşın, liflerin karışım içerisindeki iç sürtünmeyi artırması ve serbest akışı kısıtlaması nedeniyle taze harç ve betonların işlenebilirliğini azaltabildiği belirtilmektedir (Al-Khaja, 1995).

Dayanıklılık özellikleri açısından değerlendirildiğinde, PL ilavesinin çimento esaslı harç ve betonların performansı üzerinde olumlu etkiler sağlayabildiği bildirilmektedir. Polipropilen lifler, özellikle plastik rötre kaynaklı çatlakların oluşumunu ve mevcut çatlakların genişlemesini sınırlandırarak matris bütünlüğünün korunmasına katkı sağlamaktadır. Çatlak genişliklerinin kontrol altına alınması, su ve zararlı maddelerin matris içerisine nüfuz edebileceği yolların sınırlandırılmasına ve böylece dış ortam etkilerine karşı direncin artırılmasına yardımcı olmaktadır. Bu mekanizma sayesinde PL kullanımının su geçirimsizliğinin azaltılmasına, donma-çözülme etkilerine karşı direncin geliştirilmesine ve sonuç olarak çimento esaslı harç ve betonların servis ömrünün artırılmasına katkı sağlayabileceği bildirilmektedir (Ramezaniapour vd., 2013).

Polipropilen liflerin yüksek dayanımlı harç ve betonların çeşitli özelliklerine sağladığı katkılar, ekonomik olmaları ve uygulama kolaylıkları, inşaat sektöründe geniş bir kullanım alanı bulmalarını sağlamıştır. PL'lerin yüzey aşınması ve yıpranmayı sınırlandırmaya, çatlak oluşumunu kontrol etmeye ve dış ortam etkilerine karşı dayanıklılığı geliştirmeye katkı sağlamaları nedeniyle yol ve saha betonları, köprü elemanları ve yaya yolları gibi uygulamalarda tercih edildikleri belirtilmektedir. Ayrıca, korozyona uğramamaları ve yüksek sıcaklık etkisi altında patlayarak parçalanma riskinin azaltılmasına katkı sağlamaları, farklı çimento esaslı kompozitlerde kullanım açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bunun yanı sıra, çatlak kontrolü ve çeşitli çevresel etkilere karşı sağladıkları katkılar nedeniyle PL'ler; endüstriyel zemin ve saha betonları, şaplar, su yapıları, tamir harçları ve sıva uygulamaları gibi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Arazsu, 2012).

2.5. Literatürdeki Boşluk

Literatürde polipropilen lif (PL) ilavesinin çimento esaslı harç ve betonların taze, mekanik, fiziksel ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan elde edilen bulgular, PL kullanımının etkisinin lif tipi, lif boyu ve geometrisi, hacimsel lif oranı, karışım bileşenleri, mineral ve kimyasal katkı kullanımı, kür koşulları ve maruz kalınan çevresel etkiler gibi çok sayıda parametreye bağlı olarak değişebildiğini göstermektedir (Şenol ve Çalışkan, 2026a). Bununla birlikte, mevcut

araştırmalar incelendiğinde çalışmaların çoğunlukla belirli bir lif tipi, lif boyu veya sınırlı sayıdaki hacimsel lif oranına odaklandığı; lif boyu ve hacimsel lif oranının birlikte değişiminin imento esaslı kompozitlerin farklı performans özellikleri üzerindeki etkilerinin bütüncül olarak ele alındığı çalışmaların ise daha sınırlı olduğu görülmektedir.

Bu kapsamda, Abaeian vd. (2018), tek tip PL'nin farklı hacimsel oranlarda kullanıldığı yüksek dayanımlı betonların yüksek sıcaklık sonrası mekanik özelliklerini incelemiştir. Ramesh vd. (2020), farklı hacimsel oranlarda tek tip PL içeren kendiliğinden yerleşen betonların taze ve bazı sertleşmiş özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Dirikgil (2009), iki farklı tip PL'nin farklı hacimsel oranlarda kullanıldığı normal dayanımlı betonların taze ve sertleşmiş özellikleri ile yüksek sıcaklık altındaki davranışlarını değerlendirmiştir. Garg ve Garg (2021), tek tip PL'nin farklı hacimsel oranlarda kullanıldığı yüksek dayanımlı betonların taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerini incelemiştir. Kutzing (1996) ise tek tip ve tek hacimsel oranda PL kullanımının yüksek dayanımlı betonların süneklik davranışı üzerindeki etkisine odaklanmıştır. Topçu vd. (2017) tarafından gerçekleştirilen çalışmada ise farklı boy ve hacimsel oranlarda PL içeren yüksek dayanımlı harçların taze, fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.

Mevcut alışmalar genel olarak değerlendirildiğinde, PL katkılı imento esaslı kompozitlerde basınç, eğilme ve çekme dayanımı, tokluk, enerji yutma kapasitesi ve çatlak kontrolü gibi mekanik özelliklerin yanı sıra işlenebilirlik, porozite, su emme, geçirgenlik, rötre ve yüksek sıcaklık davranışı gibi özelliklerin de araştırıldığı görülmektedir. Bununla birlikte, çalışmaların önemli bir bölümünün betonlar üzerinde yoğunlaştığı, yüksek dayanımlı imento esaslı harçlara ilişkin araştırmaların ise görece daha sınırlı kaldığı görülmektedir. Özellikle farklı lif boyları ile farklı hacimsel lif oranlarının birlikte değiştirilerek bu iki parametrenin taze, mekanik, fiziksel ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkilerinin aynı deneysel program içerisinde karşılaştırmalı olarak değerlendirildiği çalışmaların sınırlı olması dikkat çekmektedir.

Bu durum, silis dumanı içeren yüksek dayanımlı harçlar açısından daha da önem kazanmaktadır. Silis dumanının filler ve puzolanik etkileri sonucunda oluşan yoğun ve düşük geçirgenlikli matris yapısı yüksek mekanik performans sağlamakla birlikte, yüksek sıcaklık etkisi altında malzeme içerisindeki su buharının tahliyesini güçleştirerek i gözenek basıncının artmasına ve termal hasarın şiddetlenmesine neden olabilmektedir. PL'ler ise yaklaşık 160–170 C sıcaklık aralığında eriyerek matris içerisinde su buharının tahliyesini kolaylaştırabilecek boşluk ve mikro kanalların oluşmasına katkı sağlamaktadır. Bununla

birlikte, liflerin erimesiyle oluşan bu yeni boşluk yapısı yüksek sıcaklık sonrasında porozite, su emme, ultrases geçiş hızı ve mekanik özellikler üzerinde farklı etkiler meydana getirebilmektedir. Bu nedenle lif boyu ve hacimsel lif oranının yalnızca ortam sıcaklığındaki mekanik performans açısından değil, yüksek sıcaklık sonrasında meydana gelen fiziksel ve mekanik değişimler açısından da birlikte değerlendirilmesi önem taşımaktadır.

Literatürdeki bu sınırlılıklar doğrultusunda, bu çalışmada silis dumanı ve süperakışkanlaştırıcı içeren yüksek dayanımlı çimento esaslı harçlarda PL boyu ve hacimsel lif oranının etkilerinin sistematik olarak araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda 6, 12 ve 18 mm olmak üzere üç farklı lif boyu ile %0.3, %0.6 ve %0.9 olmak üzere üç farklı hacimsel lif oranı kullanılarak üretilen harçların taze, mekanik, fiziksel ve dayanıklılık özellikleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Taze halde işlenebilirlik; sertleşmiş halde ise eğilme ve basınç dayanımı, porozite, su emme ve ultrases geçiş hızı özellikleri incelenmiştir. Ayrıca numunelerin 200 °C, 400 °C ve 600 °C sıcaklıklara maruz bırakılması sonucunda meydana gelen kütle kayıpları ile mekanik özelliklerdeki değişimler belirlenerek lif boyu ve hacimsel lif oranının yüksek sıcaklık sonrası performans üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Böylece farklı PL boyları ve hacimsel kullanım oranlarının yüksek dayanımlı harçların performansı üzerindeki bireysel ve birlikte etkilerinin ortaya konulması ve incelenen özellikler açısından uygun lif kullanım koşullarının belirlenmesi hedeflenmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Harç Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Harç karışımları, TS EN 197-1 (2012) standardına uygun olarak üretilmiş ve Vezirhan Çimento Fabrikası'ndan temin edilen CEM I 42.5 R Portland çimentosu ile Antalya Eti Elektrometalurji A.Ş.'nin atığı olan silis dumanı (SD) ve tane boyutu 0-4 mm aralığında Osmaneli nehir kumu kullanılarak hazırlanmıştır. İnce agrega olarak kullanılan nehir kumunun incelik modülü 2.59, su emme oranı %1,1 ve özgül ağırlığı 2.65 gr/cm³'tür. Çimentonun özgül ağırlığı 3.1 gr/cm³, SD'nin 2.2 gr/cm³'tür. Toz malzemelere ait görsel Şekil 3.1'de verilmiştir.

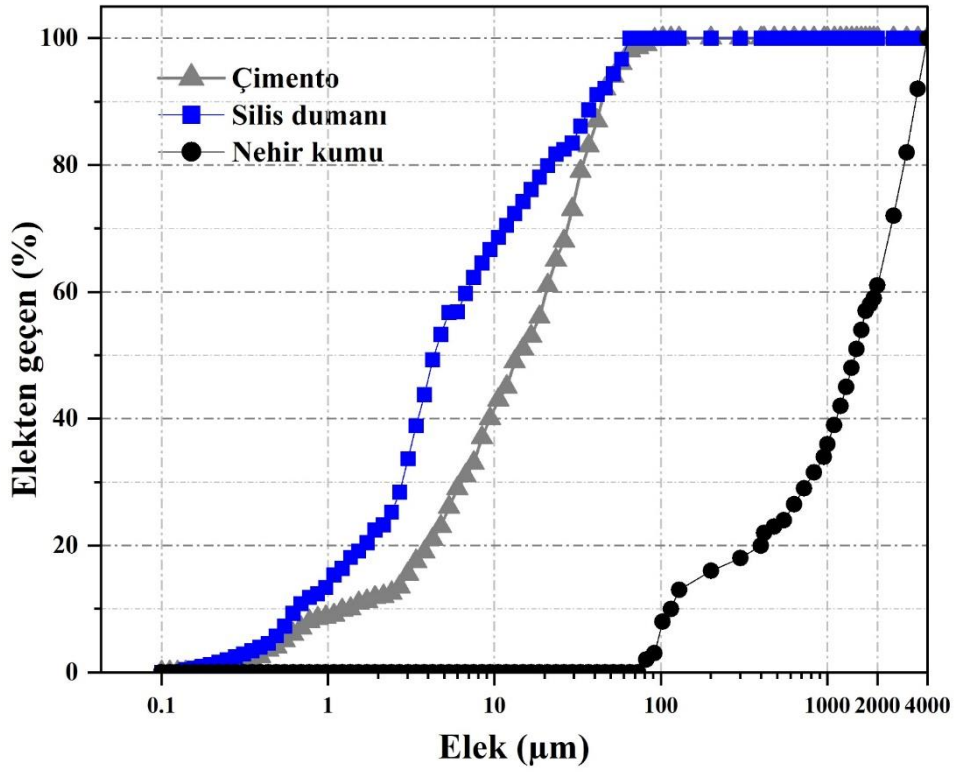


Şekil 3.1. Çimento, silis dumanı ve nehir kumu

Toz malzemelerin kimyasal özellikleri (XRF) Tablo 3.1'de verilmiş olup, lazer granülometri yöntemiyle elde edilen tane boyutu dağılımları Şekil 3.2'de sunulmuştur.

Tablo 3.1. Toz Halindeki Malzemelerin Kimyasal Özellikleri

Malzeme	Oksit Bileşenleri, %							Kızdırma kaybı
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	
CEM I 42.5	18.7	4.6	3.4	63.7	1.3	2.7	0.7	3.9
SD	74.1	1.38	7.34	0.75	1.55	0.24	5.33	3.35



Şekil 3.2. Silis Dumanı, Çimento ve Nehir Kumunun Tane Boyut Dağılımı

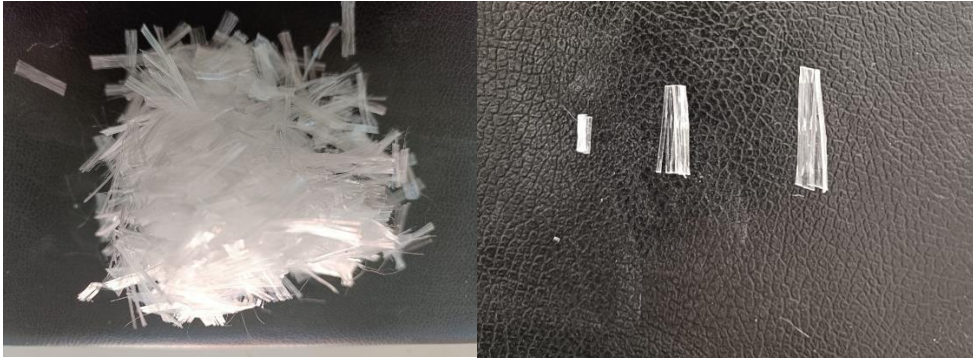
Harç karışımlarında yeterli işlenebilirliği sağlamak ve lif kullanımından kaynaklı değişimi değerlendirmek amacıyla tüm karışımlarda sabit oranda sıvı formda polikarboksilat esaslı bir süperakışkanlaştırıcı (SP; Fluid Premia 196, Chryso Co.; yoğunluk: 1.06 g/cm³) kullanılmıştır. SP dozajı, silis dumanı ve çimento içeriğine bağlı olarak toplam bağlayıcı ağırlığının %1.2'si olarak sabit tutulmuştur. Karışım ve kür işlemlerinde şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2. Polipropilen liflerin özellikleri

Harç karışımlarında, Polyfibers firmasından temin edilen; 6 mm, 12 mm ve 18 mm boyutlarındaki Polymono mikro fiber lif çeşitleri kullanılmıştır. Üretici firmadan temin edilen liflere ait teknik özellikler Tablo 3.2'de, polipropilen liflere ait görseller Şekil 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.2. Polipropilen Liflerin Özellikleri

Tip	Monofilamanlı mikro sentetik fiber
Bileşim	Saf Polipropilen
Kesit	Dairesel
Standartlar ve Sertifikalar	EN 14889 Kısım II Tip 1A, ASTM C1116 Tip III, ASTM D7508, ICC AC 32
Esneklik Katsayısı	6 GPa
Çekme Dayanımı	300 MPa
Özgül Ağırlık	0.91 g/cm ³
Çap	30-32 mikron
Dayanım	6.5 – 7.0 g / Denye- Yüksek Dayanım
Renk	Şeffaf
Fiber Sayısı	12 mm için 120 milyon üzeri / kg
Yüzey Alanı	140+ m ² /kg
Paslanma	Paslanmaz
Su Emilimi	Yok
Kimyasal Direnç	Mükemmel alkali direnci
Asit Etkisi	Sabit
UV Düzenleyici	İsteğe bağlı
Çimento Uyumluluğu	Mükemmel
Manyetizma	Manyetik değildir
Erime Noktası	165 °C
Ateşleme Noktası	>360 °C

**Şekil 3.3.** Polipropilen Lifler

3.3. Karışım Tasarımı ve Harç Üretimi

Yüksek dayanımlı harç karışımları için sabit bir toplam bağlayıcı içeriği 550 kg/m³ olarak benimsenmiştir. Kontrol karışımında SD, çimentolu bağlayıcı sisteminin %10'u oranında dahil edilmiştir. TS EN 206 (2021)'e göre, SD, Tip II katkı maddesi olarak sınıflandırılır ve izin verilen maksimum SD-çimento oranı kütlece 0.11 ile sınırlıdır. Bu nedenle, standartla

uyumluluğu sağlamak için çalışma boyunca tüm karışımlarda çimento-SD oranı 0.10 olarak korunmuştur.

Kontrol karışımı polipropilen lif içermeyen hazırlanmıştır. Farklı uzunluklardaki polipropilen lifler (6, 12 ve 18 mm) karışım hacminin %0.3, %0.6 ve %0.9 oranlarında harç karışımlarına ilave edilmiştir. Tüm karışımlarda, karşılaştırılabilirliği sağlamak amacıyla toplam bağlayıcı miktarı, agrega/bağlayıcı oranı (3.0) ve su/bağlayıcı oranı (0.35) sabit olarak tutulmuştur. Karışım isimlendirmesindeki; “C”, lif içermeyen kontrol karışımını ifade etmektedir. P ile başlayan karışımlardaki ilk sayı lif uzunluklarını (6, 12 ve 18 mm) ifade ederken, “-”sonrasındaki; 3, 6 ve 9 sayıları lif oranlarına karşılık gelmektedir. Buna göre, P6-3 adlı harç serisi; 6 mm uzunluğunda ve karışım hacminin %0.3 oranında polipropilen lifin kullanıldığı harç serisini ifade etmektedir. Harç serilerinin isimlendirmesi ve detayları Tablo 3.3’te, serilere ait karışım oranları ise Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.3. Harç Serilerinde Kullanılan Lif Uzunlukları ve Oranları

Seri nu.	Seri adı	Lif uzunluğu (mm)	Lif hacmi (%)
1	C	----	---
2	P6-3	6	0.3
3	P6-6	6	0.6
4	P6-9	6	0.9
5	P12-3	12	0.3
6	P12-6	12	0.6
7	P12-9	12	0.9
8	P18-3	18	0.3
9	P18-6	18	0.6
10	P18-9	18	0.9

Yüksek dayanımlı harçların karıştırma işlemi aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada kuru malzemeler (kum, çimento ve SD) karıştırma kabına alınmış ve 2 dakika süreyle düşük hızda (62.5 rpm) karıştırılmıştır. Daha sonra karışım suyunun yarısı, karıştırma devam ederken 30 saniye içerisinde ilave edilmiştir. Bunu takiben, kalan su SP ile karışıma eklenmiş ve karışım 30 saniye daha düşük hızda karıştırılmıştır. Ardından polipropilen lifler ilave edilmiş ve karıştırıcı düşük hızda (62.5 rpm) 60 saniye daha çalıştırılmıştır. Sonrasında karıştırıcı yüksek hıza (125 rpm) alınarak karışım 60 saniye boyunca karıştırılmıştır. Bu aşamanın ardından karıştırma işlemi durdurulmuş, kabın kenarlarına ve tabanına yapışan malzemeler 15 saniye süreyle spatula yardımıyla merkeze toplanmıştır. Son olarak karışım, yüksek hızda (125 rpm) 60 saniye daha karıştırılarak homojen bir yapı elde edilmiş ve karıştırma işlemi tamamlanmıştır. Üretim sürecine ilişkin görseller Şekil 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Mikser ve Polipropilen Liflerin Karışıma Dahil Edilmesi

Tablo 3.4. Yüksek Dayanımlı Harç Serilerinin Karışım Miktarları (kg/m³)

Seri nu	Seri adı	Çimento	Kum	SD	Su	Polipropilen lif	SP
1	C	500	1650	50	192.8	-----	6.6
2	P6-3	500	1643	50	192.8	2.7	6.6
3	P6-6	500	1636	50	192.8	5.4	6.6
4	P6-9	500	1629	50	192.8	8.1	6.6
5	P12-3	500	1643	50	192.8	2.7	6.6
6	P12-6	500	1636	50	192.8	5.4	6.6
7	P12-9	500	1629	50	192.8	8.1	6.6
8	P18-3	500	1643	50	192.8	2.7	6.6
9	P18-6	500	1636	50	192.8	5.4	6.6
10	P18-9	500	1629	50	192.8	8.1	6.6

3.4. Numune Üretimi ve Kürleme

Hazırlanan taze harçlar, 40 mm × 40 mm × 160 mm prizmatik çelik kalıplara iki aşamada, sarsma tablası kullanılarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.5). Numunelerin nem kaybını önlemek amacıyla kalıpların üstü plastik örtü ile kapatılarak (20 °C sıcaklık ve %50 bağıl nem koşullarında) 24 saat ön küremeye tabi tutulmuş, ardından kalıptan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler, 20 ± 2 °C sıcaklıktaki kirece doymun su içerisinde 7 ve 28 gün süreyle

standart kür koşullarında bekletilmiştir (Şekil 3.6). Çalışma kapsamında toplam 180 adet prizmatik numune üretilmiştir. Üretilen numunelere ait görüntüler Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.5. Kalıplara Yerleştirilmiş Numuneler



Şekil 3.6. Kürleme İşlemi



Şekil 3.7. Üretilen Numunelere Ait Görünümler

3.5. Taze Harç Deneyleri

3.5.1. İşlenebilirlik (yayılma tablası deneyi)

Taze harç karışımlarının işlenebilirliği, TS EN 1015-3/A2 (2006) standardı esas alınarak belirlenmiştir. Yayılma çapı, üç tekrarlı ölçümün ortalaması alınarak ve çapta belirgin bir değişim gözlenmediği anda ölçülmüştür (Şekil 3.8).

Deneyde 60 mm yüksekliğinde, 100 mm taban iç çapına ve 70 mm üst iç çapına sahip pirinçten imal edilmiş kesik koni biçimindeki kalıp, yayılma tablası ve standart tokmak kullanılmıştır. Deney öncesinde yayılma tablası ve kalıbın temas yüzeyleri temizlenerek, yağlanmış ve deney için hazır hale getirilmiştir. Kesik koni biçimindeki kalıp yayılma tablasının merkezine yerleştirilmiş ve taze harç kalıba yaklaşık eşit iki tabaka halinde doldurulmuştur. Birinci tabaka, harcın kalıp içerisinde homojen şekilde yerleşmesini sağlamak amacıyla standart tokmak kullanılarak en az 10 kısa darbe ile sıkıştırılmıştır.

Ardından ikinci tabaka yerleştirilmiş ve aynı işlem tekrarlanmıştır. Kalıp seviyesini aşan fazla harç spatula yardımıyla sıyrılarak yüzey düzeltilmiş ve tabla üzerinde kalan harç kalıntıları temizlenmiştir. Yaklaşık 15 s bekleme süresinin ardından kalıp düşey doğrultuda yavaşça kaldırılmıştır. Daha sonra yayılma tablası yaklaşık saniyede bir düşüş olacak şekilde toplam 15 kez düşürülerek harcın tabla üzerinde yayılması sağlanmıştır. Yayılma işleminin tamamlanmasının ardından harç kütesinin çapı birbirine dik iki doğrultuda ölçülmüş ve elde edilen iki değer aritmetik ortalaması alınarak yayılma değeri milimetre cinsinden belirlenmiştir.



Şekil 3.8. Yayılma Tablası Deneyi

3.6. Sertleşmiş Harç Deneyleri

3.6.1. Ultrases geçiş hızı

Sertleşmiş harç numuneleri üzerinde TS EN 12504-4 (2021) standardına göre ultrases geçiş hızı (UPV) deneyi yapılmıştır. UPV testleri 7 ve 28 günlük kür sürelerinin sonunda uygulanmıştır. UPV ölçümleri, 0.1-1999.9 μ s aralığında geçiş süresi ölçebilen ve 0.1 μ s çözünürlüğe sahip mikroişlemci kontrollü bir cihaz (UTC-3034) kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.9). Elde edilen UPV değerleri, malzemenin iç yapısal kalitesi açısından değerlendirilmiştir. Buna göre, 3600–4500 m/s aralığındaki hız değerleri genellikle iyi kaliteye sahip beton veya harç yapısını işaret ederken, 4500 m/s'nin üzerindeki değerler

daha yoğun ve dayanıklı bir matris yapısına karşılık gelmektedir (Manjunath vd., 2023; Şenol ve Çalışkan, 2025).

Her karışım serisi için, en az üç numune üzerinde UPV ölçümleri yapılmıştır ve bu ölçümlerin ortalaması alınmıştır. UPV, Denklem 3.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$V = \frac{L}{T} \quad (3.1)$$

Burada V, ultra ses geçiş hızı (m/s), L, dönüştürücüler arasındaki iletim mesafesi (m) ve T, ölçülen darbe geçiş süresidir (s).



Şekil 3.9. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

3.6.2. Eğilme dayanımı deneyi

Sertleşmiş harç numuneleri üzerinde TS EN 1015-11 (2019) standardına göre 7 ve 28 günlük kür süreleri sonunda 40 x 40 x 160 mm boyutlarına sahip prizmatik numunelere eğilme dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.10). Eğilme dayanımı deneyleri 0.05 kN/s yükleme hızında, $\pm 5\%$ doğrulukla yük kontrolü yapabilen dijital bir test makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Her bir deney serisi için elde edilen sonuçlar, en az üç adet numuneden alınan değerlerin ortalaması olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.10. Eğilme Dayanımı Deneyi

7 ve 28 Günlük kür süresini tamamlayan $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarındaki prizmatik harç numuneleri, deney öncesinde yüzeylerindeki çapak ve düzensizliklerden arındırılmıştır. Eğilme dayanımının belirlenmesi amacıyla numuneler, aralarındaki açıklık 100 mm olan iki alt mesnet üzerine, yükleme başlığı mesnet açıklığının orta noktasına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Üç noktalı eğilme deneyi sırasında yük, 0.05 kN/s sabit yükleme hızıyla numune kırılıncaya kadar uygulanmıştır. Yükleme sonucunda numunenin çekme bölgesinde çatlaklar meydana gelmiş ve kırılma genel olarak orta kesite yakın bölgede gerçekleşmiştir. Deney sırasında kaydedilen maksimum kırılma yükü kullanılarak eğilme dayanımı Denklem 3.2 yardımıyla hesaplanmıştır.

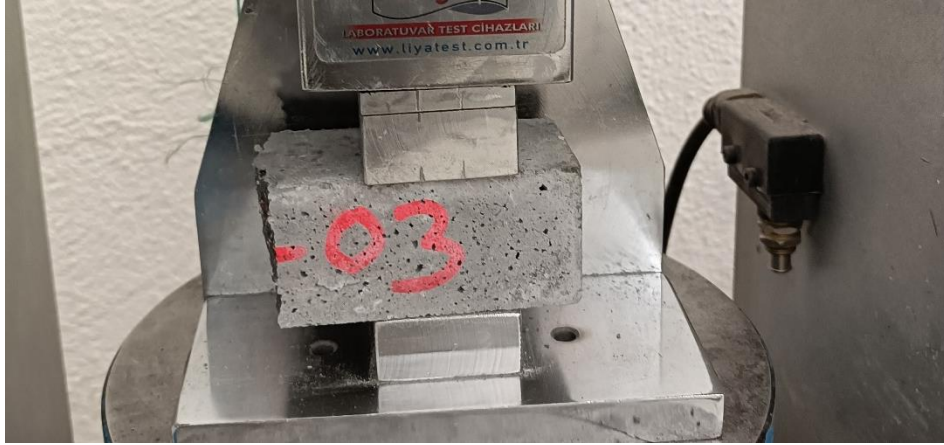
$$f = \frac{3FL}{2bd^2} \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte; f : Eğilme dayanımı (N/mm² veya MPa), F : Kırılma anındaki maksimum yük (N), L : Mesnet açıklığı (mm) (100 mm), b : Numunenin kare kesitinin uzunluğunu (mm) ifade etmektedir.

3.6.3. Basınç dayanımı deneyi

Sertleşmiş harç numunelerinin basınç dayanımları, 7 ve 28 günlük kür sürelerinin sonunda TS EN 1015-11 (2019) standardına göre belirlenmiştir. Her bir deney serisi için $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarında üç adet prizmatik numuneye öncelikle eğilme dayanımı deneyi uygulanmış ve kırılma sonucunda elde edilen toplam altı adet yarım prizma basınç dayanımı deneyinde kullanılmıştır (Şekil 3.11). Yarım prizmalar, 40×40 mm boyutlarında yükleme alanı oluşturacak şekilde basınç dayanımı test cihazına yerleştirilmiştir. Basınç yükü, dijital kontrollü test cihazı kullanılarak numune kırılıncaya kadar 2.4 kN/s sabit yükleme hızında uygulanmış ve kırılma anındaki maksimum yük kaydedilmiştir. Her bir karışım için basınç

dayanımı, altı yarım prizmadan elde edilen deney sonuçlarının aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 3.11. Basınç Dayanımı Deneyi

3.6.4. Görünür porozite ve su emme deneyleri

440 × 40 × 160 mm boyutlarındaki prizmatik harç numunelerine, 28 günlük kür süresinin tamamlanmasının ardından görünür porozite ve su emme deneyleri uygulanmıştır (Şekil 3.12). Numunelerin görünür porozite (P) ve su emme (WA) değerleri, Arşimet prensibi esas alınarak gerçekleştirilen kütle ölçümleri yardımıyla belirlenmiştir. Bu kapsamda numunelerin kuru, suya doymun yüzey kuru ve su içerisindeki askıdaki kütleleri ölçülmüş; elde edilen değerler kullanılarak görünür porozite ve su emme oranları sırasıyla Denklem 3.3 ve Denklem 3.4 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$P (\%) = \frac{(w_1 - w_0)}{(w_1 - w_2)} \times 100 \quad (3.3)$$

$$WA (\%) = \frac{(w_1 - w_0)}{w_0} \times 100 \quad (3.4)$$

Denklemden,

w_0 : 105 °C'de 24 saat etüvde kurutulan numunenin kuru ağırlığını, w_1 : Suya doymun yüzey kuru durumdaki ağırlığını (Kuru ağırlık sonrası 48 saat su içinde değişmez ağırlığa gelinceye kadar bekletilen numune), w_2 : Numunenin su içerisinde iken Arşimet terazisi ile ölçülen ağırlığını temsil etmektedir.



Şekil 3.12. Görünür Porozite ve Su Emme Deneyi

3.6.5. Yüksek sıcaklık deneyleri

Çimento esaslı kompozit malzemeler, yangın ve yüksek sıcaklık etkisi oluşturan çeşitli çevresel koşullara maruz kaldıklarında fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinde önemli değişimler meydana gelmektedir. Yüksek sıcaklık etkisi altında malzeme bünyesinde bulunan serbest ve kapiler suyun uzaklaşması, hidrasyon ürünlerinin bozulması, mikro çatlak oluşumları ve boşluk yapısındaki değişimler malzemenin performansını önemli ölçüde etkilemektedir.

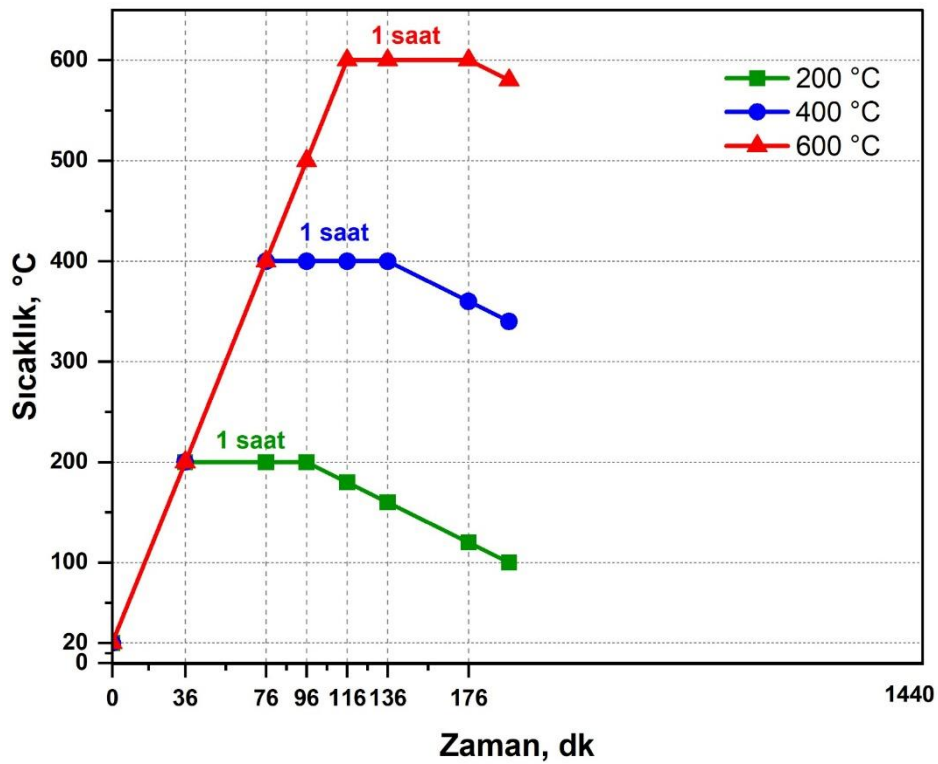
Bu çalışma kapsamında polipropilen lif katkılı harç numunelerinin yüksek sıcaklık performanslarının belirlenmesi amacıyla numuneler 200 °C, 400 °C ve 600 °C olmak üzere üç farklı sıcaklık seviyesine maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık deneylerinde uygulanan sıcaklık-zaman eğrisi Şekil 3.13'te verilmiştir. Numuneler, kontrollü bir elektrikli fırında yaklaşık 5 °C/dk'lık bir ısıtma hızıyla 200 °C, 400 °C ve 600 °C sıcaklıklara ısıtılmış, hedef sıcaklıklarda 60 dakika süreyle tutulmuş ve daha sonra fırın içinde doğal olarak soğumaya bırakılmıştır (Şekil 3.14). Bu bekleme süresi, sıcaklığın numune kesiti boyunca homojen şekilde yayılmasını sağlamak ve yüksek sıcaklığın malzeme bünyesinde oluşturduğu etkilerin tam olarak gelişmesine olanak tanımak amacıyla uygulanmıştır. Bekleme süresinin

tamamlanmasının ardından kütle kaybı ölçümü, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır.

Prizmatik numunelerin (40 x 40 x 160 mm) yüksek sıcaklık sonrası kütle kayıplarını belirlemek amacıyla, ısıtılma işlemi tabi tutulmadan önceki ve sonraki ağırlıkları ölçülmüş, elde edilen değerler üzerinden kütle kayıp oranı (M) Denklem 3.5 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$M = \left(\frac{m_0 - m_1}{m_0} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

Burada, m_1 : yüksek sıcaklık uygulaması sonrasındaki numune ağırlığını, m_0 : 20 °C'deki başlangıç numune ağırlığını temsil etmektedir.



Şekil 3.13. Yüksek Sıcaklık Deneylerinde Uygulanan Sıcaklık-Zaman Eğrisi



Şekil 3.14. Harç Numunelerine Yüksek Sıcaklık Uygulaması

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. İşlenebilirlik

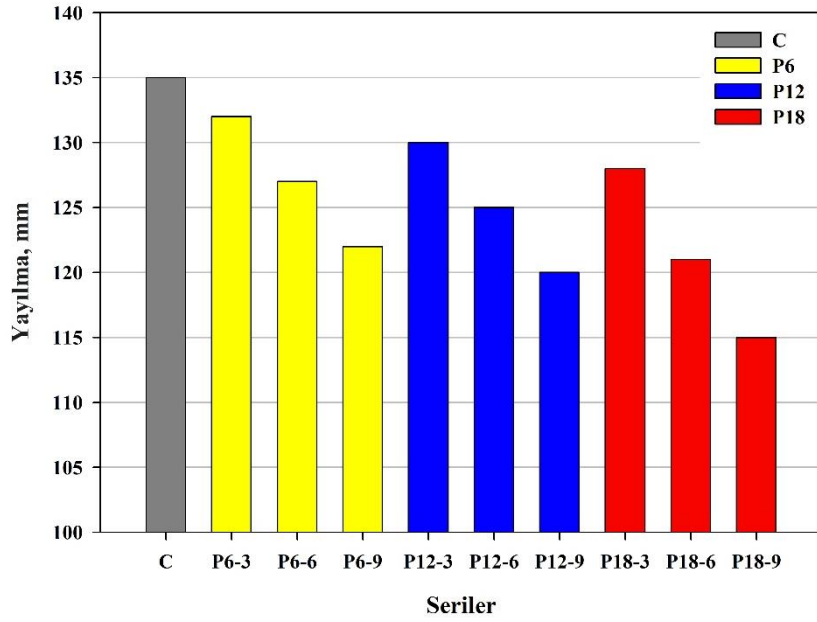
Taze harç özelliklerinin değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen yayılma tablası deneyinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.1’de verilmiştir. Serilerin yayılma çapları 115-135 mm aralığında değişmektedir.

Propilen lif katkılı harç numunelerine ait yayılma tablası sonuçları incelendiğinde, lifsiz kontrol numunesinin en yüksek yayılma değerine sahip olduğu görülmektedir. Kontrol numunesinde yayılma çapı 135 mm olarak ölçülmüştür. Polipropilen lif ilavesiyle birlikte tüm serilerde yayılma değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu durum, liflerin harç karışımı içerisinde hareketi zorlaştırması, iç sürtünmeyi artırması ve karışımın akıcılığını azaltması ile açıklanabilir.

Kontrol numunesine göre yayılma değerlerinde meydana gelen azalma hem lif uzunluğunun hem de lif oranının artmasıyla belirginleşmiştir. 6 mm uzunluktaki lifli serilerde %0.3, %0.6 ve %0.9 lif oranları için azalma oranları sırasıyla %2, %6 ve %10 iken, 12 mm lifli seride %4, %7.4, %11.1 ve 18 mm lifli seride ise %5.2, %10.4 ve %14.8 olarak belirlenmiştir. Bu durum, liflerin karışım içerisindeki iç sürtünmeyi artırarak harcın akıcılığını azalttığını göstermektedir.

Lif uzunluğu dikkate alındığında, 6 mm, 12 mm ve 18 mm uzunluğundaki liflerin kullanıldığı serilerde yayılma değerlerinin lif uzunluğu ve lif hacmi arttıkça kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Aynı hacim oranlarında polipropilen lif kullanıldığından lif uzunluğu arttıkça yayılma çaplarının azaldığı belirlenmiştir. Örneğin %0.3 oranındaki P6-3 numunesinde yayılma değeri 132 mm iken, P12-3 numunesinde 130 mm’ye, P18-3 numunesinde ise 128 mm’ye düşmüştür. Benzer eğilim %0.6 ve %0.9 hacim oranlarında da gözlenmiştir.

Lif hacim oranının etkisi incelendiğinde, her lif uzunluğu için lif hacim oranındaki artışın yayılma çapını azalttığı belirlenmiştir. P6 serisinde yayılma değeri 132 mm’den 122 mm’ye, P12 serisinde 130 mm’den 120 mm’ye, P18 serisinde ise 128 mm’den 115 mm’ye düşmüştür. En düşük yayılma değeri 18 mm lif uzunluğu ve %0.9 hacim oranına sahip P18-9 numunesinde 115 mm olarak elde edilmiştir.



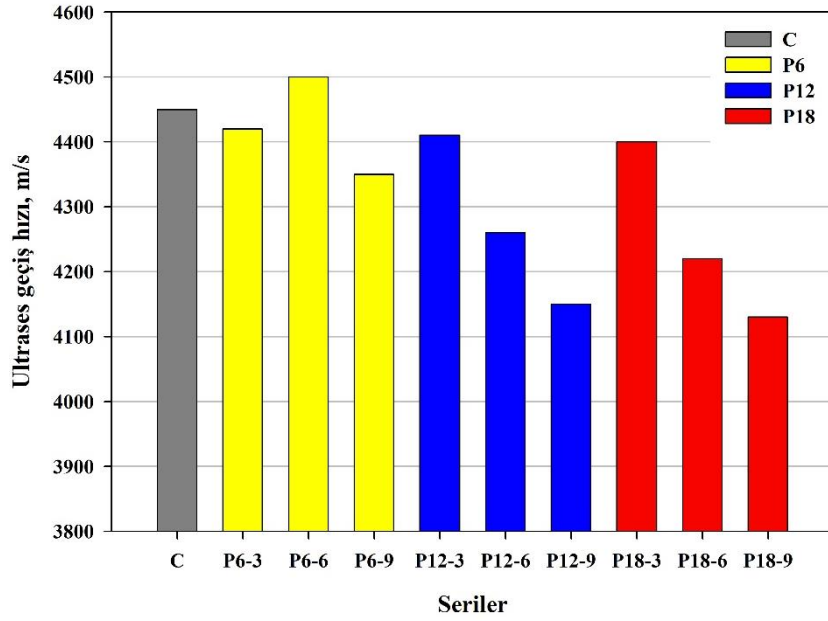
Şekil 4.1. Lif Uzunluğu ve Lif Hacim Oranının Yayılma Çapına Etkisi

Yayılma çaplarının ölçümünden elde edilen sonuçlar, polipropilen lif kullanımının harcın işlenebilirliğini azalttığını göstermektedir. Özellikle uzun liflerin ve yüksek hacim oranlarının birlikte kullanılması lif-lif etkileşiminin artmasına neden olmuştur. Buna bağlı olarak karışımın akıcılığı azalmış ve yayılma çapı düşmüştür. Kontrol numunesine göre en yüksek azalma P18-9 numunesinde %14.8 olarak ölçülmüştür.

Genel olarak değerlendirildiğinde, polipropilen lif uzunluğu ve hacim oranındaki artışın harc numunelerinin işlenebilirliği üzerinde olumsuz etki oluşturduğu belirlenmiştir (Karahana ve Atış, 2011; Açıkgenc vd., 2012).

4.2. Ultrases Geçiş Hızı

Farklı lif uzunluğu ve lif oranlarına sahip harc numunelerinin ultrases geçiş hızı (UPV) değerleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir. UPV, malzemenin iç yapısının sürekliliği, yoğunluğu ve boşluk yapısı hakkında bilgi veren tahribatsız bir deney yöntemidir. Genel olarak yüksek UPV değeri: daha yoğun ve daha homojen iç yapı, düşük UPV değeri de daha fazla boşluk, mikroçatlak veya heterojenlik şeklinde yorumlanır (Şenol ve Çalışkan, 2026b).



Şekil 4.2. Harç Serilerinin Ultrases Geçiş Hızı Ölçüm Sonuçları (28 günlük kür)

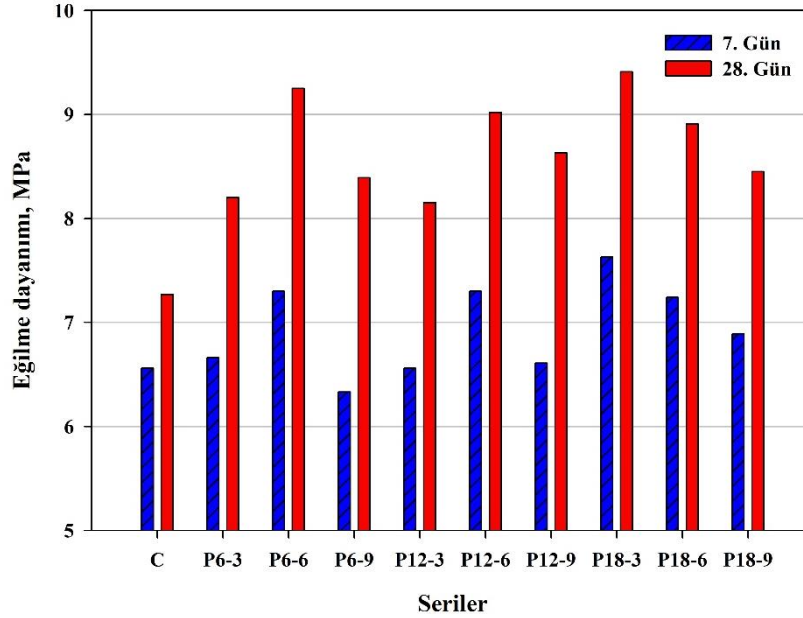
Yüksek dayanımlı harç serilerinin 28 günlük sonrasındaki ultrases geçiş hızı ölçüm sonuçları incelendiğinde, polipropilen lif ilavesinin harçların iç yapı özellikleri üzerinde önemli etkiler oluşturduğu görülmektedir. Kontrol numunesinde 4450 m/s olarak ölçülen ultrases geçiş hızı, lif uzunluğu ve lif oranına bağlı olarak değişim göstermiştir. 6 mm lif uzunluğuna sahip seride, %0.3 lif oranında UPV değeri 4420 m/s olarak belirlenirken, %0.6 lif oranında 4500 m/s ile tüm numuneler içerisinde en yüksek değere ulaşılmıştır. Ancak lif oranının %0.9'a yükseltilmesiyle UPV değeri 4350 m/s'ye düşmüştür. 12 mm ve 18 mm lif uzunluğuna sahip serilerde ise lif oranındaki artışla birlikte ultrases geçiş hızlarında genellikle bir azalma meydana gelmiştir. 12 mm lifli seride UPV değeri 4410 m/s'den 4150 m/s'ye, 18 mm lifli seride ise 4400 m/s'den 4130 m/s'ye gerilemiştir.

Elde edilen sonuçlar, düşük ve orta seviyedeki kısa lif kullanımının harç içerisinde daha homojen bir yapı oluşumuna katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Buna karşılık lif uzunluğu ve lif oranındaki artış, işlenebilirliğin azalmasına bağlı olarak karışım içerisinde boşluk oluşumunu artırmış ve ultrases dalgalarının yayılımını olumsuz etkilemiş olabilir.

En düşük UPV değerlerinin P12-9 ve P18-9 numunelerinde elde edilmesi, yüksek lif oranları ile uzun lif kullanımının harç iç yapısında heterojenliği artırabileceğini göstermektedir (Liu vd., 2026).

4.3. Eğilme Dayanımı

Polipropilen lif katkılı harç numunelerinin 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. 7 ve 28 Günlük Kürlenme Sürelerinde Harç Serilerinin Eğilme Dayanımları

Şekil 4.3 incelendiğinde, polipropilen lif katkısının genel olarak harç numunelerinin eğilme dayanımını artırdığı görülmektedir. Kontrol numunesinin 7 günlük eğilme dayanımı 6.6 MPa, 28 günlük eğilme dayanımı ise 7.3 MPa'dır. Lifli numunelerde ise hem 7 günlük hem de 28 günlük dayanımların genellikle kontrol numunesinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, polipropilen liflerin harç matrisi içerisinde çatlak ilerlemesini sınırlandırması, mikro çatlakların birleşmesini geciktirmesi ve yük aktarımına katkı sağlaması ile açıklanabilir (Bahadır, 2010; Topçu vd., 2017).

7 günlük sonuçlar incelendiğinde en yüksek eğilme dayanımı P18-3 numunesinde 7.6 MPa olarak elde edilmiştir. Bunu P6-6 ve P12-6 numuneleri 7.3 MPa değerleriyle takip etmektedir. 6 mm lifli seride, lif oranının %0.3'ten %0.6'ya çıkarılması eğilme dayanımını artırmış, ancak %0.9 lif oranında dayanım azalmıştır. Bu durum, 6 mm liflerde orta seviyedeki hacim oranının daha etkili olduğunu göstermektedir. 12 mm lifli seride de benzer şekilde en yüksek değer %0.6 lif oranında elde edilmiştir. P12-6 numunesi, P12-3 ve P12-9 numunelerine göre daha yüksek eğilme dayanımı göstermiştir. 18 mm lifli seride ise en yüksek 7 günlük eğilme dayanımı %0.3 lif oranında elde edilmiştir. Lif oranının %0.6 ve %0.9'a yükselmesiyle dayanımda azalma meydana gelmiştir. Bu durum, uzun liflerin yüksek

oranlarda kullanılması halinde karışım içerisinde homojen dağılmasının zorlaştığını ve işlenebilirlik kaybının dayanım gelişimini sınırladığını göstermektedir.

28 günlük sonuçlar değerlendirildiğinde, lif katkısı etkisinin daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Kontrol numunesi 7.3 MPa değerine sahipken, lifli numunelerde eğilme dayanımı genel olarak 8.2 – 9.4 MPa aralığında değişmiştir. En yüksek 28 günlük eğilme dayanımı P18-3 numunesinde 9.4 MPa olarak elde edilmiştir. Bu numuneyi 9.3 MPa ile P6-6, 9.0 MPa ile P12-6 ve 8.9 MPa ile P18-6 numuneleri takip etmektedir.

Lif uzunluğu açısından değerlendirildiğinde, kısa ve orta uzunluktaki liflerde optimum hacim oranı %0.6 seviyesinde görülmektedir. 6 mm ve 12 mm liflerde %0.6 oranı, hem 7 günlük hem de 28 günlük eğilme dayanımı bakımından öne çıkmıştır. 18 mm liflerde ise %0.3 oranı en etkili sonuçları vermiştir. Daha uzun liflerin çatlak köprüleme kapasitesi yüksek olsa da oran arttığında işlenebilirliği önemli ölçüde azaltmakta ve karışım içinde homojen dağılımı zorlaştırmaktadır. Bu nedenle 18 mm liflerde yüksek oranlar beklenen dayanım artışını sağlamamıştır.

Bu sonuçlar, eğilme dayanımı açısından optimum lif oranının lif uzunluğuna bağlı olarak değiştiğini göstermektedir. Lif uzunluğu arttıkça yüksek hacim oranlarında işlenebilirlik azalmakta, liflerin homojen dağılımı zorlaşmakta ve bu durum dayanım gelişimini sınırlayabilmektedir. Özellikle P18-9 numunesinde düşük yayılma ve düşük UPV değerleri, yüksek lif oranı ve uzun lif kullanımının iç yapı üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceğini göstermektedir. Buna karşın, lifli numunelerin kontrol numunesine göre daha yüksek eğilme dayanımı göstermesi polipropilen liflerin eğilme davranışı üzerinde olumlu etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

Eğilme deneyi öncesi ve sonrası harç numunelerinin genel görünüşleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Eğilme deneyi sonrasında tüm numunelerde yükleme noktasına yakın bölgelerde baskın bir kırılma çatlaklarının oluştuğu görülmektedir. Kontrol numunesinde kırılmanın daha ani gerçekleştiği ve numunenin iki ayrı parçaya tamamen ayrıldığı dikkat çekmektedir.

Polipropilen lif içeren numunelerde ise kırılma davranışının kontrol numunesine kıyasla daha kontrollü bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir. Liflerin matris içerisinde oluşturduğu çatlak köprüleme mekanizması sayesinde çatlak ilerlemesi geciktirilmiş ve kırılma enerjisinin daha geniş bir bölgeye dağıtılması sağlanmıştır. Özellikle düşük ve orta lif oranına sahip numunelerde kırılma yüzeylerinin daha düzenli olduğu ve çatlakların tek bir baskın bölgede yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, lif uzunluğu ve lif hacim

oranının birlikte artması durumunda numune yüzeylerinde boşluk miktarının arttığı ve kırılma bölgelerinde daha düzensiz bir yapı oluştuğu görülmektedir (Şekil 4.4).

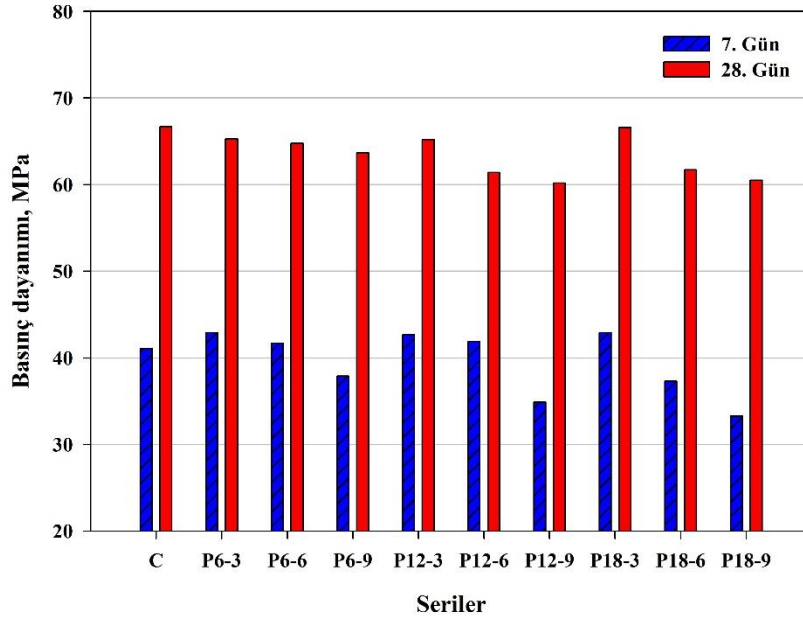
Seriler	Eğilme Deneyi Öncesi Numune	Eğilme Deneyi Sonrası Numune
C		
P6-3		
P6-6		
P6-9		
P12-3		
P12-6		
P12-9		
P18-3		
P18-6		
P18-9		

Şekil 4.4. Polipropilen Lif Katkılı Harç Numunelerinin Eğilme Dayanımı Deneyi Öncesi ve Sonrası Genel Görünümleri

Genel olarak değerlendirildiğinde, polipropilen lif ilavesinin harçların eğilme davranışı üzerinde olumlu etkiler oluşturduğu, kırılmanın ani ve gevrek karakterini azaltarak daha kontrollü bir hasar mekanizmasının gelişmesine katkı sağladığı söylenebilir.

4.3. Basınç Dayanımı

Polipropilen lif katkılı harç numunelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. 7 ve 28 Günlük Kürlenme Sürelerinde Serilerin Basınç Dayanımı Değerleri

Polipropilen lif katkılı harç numunelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, lif ilavesinin basınç dayanımı üzerindeki etkisinin lif uzunluğu ve lif oranına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Kontrol numunesinde 7 ve 28 günlük basınç dayanımları 41 MPa ve 66.5 MPa olarak belirlenmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, düşük lif oranlarında basınç dayanımının kontrol numunesine yakın veya bazı durumlarda daha yüksek olduğu, lif oranının artmasıyla birlikte ise azalma eğilimi gösterdiği görülmektedir.

7 günlük sonuçlar incelendiğinde en yüksek dayanım değerleri 43 MPa ile P6-3, P12-3 ve P18-3 numunelerinde elde edilmiştir. Buna karşılık lif oranının %0.9'a yükseltilmesiyle dayanım değerlerinde belirgin düşüşler meydana gelmiştir. Özellikle P12-9 ve P18-9 numunelerinde sırasıyla 35 MPa ve 33 MPa seviyelerine kadar gerilemiştir. Bu da kontrol numunesine kıyasla %15 ve %19 oranında azalışa denk gelmektedir. Bu durum, erken yaşlarda lif miktarındaki artışın çimento hamurunun sürekliliğini kısmen bozması ve karışım

içerisinde ilave boşluk oluşumuna neden olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca liflerin kapladığı hacim arttıkça matrisin yük taşıyan etkin kesit alanı azalmakta ve bu durum basınç dayanımını olumsuz etkileyebilmektedir.

28 günlük sonuçlarda da benzer eğilim görülmüştür. En yüksek basınç dayanımı 66.7 MPa ile kontrol numunesi ve P18-3 numunesinde elde edilmiştir. Buna karşılık lif oranının artmasıyla birlikte dayanım değerleri düşmüştür. P6 serisinde 63.8 – 65.3 MPa aralığında, P12 serisinde 60.2 – 65.2 MPa aralığında, P18 serisinde ise 60.5 – 66.6 MPa aralığında değişmektedir. Bu sonuçlar, yüksek lif oranlarının uzun dönemde basınç dayanımını artırmadığını, belirli bir seviyeden sonra dayanım kaybına neden olduğunu göstermektedir.

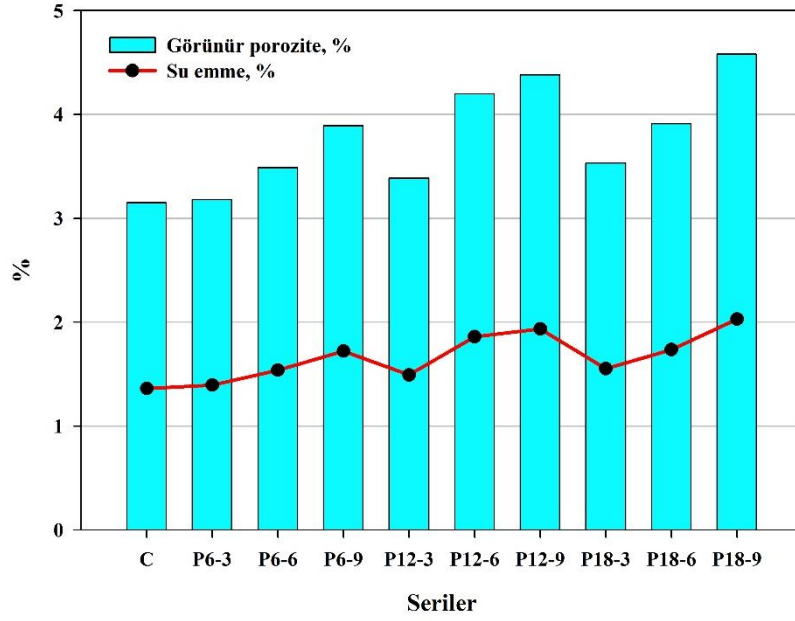
Basınç dayanımı açısından lif uzunluğunun etkisi lif oranı kadar belirgin değildir. Ancak aynı lif oranları karşılaştırıldığında; %0.3 lif oranında P6-3, P12-3 ve P18-3 serilerinin basınç dayanımları sırasıyla 65.3 MPa, 65.2 MPa ve 66.5 MPa olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, düşük lif oranlarında uzun liflerin çatlakların ilerlemesini sınırlandırarak basınç altında oluşan mikro hasarların gelişimini geciktirebildiğini göstermektedir. Ancak lif oranı arttıkça bu olumlu etki kaybolmaktadır. Özellikle %0.9 lif oranında tüm serilerde önemli dayanım kayıpları görülmektedir. Bunun temel nedeni, uzun liflerin yüksek oranlarda kullanılması durumunda homojen dağılımın zorlaşması ve lif kümelerinin oluşabilmesidir.

4.4. Porozite ve Su Emme

Polipropilen lif uzunluğu ve lif hacminin harç serilerinin 28 günlük kür sonrasındaki görünür porozite ve su emme ölçümleri Şekil 4.6’da verilmiştir.

Şekil 4.6. incelendiğinde, polipropilen lif katkılı harç numunelerinde lif uzunluğu ve lif hacim oranındaki artışa bağlı olarak görünür porozite ve su emme değerlerinin genel olarak arttığı görülmektedir. Kontrol numunesinde görünür porozite değeri %3.15, su emme oranı ise %1.36 olarak belirlenmiştir. Polipropilen lif ilavesiyle birlikte bu değerler özellikle yüksek lif oranlarında belirgin şekilde yükselmiştir.

6 mm uzunluğunda lif içeren seride, lif hacim oranının artmasıyla görünür porozite değeri %3.18’den %3.89’a, su emme oranı ise %1.40’tan %1.73’e yükselmiştir. Benzer şekilde 12 mm lifli seride görünür porozite değeri %3.38’ten %4.38’e, su emme oranı ise %1.49’dan %1.94’e çıkmıştır. 18 mm lifli seride ise en belirgin artış gözlenmiştir; görünür porozite değeri %3.53’ten %4.58’e, su emme oranı ise %1.55’ten %2.03’e yükselmiştir.



Şekil 4.6. Serilerin 28 Günlük Görünür Porozite ve Su Emme Kapasitesi

Aynı lif oranları karşılaştırıldığında, lif uzunluğunun artmasıyla hem görünür porozite hem de su emme oranının arttığı görülmektedir. Bu durum, uzun liflerin harç karışımı içerisinde homojen dağılmasının daha zor olması ve karışımın yerleşebilirliğini olumsuz etkilemesiyle açıklanabilir. Özellikle yüksek lif oranlarında lifler arası etkileşimin artması, karışım içinde boşluk oluşumunu artırmış olabilir.

Porozite ve su emme oranı yüksek olan numunelerde ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı değerlerinin genel olarak daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, boşluk oranındaki artışın malzemenin iç yapısını zayıflattığını ve ses dalgalarının geçişini zorlaştırdığını göstermektedir.

Sonuç olarak, polipropilen liflerin harçların eğilme davranışına olumlu katkı sağlamasına karşın, lif uzunluğu ve hacim oranının artmasıyla işlenebilirlik azalmış, buna bağlı olarak görünür porozite ve su emme oranları yükselmiştir.

Tablo 4.1'de polipropilen lif katkılı harç numunelerinin kontrol numunesine göre yayılma, ultrases geçiş hızı (UPV), 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları, görünür porozite ve su emme değerlerindeki yüzdesel değişimler verilmiştir. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, lif uzunluğu ve lif hacim oranındaki artışın harçların performansı üzerinde hem olumlu hem de olumsuz etkiler oluşturduğu görülmektedir.

İşlenebilirliği temsil eden yayılma değerleri tüm lifli serilerde kontrol numunesine göre azalmış olup, bu azalış özellikle lif uzunluğu ve lif hacim oranının birlikte arttığı

numunelerde daha belirgin hale gelmiştir. Benzer şekilde, UPV değerlerinde de genel olarak düşüş meydana gelmiş, yalnızca P6-6 numunesinde kontrol numunesine kıyasla sınırlı bir artış gözlenmiştir. Bu durum, düşük lif uzunluğu ve uygun lif oranının daha homojen bir iç yapı oluşumuna katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde, tüm lif katkılı serilerin kontrol numunesine göre daha yüksek dayanım değerlerine ulaştığı görülmektedir. Bu artış, polipropilen liflerin çatlak köprüleme etkisi sayesinde yük altında çatlak ilerlemesini geciktirmesiyle açıklanabilir. Buna karşılık, 28 günlük basınç dayanımında genel olarak azalma eğilimi görülmüş ve özellikle yüksek lif oranına sahip numunelerde bu azalış daha belirgin hale gelmiştir. Bu durum, lif ilavesiyle birlikte işlenebilirliğin azalması sonucu oluşan boşluk yapısının basınç dayanımını olumsuz etkilediğini göstermektedir.

Fiziksel özellikler açısından değerlendirildiğinde, görünür porozite ve su emme değerleri tüm lifli serilerde kontrol numunesine göre artış göstermiştir. Özellikle yüksek lif oranı ve uzun lif kullanılan P18-9 numunesinde görünür porozite ve su emme oranlarındaki artışın en yüksek seviyeye ulaştığı görülmektedir. Bu sonuçlar, lif ilavesinin belirli bir seviyenin üzerine çıkması durumunda karışımın yerleşe bilirliliğini olumsuz etkileyerek daha boşluklu bir iç yapı oluşturduğunu göstermektedir.

Tablo 4.1. Harç Numunelerinin Kontrol Numunesine Göre Performans Değişim Oranları (%)

Numune	Yayılma	UPV	28 gün eğilme dayanımı	28 gün basınç dayanımı	Görünür porozite	Su emme
P6-3	-2.2	-0.7	+12.8	-2.1	+1.0	+2.9
P6-6	-5.9	+1.1	+27.2	-2.8	+10.8	+13.2
P6-9	-9.6	-2.2	+15.4	-4.5	+23.5	+26.5
P12-3	-3.7	-0.9	+12.1	-2.2	+7.3	+9.6
P12-6	-7.4	-4.3	+24.1	-7.9	+33.3	+36.8
P12-9	-11.1	-6.7	+18.7	-9.7	+39.0	+42.7
P18-3	-5.2	-1.1	+29.4	0.1	+12.1	+14.0
P18-6	-10.4	-5.2	+22.6	-7.5	+24.1	+27.9
P18-9	-14.8	-7.2	+16.2	-9.3	+45.4	+49.3

Yüzdesel değişim oranları kontrol numunesi (C) referans alınarak hesaplanmıştır. Pozitif (+) değerler ilgili parametredeki artışı, negatif (-) değerler ise azalışı göstermektedir.

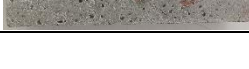
Genel olarak değerlendirildiğinde, düşük ve orta seviyedeki lif hacim oranlarının eğilme dayanımını artırırken diğer performans kriterlerinde kabul edilebilir düzeyde değişimler oluşturduğu, buna karşılık yüksek lif oranlarının işlenebilirlik, fiziksel özellikler ve basınç dayanımı üzerinde olumsuz etkiler meydana getirdiği görülmektedir. Dolayısıyla

polipropilen lif katkılı harçların tasarımında, lif uzunluğu ve lif hacim oranının birlikte değerlendirilerek optimum bir karışım tasarımının oluşturulması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

4.5. Yüksek Sıcaklık Performansı

Şekil 4.7'de polipropilen lif katkılı harç numunelerinin 20 °C, 200 °C, 400 °C ve 600 °C sıcaklıklarına maruz bırakıldıktan sonraki genel görünüşleri verilmiştir. Numuneler incelendiğinde, sıcaklık artışına bağlı olarak yüzey özelliklerinde belirgin değişimlerin meydana geldiği görülmektedir.

20 °C'deki numuneler daha homojen ve kompakt bir yüzey yapısı sergilerken, sıcaklığın artmasıyla birlikte yüzey dokusunda değişimler oluşmaya başlamıştır. Özellikle 200 °C sıcaklığında önemli bir görsel bozulma meydana gelmezken, malzeme bünyesindeki serbest ve kapiler suyun uzaklaşmasına bağlı olarak yüzey yapısında hafif değişimler gözlenmiştir.

Sıcaklık Seriler	20 °C	200 °C	400 °C	600 °C
C				
P6-3				
P6-6				
P6-9				
P12-3				
P12-6				
P12-9				
P18-3				
P18-6				
P18-9				

Şekil 4.7. Farklı Sıcaklıklara Maruz Bırakılan Polipropilen Lif Katkılı Harç Numunelerinin Genel Görünüşleri

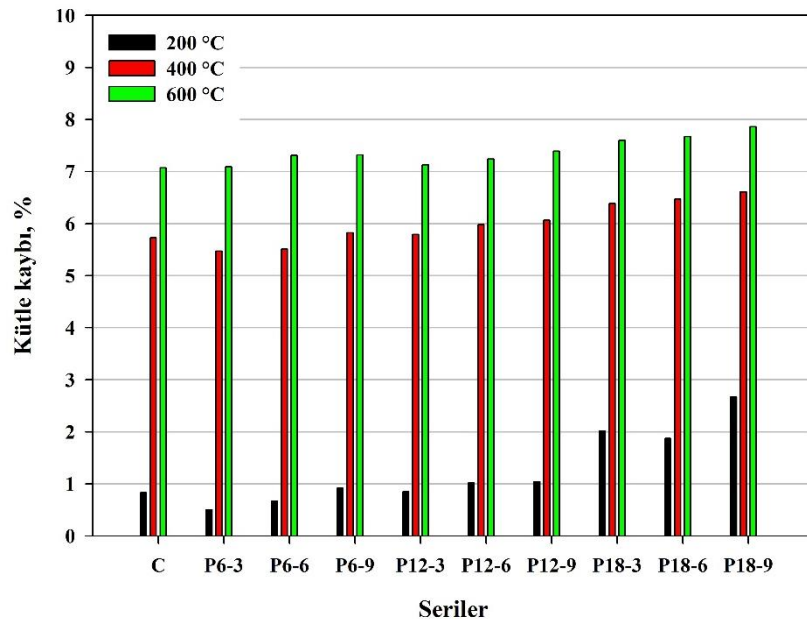
400 °C sıcaklığında ise yüzeylerde daha belirgin renk değişimleri ortaya çıkmıştır. Bu sıcaklık seviyesinde polipropilen liflerin erime sıcaklıklarının (165 °C) aşılması nedeniyle matris içerisinde ilave boşluk oluşumları başlamış ve numune yapısında heterojenlik artmıştır.

600 °C sıcaklığında ise termal hasarın daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Bu sıcaklık seviyesinde çimento hamurunda meydana gelen bozulmalar, polipropilen liflerin erimesi/buharlaşması ve iç yapıdaki boşluk oranının artması sonucunda numune yüzeylerinde daha düzensiz bir görünüm oluşmuştur.

Ayrıca, lif uzunluğu ve lif hacim oranının artmasıyla birlikte yüzey boşluklarının daha belirgin hale geldiği dikkat çekmektedir. Genel olarak sıcaklık artışı sonrasında numunelerin fiziksel bütünlüğünü koruduğunu, sadece renk değişimi ve mikro çatlaklar oluştuğu görülmektedir.

4.5.1. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan serilerin kütle kaybı

200 °C, 400 °C ve 600 °C sıcaklıklarına maruz bırakılan polipropilen lif katkılı harç numunelerinin kütle kaybı oranları Şekil 4.8’de gösterilmiştir. Tüm numunelerde sıcaklık artışına bağlı olarak kütle kaybının arttığı görülmektedir. Bu durum, yüksek sıcaklık etkisiyle harç bünyesindeki serbest suyun ve hidratasyon ürünlerine bağlı suyun uzaklaşması, ayrıca matris yapısında meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimlerle açıklanabilir.



Şekil 4.8. Yüksek Sıcaklığa Maruz Kalan Serilerin Kütle Kaybı Oranları

200 °C sıcaklık seviyesinde tüm numunelerde kütle kaybı oranları oldukça düşük kalmış ve %0.5-%2.7 arasında değişmiştir. Kontrol numunesinde %0.8 oranında kütle kaybı meydana gelirken, polipropilen lif katkılı numunelerde lif uzunluğu ve lif oranındaki artışa bağlı olarak kütle kaybı değerlerinde genel bir yükselme gözlenmiştir. En yüksek kütle kaybı %2.7 ile P18-9 numunesinde elde edilmiştir. Bu durum, yüksek lif içeriğine sahip numunelerde görünür boşluk oranının daha fazla olması (%4.58) ve sıcaklık etkisiyle bu boşluklardan daha fazla nem kaybı meydana gelmesiyle ilişkilendirilebilir.

400 °C sıcaklık seviyesinde tüm serilerde kütle kaybı oranlarının belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Kontrol numunesinde %5.7 olarak ölçülen kütle kaybı, lif katkılı numunelerde %55.-%6.6 aralığında değişmiştir. Özellikle 18 mm lif uzunluğuna sahip serilerde daha yüksek kütle kaybı değerleri elde edilmiştir. Bunun temel nedeni, polipropilen liflerin erime sıcaklığını 160-170°C civarında olmasıdır. Liflerin erimesi sonucunda matris içerisinde ilave boşluklar oluşmakta ve bu durum sıcaklık etkisiyle meydana gelen kütle kaybını artırmaktadır (Boğa vd., 2022).

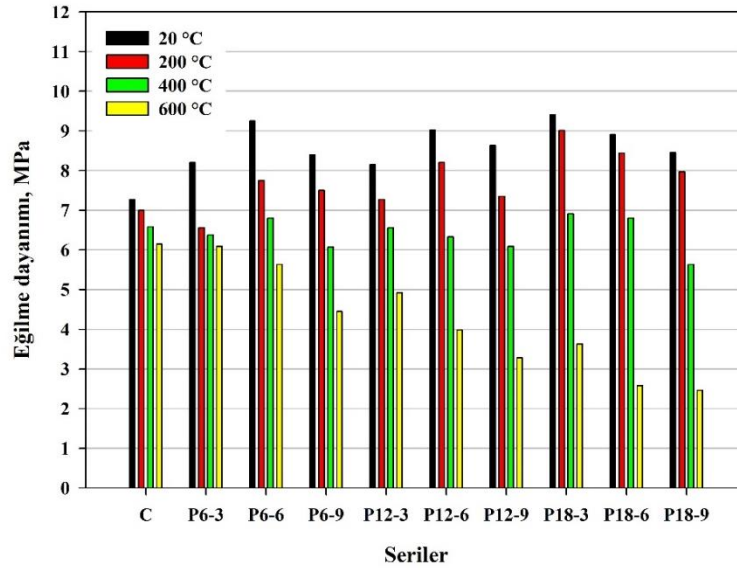
600 °C sıcaklık seviyesinde ise en yüksek kütle kayıpları elde edilmiştir. Kontrol numunesinde %7.0 oranında kütle kaybı meydana gelirken, lif katkılı numunelerde bu değer %7.1-%7.9 arasında değişmiştir. En yüksek kütle kaybı %7.9 ile P18-9 belirlenmiştir. Sıcaklığın 600°C seviyesine ulaşmasıyla birlikte çimento hamurunda bulunan hidrasyon ürünlerinin önemli ölçüde ayrışması, polipropilen liflerin tamamen ortadan kalkması nedeniyle kütle kaybı değerlerinde önemli artışlar meydana gelmiştir (Boğa vd., 2022).

Sonuçlar lif uzunluğu ve lif oranı açısından değerlendirildiğinde, her sıcaklık seviyesinde lif oranındaki artışın kütle kaybını artırdığı görülmektedir. Özellikle %0.9 lif oranına sahip numunelerde tüm sıcaklık seviyelerinde daha yüksek kütle kaybı değerleri elde edilmiştir. Benzer şekilde aynı lif oranında lif uzunluğunun artması da kütle kaybı oranlarında artışa neden olmuştur. Bu durum, önceki bölümlerde belirlenen görünür porozite ve su emme sonuçlarıyla uyumludur.

Genel olarak değerlendirildiğinde, polipropilen lif katkısı yüksek sıcaklık etkisi altında harçların kütle kaybını artırmıştır. Bu artışın temel nedenleri liflerin yüksek sıcaklıklarda eriyerek boşluk oluşturmalarıdır. Bununla birlikte elde edilen kütle kaybı oranlarının tüm sıcaklık seviyelerinde nispeten sınırlı kaldığı ve numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında kabul edilebilir bir fiziksel bütünlük sergilediği söylenebilir.

4.5.2. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan serilerin eğilme dayanımı performansı

20 °C, 200 °C, 400 °C ve 600 °C sıcaklıklarına maruz bırakılan harç numunelerinin eğilme dayanımı değerleri Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde tüm numunelerde sıcaklık artışına bağlı olarak eğilme dayanımının azaldığı görülmektedir. Bu durum yüksek sıcaklık etkisi altında çimento hamurunda meydana gelen fiziksel ve kimyasal bozulmaların yanı sıra polipropilen liflerin erimesi ve çatlak oluşumlarının artmasıyla açıklanabilir.



Şekil 4.9. Yüksek Sıcaklıklara Maruz Kalan Serilerin Eğilme Dayanımı Değerleri

20 °C sıcaklığında en yüksek eğilme dayanımı 9.4 MPa ile P18-3 numunesinde elde edilmiştir. Bu numuneyi sırasıyla P6-6, P12-6 ve P18-6 numuneleri takip etmektedir. Bu sonuçlar, polipropilen liflerin çatlak köprüleme etkisi sayesinde eğilme davranışını iyileştirdiğini göstermektedir.

Numunelerin 200 °C sıcaklığa maruz bırakılması sonrasında tüm serilerde belirli oranlarda dayanım kaybı meydana gelmiştir. Bununla birlikte eğilme dayanımlarındaki azalma sınırlı düzeyde kalmış ve numuneler başlangıç dayanımlarının önemli bir bölümünü koruyabilmiştir. Bu sıcaklık seviyesinde çimento hamurunda önemli bir bozulma meydana gelmemekte, daha çok serbest suyun uzaklaşmasına bağlı fiziksel değişimler görülmektedir. Ayrıca liflerin erime sıcaklığına yakın bir sıcaklık seviyesinde bulunulmasına rağmen matris yapısındaki bozulmalar henüz sınırlı düzeyde kalmaktadır.

400 °C sıcaklık seviyesinde eğilme dayanımlarında daha belirgin düşüşler meydana gelmiştir. Kontrol numunesinin eğilme dayanımı 6.6 MPa seviyesine gerilerken, lif katkılı

numunelerde dayanımlar 5.6-6.9 MPa aralığında değişmiştir. Bu sıcaklık seviyesinde polipropilen liflerin tamamen eridiği ve çimento hamurunda bulunan hidratasyon ürünlerinin yapısında önemli değişimlerin başladığı bilinmektedir. Liflerin erimesi sonucunda oluşan boşluklar, matris yapısında meydana gelen mikro çatlaklar ve suyun liflerin erimesi ile boşluk kanallarına kaçması eğilme dayanımındaki düşüşün temel nedenleri olarak değerlendirilebilir (Dirikgil, 2009).

600 °C sıcaklık seviyesinde ise tüm numunelerde en düşük eğilme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Kontrol numunesinde 6.2 MPa olarak belirlenen eğilme dayanımı, bazı lifli numunelerde 2.5-5.6 MPa seviyelerine kadar düşmüştür. Özellikle yüksek lif oranına sahip P18-6 ve P18-9 numunelerinde dayanım kayıplarının daha belirgin olduğu görülmektedir. Bu durum, yüksek sıcaklık etkisiyle liflerin tamamen ortadan kalkması ve liflerin bulunduğu bölgelerde ilave boşlukların oluşmasıyla açıklanabilir.

Sonuçlar lif oranı açısından değerlendirildiğinde, ortam sıcaklığında eğilme dayanımını artıran yüksek lif oranlarının yüksek sıcaklık etkisi altında aynı olumlu katkıyı sağlayamadığı görülmektedir. Özellikle %0.9 lif oranına sahip numunelerde 600 °C sonrasında önemli dayanım kayıpları meydana gelmiştir. Bunun temel nedeni, yüksek lif içeriğinin yüksek sıcaklık sonrasında daha fazla boşluk oluşumuna neden olmasıdır.

Lif uzunluğu açısından değerlendirildiğinde kısa ve orta uzunluktaki liflerin yüksek sıcaklık sonrasında daha dengeli bir performans sergilediği görülmektedir. Özellikle P6-3, P6-6 ve P12-3 numuneleri 600 °C sonrasında diğer birçok numuneye kıyasla daha yüksek artık eğilme dayanımı göstermiştir. Buna karşılık uzun liflerin yüksek oranlarda kullanıldığı P18-6 ve P18-9 numunelerinde dayanım kayıpları daha belirgin hale gelmiştir.

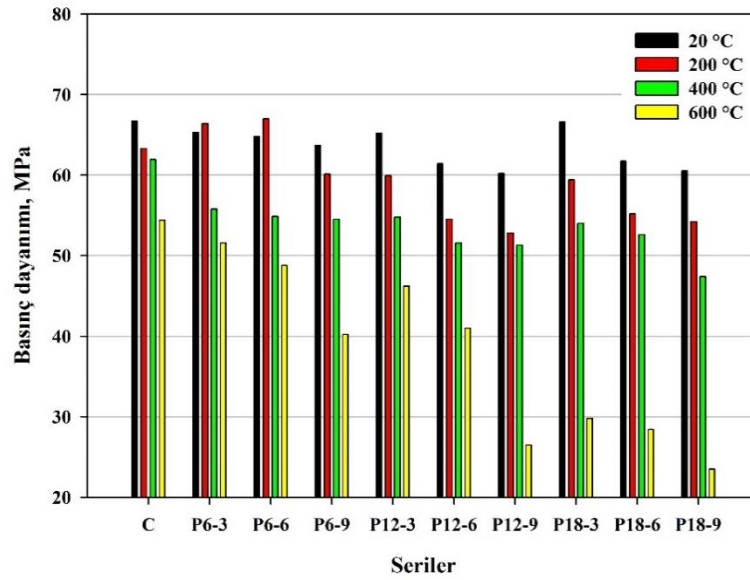
Kütle kaybı sonuçları ile değerlendirildiğinde, yüksek sıcaklıklarda daha fazla kütle kaybına uğrayan numunelerin genellikle daha düşük eğilme dayanımı gösterdiği görülmektedir. Özellikle P18-9 numunesi en yüksek kütle kaybı değerlerinden birine sahip olup aynı zamanda 600 °C sonrasında en düşük eğilme dayanımlarından birini vermiştir. Bu durum yüksek sıcaklık etkisi altında meydana gelen boşluk oluşumu ile mekanik performans arasındaki doğrusal ilişkiyi doğrulamaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, polipropilen lif katkısı ortam sıcaklığında harçların eğilme dayanımını artırmakta, ancak 400 °C altında liflerin erimesine bağlı olarak bu olumlu etkinin önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte bazı lifli numunelerin yüksek sıcaklık sonrasında kontrol numunesine yakın veya daha yüksek artık dayanım göstermesi,

uygun lif uzunluğu ve lif oranı seçildiğinde polipropilen liflerin yüksek sıcaklık performansına da katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

4.5.3. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan serilerin basınç dayanımı performansı

20 °C, 200 °C, 400 °C ve 600 °C sıcaklıklarına maruz bırakılan harç numunelerinin basınç dayanımı değerleri Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Yüksek Sıcaklıklara Maruz Kalan Serilerin Basınç Dayanımı Değerleri

Sonuçlar incelendiğinde, tüm numunelerde sıcaklık artışına bağlı olarak basınç dayanımının azaldığı görülmektedir. Bu durum, yüksek sıcaklık etkisiyle çimento hamurunda meydana gelen fiziksel ve kimyasal bozulmalar, hidratasyon ürünlerinin ayrışması ve polipropilen liflerin erimesi sonucu oluşan boşluklarla açıklanabilir.

20 °C sıcaklığında elde edilen sonuçlar incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı 66.7 MPa ile kontrol ve 66.6 MPa ile P18-3 numunesinde belirlenmiştir. P6-3, P6-6 ve P12-3 numuneleri de benzer şekilde yüksek dayanım değerleri göstermiştir. Buna karşılık yüksek lif oranına sahip P12-9 ve P18-9 numunelerinde daha düşük basınç dayanımları elde edilmiştir. Bu durum, önceki bölümlerde belirlenen porozite ve su emme sonuçlarıyla uyumludur.

200 °C sıcaklık seviyesinde bazı numunelerde basınç dayanımının ortam sıcaklığındaki değerlerine oldukça yakın kaldığı görülmektedir. Özellikle P6-3 ve P6-6 numunelerinde dayanım kaybı oldukça sınırlı düzeyde gerçekleşmiştir. Bu sıcaklık seviyesinde meydana gelen değişimlerin büyük ölçüde serbest suyun uzaklaşmasıyla ilişkili olduğu ve çimento hamurunda henüz ciddi bir bozunma meydana gelmediği düşünülmektedir.

400 °C sıcaklık seviyesinde tüm numunelerde daha belirgin basınç dayanımı kayıpları meydana gelmiştir. Kontrol numunesinin basınç dayanımı 61.9 MPa seviyesine gerilerken, PL katkılı numunelerin basınç dayanımları 47–56 MPa aralığında değişmiştir. Bu sıcaklık seviyesinde polipropilen liflerin erimesiyle matris içerisinde ilave boşluk ve kanallar oluşurken, artan sıcaklığın etkisiyle kalsiyum silikat hidrat (C–S–H) ve etrenjit (AFt) gibi hidratasyon ürünlerinde meydana gelen dehidrasyon ve bozunma süreçleri çimento matrisinin bütünlüğünü olumsuz etkilemektedir. Serbest ve bağlı suyun uzaklaşması, hidratasyon ürünlerinin yapısal değişime uğraması ve PL'lerin erimesi sonucu oluşan ilave boşlukların birlikte etkisiyle matris yapısında meydana gelen bozulmanın, 400 °C'de gözlenen basınç dayanımı kayıplarında etkili olduğu düşünülmektedir (Chen ve Liu, 2004).

600 °C sıcaklık seviyesinde ise tüm numunelerde çok daha belirgin dayanım kayıpları meydana gelmiştir. Kontrol numunesinin basınç dayanımı 54.4 MPa olarak belirlenirken, lif katkılı numunelerde dayanım değerleri 23-51 MPa arasında değişmiştir. En düşük dayanımların %46.7 lik azalışla P12-9 ve %60'lık azalışla P18-9 numunelerinde elde edildiği görülmektedir. Özellikle P18-9 numunesinde basınç dayanımı 23.5 MPa seviyesine kadar düşmüştür.

Sonuçlar lif oranı açısından değerlendirildiğinde, her lif uzunluğu için lif oranındaki artışın yüksek sıcaklık sonrasındaki basınç dayanımını olumsuz etkilediği görülmektedir. 18 mm lifli seride basınç dayanımı 600 °C sonrasında P18-3 numunesinde 30 MPa iken, P18-6 numunesinde 28 MPa'a ve P18-9 numunesinde 24 MPa'a düşmüştür. Benzer eğilim 12 mm lifli seride de görülmektedir.

Lif uzunluğu açısından değerlendirildiğinde ise düşük lif oranlarında uzun liflerin olumsuz etkisinin sınırlı olduğu, ancak lif oranı arttıkça uzun liflerin oluşturduğu boşluk yapısının yüksek sıcaklık performansını olumsuz etkilediği görülmektedir. Özellikle 12 mm ve 18 mm lif uzunluğuna sahip, yüksek lif oranlı numunelerde dayanım kayıpları daha belirgin hale gelmiştir.

Porozite ve su emme oranları yüksek olan numunelerde yüksek sıcaklık sonrasında daha fazla kütle kaybı meydana gelmiş ve buna bağlı olarak basınç dayanımlarında daha büyük azalmalar gözlenmiştir. Özellikle P18-9 numunesi en yüksek porozite, en yüksek su emme ve en yüksek kütle kaybı değerlerinden birine sahip olup, aynı zamanda 600 °C sonrasında en düşük basınç dayanımını göstermiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, polipropilen liflerin normal sıcaklık koşullarında eğilme dayanımını artırdığı, ancak yüksek sıcaklık etkisi altında liflerin erimesi sonucu oluşan boşlukların basınç dayanımı üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğu görülmektedir. Özellikle yüksek lif oranlarında bu etkinin daha belirgin hale geldiği ve yüksek sıcaklık performansının olumsuz yönde etkilendiği belirlenmiştir.

Tablo 4.2’de, numunelerin 200, 400 ve 600 C sıcaklıklara maruz bırakılması sonrasında eğilme ve basınç dayanımlarında meydana gelen değişimler, 20 C’deki dayanım değerlerine göre yüzde olarak verilmiştir. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, sıcaklık arttıa dayanım kayıplarının da arttığı görülmektedir. Kontrol numunesinde 200 C sonrasında eğilme ve basınç dayanımları sırasıyla %3.7 ve %5.1 azalırken, lifli numunelerde eğilme dayanımındaki kayıplar %4.3 ile %20.0 arasında değişmiştir. Bu sıcaklıkta basınç dayanımı açısından farklı bir davranış gözlenmiş ve P6-3 ile P6-6 numunelerinde sırasıyla %1.7 ve %3.4 oranında artış elde edilmiştir. Diğer lifli numunelerde ise farklı oranlarda dayanım kayıpları meydana gelmiştir. Sıcaklığın 400 C’ye yükselmesiyle birlikte dayanımdaki azalmalar daha belirgin hale gelmiş ve bu sıcaklıkta tüm numunelerde hem eğilme hem de basınç dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Eğilme dayanımındaki kayıplar %9.5–33.4 arasında değişirken, basınç dayanımındaki kayıplar %7.2–21.7 aralığında kalmıştır. En belirgin dayanım kayıpları ise 600 C sonrasında ortaya çıkmıştır. Kontrol numunesinde bu sıcaklıkta eğilme ve basınç dayanımları sırasıyla %15.4 ve %18.4 azalırken, lifli numunelerde kayıpların genel olarak daha yüksek olduğu görülmüştür. Özellikle 12 ve 18 mm uzunluğundaki liflerin kullanıldığı serilerde, lif oranının artmasıyla dayanım kayıpları daha belirgin hle gelmiştir. 600 C’de en yüksek eğilme dayanımı kaybı %70.9 ile P18-6 numunesinde, en yüksek basınç dayanımı kaybı ise %61.2 ile P18-9 numunesinde belirlenmiştir. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda polipropilen liflerin erimesiyle matris içerisinde oluşan boşlukların ve sıcaklığın imento esaslı yapı üzerinde meydana getirdiği bozulmaların, özellikle uzun ve yüksek oranda lif içeren numunelerde mekanik özellikleri daha fazla etkilediği gözlemlenmiştir.

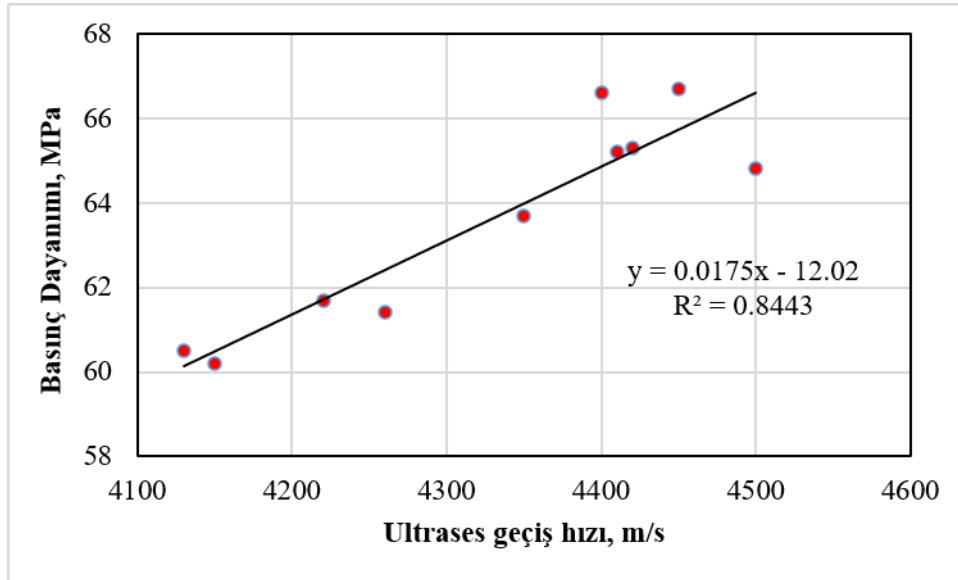
Tablo 4.2. Yüksek sıcaklık sonrası harç numunelerinin kontrol numunesine göre performans değişim oranları (%)

Numune	200 °C eğilme dayanımı	200 °C basınç dayanımı	400 °C eğilme dayanımı	400 °C basınç dayanımı	600 °C eğilme dayanımı	600 °C basınç dayanımı
C	-3.7	-5.1	-9.5	-7.2	-15.4	-18.4
P6-3	-20.0	+1.7	-22.2	-14.5	-25.7	-21.0
P6-6	-16.2	+3.4	-26.5	-15.3	-39.1	-24.7
P6-9	-10.6	-5.7	-27.7	-14.4	-47.0	-36.9
P12-3	-10.8	-8.1	-19.5	-16.0	-39.6	-29.1
P12-6	-9.1	-11.2	-29.8	-16.0	-55.9	-33.2
P12-9	-14.8	-12.3	-29.4	-14.8	-62.0	-56.0
P18-3	-4.3	-10.8	-26.6	-18.9	-61.4	-55.3
P18-6	-5.3	-10.5	-23.7	-14.7	-71.0	-54.0
P18-9	-5.7	-10.4	-33.4	-21.7	-70.9	-61.2

Yüzdesel değişim oranları 20 °C'deki numunelere göre hesaplanmıştır. Pozitif (+) değerler ilgili parametredeki artışı, negatif (-) değerler ise azalışı göstermektedir.

4.6. Ultrases Geçiş Hızı- Basınç Dayanımı İlişkisi

Şekil 4.11'de polipropilen lif katkılı harç numunelerinin ultrases geçiş hızı ile 28 günlük basınç dayanımı arasındaki ilişki verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, iki parametre arasında güçlü ve pozitif yönlü bir doğrusal ilişki bulunduğu görülmektedir. Ultrases geçiş hızı arttıkça basınç dayanımı da artış göstermiştir.



Şekil 4.11. Harç Serilerinin 28 Günlük Ultrases Geçiş Hızı ve Basınç Dayanımları Arasındaki İlişki

Yapılan doğrusal regresyon analizi sonucunda elde edilen ilişki, $y=0.0175x-12.02$ denklemi ile ifade edilmiş olup, determinasyon katsayısı (R^2) 0.8443 olarak hesaplanmıştır.

Bu değer, basınç dayanımındaki değişimin %84.4'ünün ultrases geçiş hızı ile açıklanabildiğini göstermektedir.

Ultrases geçiş hızı, malzemenin iç yapısındaki süreklilik, yoğunluk ve homojenlik hakkında bilgi veren önemli bir tahribatsız deney yöntemidir. Daha yüksek UPV değerleri, numune içerisinde daha az boşluk ve daha homojen bir matris yapısının oluştuğunu göstermektedir. Buna bağlı olarak yük taşıma kapasitesi artmakta ve daha yüksek basınç dayanımları elde edilmektedir. Buna karşılık düşük ultrases geçiş hızı değerlerine sahip numunelerde boşluk oranının ve iç yapı heterojenliğinin arttığı görölmektedir. Önceki bölümlerde elde edilen görünür porozite ve su emme sonuçları da bu durumu desteklemektedir. Lif uzunluğu ve lif hacim oranındaki artışın işlenebilirliği azaltması, numunelerin boşluk yapısını olumsuz etkilemiş ve bu durum hem UPV hem de basınç dayanımı değerlerine yansımıştır.

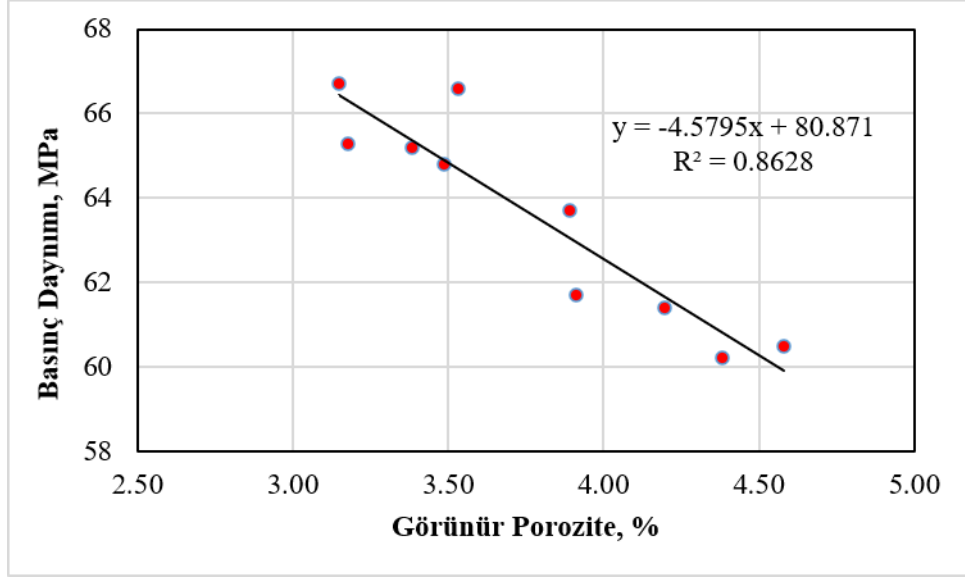
Elde edilen yüksek R^2 değeri, ultrases geçiş hızının polipropilen lif katkılı harçların basınç dayanımının tahmin edilmesinde güvenilir bir tahribatsız deney yöntemi olarak kullanılabileceğini göstermektedir. $R^2=0.8443$ değeri, UPV ile basınç dayanımı arasında güçlü bir ilişki bulunduğunu ve ultrases geçiş hızının basınç dayanımının tahmin edilmesinde etkin bir gösterge olduğunu ortaya koymaktadır.

4.7. Görünür Porozite- Basınç Dayanımı İlişkisi

Şekil 4.12'de polipropilen lif katkılı harç numunelerinin 28 günlük görünür porozite ile basınç dayanımı arasında ilişki verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, iki parametre arasında güçlü ve negatif yönlü bir doğrusal ilişki bulunduğu görölmektedir. Görünür porozite arttıkça basınç dayanımının azaldığı belirlenmiştir.

Yapılan doğrusal regresyon analizi sonucunda elde dilen ilişki, $y=-4.5795x + 80.871$ denklemi ile ifade edilmiş olup, determinasyon katsayısı (R^2) 0.8628 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, basınç dayanımındaki değişimin %86.3'ünün görünür porozite ile açıklanabildiğini göstermektedir.

Görünür porozite malzemenin boşluk yapısı ve geçirgenliği hakkında önemli bilgiler veren fiziksel bir parametredir. Görünür porozitenin artması, numune içerisindeki bağlantılı boşluk hacminin arttığını ve matris yapısının daha heterojen hale geldiğini göstermektedir. Buna bağlı olarak yük taşıyan etkin kesit alanı azalmakta ve basınç dayanımı düşmektedir.



Şekil 4.12. Görünür Porozite ile 28 Günlük Basınç Dayanımı Arasındaki İlişki

Lif uzunluğu ve lif hacim oranındaki artış, işlenebilirliğin azalmasına neden olmuş, buna bağlı olarak görünür porozite ve su emme oranları artmıştır. Artan boşluk oranı ise hem ultrases geçiş hızının hem de basınç dayanımının azalmasına yol açmıştır.

Elde edilen R^2 değeri, görünür porozite oranının polipropilen lif katkılı harçların mekanik performansının değerlendirilmesinde önemli bir gösterge olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, harçların dayanıklılık özellikleri ile mekanik davranışları arasında güçlü bir ilişki bulunduğunu göstermektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı lif uzunlukları (6, 12 ve 18 mm) ile farklı lif hacim oranlarında (%0.3, %0.6 ve %0.9) üretilen polipropilen lif katkılı harçların taze hal, fiziksel, mekanik ve yüksek sıcaklık performansları deneysel olarak araştırılmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Polipropilen lif ilavesi harçların işlenebilirliğini olumsuz etkilemiştir. Lif uzunluğu ve lif hacim oranındaki artışa bağlı olarak tüm serilerde yayılma değerleri azalmış, en yüksek azalma %14.8 ile P18-9 numunesinde belirlenmiştir. Kontrol numunesine kıyasla P6 serisinde %2.2-%9.6; P12 serisinde %3.7-%11.1 ve P18 serisinde ise %5.2-%14.8 aralığında azalmalar olmuştur.
- 28 günlük kür süresi sonunda kontrol numunesinin ultrases geçiş hızı 4450 m/s olarak belirlenmiştir. Kontrol numunesi ile karşılaştırıldığında, P6-6 karışımında UPV değerinin %1.12 oranında artarak 4500 m/s'ye ulaştığı görülürken, P6-3 ve P6-9 karışımlarında sırasıyla %0.67 ve %2.25 oranlarında azalma meydana gelmiştir. P12 serisinde lif hacim oranının artmasıyla UPV değerlerinde daha belirgin düşüşler gözlenmiş; P12-3, P12-6 ve P12-9 karışımlarında kontrol numunesine göre sırasıyla %0.90, %4.27 ve %6.74 oranlarında azalma belirlenmiştir. Benzer şekilde P18-3, P18-6 ve P18-9 karışımlarında UPV değerleri sırasıyla %1.12, %5.17 ve %7.19 oranında azalmıştır. Genel olarak değerlendirildiğinde, düşük lif boyu ve hacimsel lif oranlarında UPV değerlerindeki değişimlerin sınırlı kaldığı, buna karşılık lif boyu ve hacimsel lif oranının artmasıyla UPV değerlerinde azalma eğiliminin belirginleştiği görülmüştür. Özellikle 12 ve 18 mm lif kullanılan karışımlarda hacimsel lif oranının artmasıyla UPV değerlerinin kademeli olarak azalması, yüksek lif içeriğinin ve artan lif boyunun harç matrisinin iç yapısı üzerinde daha belirgin bir etki oluşturduğunu göstermektedir.
- Polipropilen lif ilavesinin 28 günlük eğilme dayanımı üzerinde genel olarak olumlu bir etki oluşturduğu belirlenmiştir. Tüm PL katkılı karışımlar kontrol numunesinden daha yüksek eğilme dayanımına ulaşırken, en yüksek değer 9.41 MPa ile P18-3 karışımında elde edilmiş ve bu değer kontrol numunesine göre %29.4 oranında artışa karşılık gelmiştir. En düşük artış ise 8.15 MPa eğilme dayanımına sahip P12-3 karışımında %12.10 olarak belirlenmiştir. P6 serisinde lif hacim oranının %0.3'ten %0.6'ya yükseltilmesiyle eğilme dayanımı 8.20 MPa'dan 9.25 MPa'ya yükselmiş ve P6-6 karışımında kontrol numunesine

göre %27.24 oranında artış elde edilmiştir. Lif oranının %0.9'a çıkarılmasıyla ise eğilme dayanımı 8.39 MPa'ya gerilemesine rağmen kontrol numunesinden %15.41 daha yüksek kalmıştır. Benzer bir eğilim P12 serisinde de gözlenmiştir; P12-3, P12-6 ve P12-9 karışımlarında kontrol numunesine göre sırasıyla %12.10, %24.07 ve %18.71 oranlarında artış belirlenmiştir. Buna karşılık P18 serisinde en yüksek eğilme dayanımı %0.3 lif oranında elde edilmiş, lif oranının %0.6 ve %0.9'a yükseltilmesiyle dayanım sırasıyla 8.91 ve 8.45 MPa'ya gerilemiştir. Buna rağmen bu değerler kontrol numunesinden sırasıyla %22.56 ve %16.23 daha yüksek gerçekleşmiştir. Genel olarak sonuçlar, PL ilavesinin çatlak köprüleme mekanizması sayesinde eğilme davranışını iyileştirdiğini, ancak lif oranının belirli bir seviyenin üzerine çıkarılmasının her lif boyunda ilave bir dayanım artışı sağlamadığını göstermektedir. Özellikle daha uzun liflerde yüksek hacimsel lif oranlarının işlenebilirlik ve lif dağılımı üzerindeki olumsuz etkilerinin, liflerin sağladığı katkıyı sınırlandırmış olabileceği düşünülmektedir.

- Basınç dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde, tüm PL katkılı karışımların kontrol numunesinden daha düşük dayanım değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, düşük hacimsel lif oranlarında basınç dayanımındaki değişimin sınırlı kaldığı, lif oranının artmasıyla dayanım kaybının genel olarak daha belirgin hale geldiği görülmüştür. Kontrol numunesinin 28 günlük basınç dayanımı 66.7 MPa olarak belirlenirken, PL katkılı karışımların dayanımları 60.2–66.6 MPa arasında değişmiş ve kontrol numunesine göre %0.15–%9.75 arasında azalma meydana gelmiştir. %0.3 hacimsel lif oranında P6-3, P12-3 ve P18-3 karışımlarında kontrol numunesine göre sırasıyla %2.10, %2.25 ve %0.15 oranlarında dayanım kaybı belirlenmiştir. Lif oranının %0.6'ya yükseltilmesiyle bu azalma oranları sırasıyla %2.85, %7.95 ve %7.50'ye, %0.9 lif oranında ise %4.50, %9.75 ve %9.30'a ulaşmıştır. Özellikle 12 ve 18 mm lif kullanılan karışımlarda hacimsel lif oranının artmasıyla basınç dayanımındaki azalmanın daha belirgin hale geldiği görülmüştür. Bu durumun, artan lif miktarı ve lif boyuyla birlikte işlenebilirliğin azalması, liflerin homojen dağılımının zorlaşması ve buna bağlı olarak matris içerisindeki boşluk oranının artmasıyla ilişkili olabileceği düşünülmektedir.
- Görünür porozite ve su emme sonuçları değerlendirildiğinde, PL ilavesinin her iki özellik üzerinde de belirgin bir etkisinin olduğu ve genel olarak lif boyu ile hacimsel lif oranının artmasına bağlı olarak porozite ve su emme değerlerinin yükseldiği görülmüştür. Kontrol numunesinin görünür porozite ve su emme değerleri sırasıyla %3.15 ve %1.36 olarak belirlenmiştir. P6 serisinde %0.3, %0.6 ve %0.9 hacimsel lif oranlarında porozite değerleri sırasıyla %3.29, %3.49 ve %3.89; su emme değerleri ise %1.45, %1.54 ve %1.72 olarak

elde edilmiştir. P12 serisinde lif oranının artmasıyla porozite değerleri %3.4'ten %4.4'e, su emme değerleri ise %1.5'dan %1.94'e yükselmiştir. Benzer şekilde P18 serisinde porozite değerleri %3.5–%4.6, su emme değerleri ise %1.6–%2.0 aralığında değişmiştir. En yüksek porozite ve su emme değerleri P18-9 karışımında belirlenmiş ve kontrol numunesine göre sırasıyla %45.4 ve %49.3 oranında artış meydana gelmiştir. Elde edilen sonuçlar, özellikle uzun liflerin yüksek hacimsel oranlarda kullanılmasının harç matrisinin boşluk yapısını olumsuz etkilediğini göstermektedir. Lif boyu ve hacimsel lif oranının artmasıyla işlenebilirliğin azalması, liflerin homojen dağılımının zorlaşması ve topaklanma eğiliminin artması, matrisin yeterli düzeyde sıkıştırılmasını güçleştirerek boşluk oluşumunu artırmış olabilir. Porozitedeki artışa paralel olarak su emme değerlerinin de yükselmesi, PL kullanımına bağlı olarak meydana gelen iç yapı değişiminin bir sonucu olarak değerlendirilebilir.

- Yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde, sıcaklık artışının genel olarak tüm karışımların basınç dayanımını olumsuz etkilediği, ancak dayanım kaybının lif boyu ve hacimsel lif oranına bağlı olarak önemli farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir. Kontrol numunesinin 20 °C'de 66.7 MPa olan basınç dayanımı, 200, 400 ve 600 °C sonrasında sırasıyla 63.3, 61.9 ve 54.4 MPa'a gerilemiştir. Bununla birlikte, 200 °C'de P6-3 ve P6-6 karışımlarında başlangıç dayanımlarına göre sırasıyla yaklaşık %1.7 ve %3.4 oranında sınırlı dayanım artışları meydana gelmiş ve en yüksek basınç dayanımı 67.0 MPa ile P6-6 karışımında elde edilmiştir. Diğer PL katkılı karışımlarda ise 200 °C'den itibaren genel olarak dayanım kayıpları gözlenmiştir. Sıcaklığın 400 °C'ye yükselmesiyle tüm PL katkılı karışımlarda basınç dayanımları azalmış ve 47.4–55.8 MPa aralığında değişmiştir. Bu sıcaklık seviyesinde kontrol numunesinin 61.9 MPa ile lif katkılı karışımlardan daha yüksek dayanımını koruduğu belirlenmiştir. En belirgin dayanım kayıpları ise 600 °C'de meydana gelmiş; PL katkılı karışımların basınç dayanımları 23.5–51.6 MPa aralığına gerilemiştir. Bu sıcaklıkta en yüksek lifli numune dayanımı 51.6 MPa ile P6-3 karışımında, en düşük değer ise 23.5 MPa ile P18-9 karışımında elde edilmiştir. Genel olarak, özellikle 600 °C'de lif boyu ve hacimsel lif oranının artmasıyla basınç dayanımı kayıplarının belirgin şekilde arttığı görülmüştür. Bu sonuçlar, düşük lif boyu ve hacimsel lif oranlarının yüksek sıcaklık sonrasında basınç dayanımının korunması açısından daha avantajlı olduğunu, buna karşılık uzun liflerin yüksek oranlarda kullanılmasının yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımını önemli ölçüde olumsuz etkilediğini ortaya koymuştur.

- Yüksek sıcaklık sonrası eğilme dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde, sıcaklığın artmasıyla birlikte tüm karışımlarda genel olarak eğilme dayanımının azaldığı, ancak meydana gelen dayanım kayıplarının lif boyu ve hacimsel lif oranına bağlı olarak farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Kontrol numunesinin 20 °C'de 7.27 MPa olan eğilme dayanımı, 200, 400 ve 600 °C sıcaklıklar sonrasında sırasıyla 7.00, 6.58 ve 6.15 MPa'a gerilemiştir. PL katkılı karışımlarda 200 °C sonrası eğilme dayanımları 6.56–9.01 MPa arasında değişmiş ve en yüksek değer 9.01 MPa ile P18-3 karışımında elde edilmiştir. Özellikle P18 serisinin 200 °C sonrasında diğer lifli karışımlara kıyasla yüksek eğilme dayanımlarını büyük ölçüde koruduğu görülmüştür. Sıcaklığın 400 °C'ye yükselmesiyle PL katkılı karışımların eğilme dayanımları 5.63–6.91 MPa aralığına gerilemiş ve karışımlar arasındaki dayanım farklılıkları önemli ölçüde azalmıştır. Bu sıcaklık seviyesinde en yüksek eğilme dayanımı 6.91 MPa ile P18-3 karışımında, en düşük değer ise 5.63 MPa ile P18-9 karışımında belirlenmiştir. Sıcaklığın 600 °C'ye ulaşmasıyla eğilme dayanımındaki kayıplar daha belirgin hale gelmiş ve PL katkılı karışımların dayanımları 2.46–6.09 MPa aralığında değişmiştir. Bu sıcaklıkta lifli karışımlar içerisinde en yüksek dayanım 6.09 MPa ile P6-3 karışımında elde edilirken, en düşük değer 2.46 MPa ile P18-9 karışımında belirlenmiştir. Genel olarak sonuçlar, düşük sıcaklık seviyelerinde PL'nin sağladığı eğilme dayanımı avantajının belirli ölçüde korunabildiğini, ancak sıcaklığın özellikle 600 °C'ye ulaşmasıyla bu etkinin önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda lif boyu ve hacimsel lif oranının artmasıyla dayanım kayıplarının daha belirgin hale geldiği, kısa ve düşük hacimsel oranlı lif içeren karışımların ise eğilme dayanımını koruma açısından daha başarılı olduğu belirlenmiştir.
- Yüksek sıcaklık sonrası kütle kaybı sonuçları değerlendirildiğinde, sıcaklık artışına bağlı olarak tüm karışımlarda kütle kaybının arttığı belirlenmiştir. Kontrol numunesinde 200, 400 ve 600 °C sıcaklık seviyelerinde sırasıyla %0.83, %5.73 ve %7.07 oranlarında kütle kaybı meydana gelmiştir. P6 serisinde 200 °C'deki kütle kayıpları %0.50–%0.92 aralığında değişirken, bu değerler 400 °C'de %5.47–%5.82'ye ve 600 °C'de %7.09–%7.32'ye yükselmiştir. P12 serisinde sıcaklık seviyelerine bağlı olarak kütle kayıpları sırasıyla %0.85–%1.04, %5.79–%6.06 ve %7.13–%7.39 aralıklarında gerçekleşmiştir. En yüksek kütle kayıpları genel olarak P18 serisinde gözlenmiş; 200 °C'de %1.87–%2.67, 400 °C'de %6.39–%6.61 ve 600 °C'de %7.60–%7.86 aralığında değerler elde edilmiştir. Tüm karışımlar içerisinde en yüksek kütle kaybı %7.86 ile 600 °C'ye maruz bırakılan P18-9 karışımında belirlenmiştir. Genel olarak sonuçlar, sıcaklığın artmasının kütle kaybı üzerindeki temel belirleyici faktör olduğunu, bununla birlikte özellikle uzun liflerin ve

yüksek hacimsel lif oranlarının kullanıldığı karışımlarda kütle kaybının daha belirgin hale geldiğini göstermiştir. Bu durumun, sıcaklık artışıyla birlikte serbest ve bağlı suyun uzaklaşmasına, hidrasyon ürünlerinin dehidrasyonuna ve polipropilen liflerin erimesi sonucu meydana gelen kütle ve iç yapı değişimlerine bağlı olduğu düşünülmektedir.

- Gerçekleştirilen ilişki analizleri sonucunda, harçların fiziksel özellikleri ile mekanik performansları arasında güçlü doğrusal ilişkiler bulunduğu belirlenmiştir. UPV ile basınç dayanımı arasında yüksek düzeyde pozitif bir ilişki elde edilmiş ve regresyon analizinde $R^2 = 0.8443$ olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, basınç dayanımındaki değişimin önemli ölçüde harç matrisinin yoğunluğu ve bütünlüğüyle ilişkili olduğunu göstermektedir. Yüksek UPV değerlerinin daha yoğun, daha homojen ve düşük boşluklu bir iç yapıyla ilişkili olması, bu numunelerde daha yüksek basınç dayanımlarının elde edilmesini desteklemektedir. Buna karşılık, görünür porozite ile basınç dayanımı arasında güçlü negatif bir ilişki belirlenmiş ve $R^2 = 0.8628$ olarak elde edilmiştir. Porozitenin artmasıyla matris içerisindeki boşlukların ve kusurların artması, yük aktarımının sürekliliğini olumsuz etkileyerek basınç dayanımının azalmasına katkıda bulunmuştur. Elde edilen yüksek R^2 değerleri, UPV ve görünür porozite gibi fiziksel özelliklerin yüksek dayanımlı PL katkılı harçların basınç dayanımındaki değişimlerin değerlendirilmesinde önemli göstergeler olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, polipropilen lif kullanımının yüksek dayanımlı harçların özellikle eğilme davranışı üzerinde önemli iyileşmeler sağladığı; buna karşılık lif boyunun ve hacimsel lif oranının aşırı artırılmasının işlenebilirlik, porozite, su emme, UPV ve basınç dayanımının yanı sıra yüksek sıcaklık sonrası mekanik performans üzerinde olumsuz etkiler oluşturduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, PL kullanımından sağlanan faydanın yalnızca lif miktarına bağlı olmadığını, lif boyu ile hacimsel lif oranının birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle, PL katkılı yüksek dayanımlı harçların tasarımında hedeflenen mekanik ve dayanıklılık performansına bağlı olarak uygun lif boyu ve hacimsel lif oranının belirlenmesinin önemli olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen deneysel sonuçlar bir bütün olarak değerlendirildiğinde, lif uzunluğu ve lif hacim oranının harçların taze hal, fiziksel, mekanik ve yüksek sıcaklık performansları üzerinde birbirleriyle ilişkili etkiler oluşturduğu görülmüştür. Lif uzunluğu ve lif hacim oranındaki artış öncelikle işlenebilirliği azaltmış, buna bağlı olarak görünür porozite ve su emme oranları artmıştır. Fiziksel özelliklerde meydana gelen bu değişimler ultrases geçiş hızının azalmasına ve 28 günlük basınç dayanımının

düşmesine neden olmuştur. Ayrıca yüksek sıcaklık etkisi altında meydana gelen fiziksel bozulmalar kütle kaybını artırmış ve bunun sonucunda 600 °C sonrasındaki eğilme ve basınç dayanımlarında önemli azalmalar meydana gelmiştir.

5.2. Öneriler

Bu çalışma kapsamında farklı lif uzunlukları ve lif hacim oranlarına sahip polipropilen lif katkılı harçların taze hal, fiziksel, mekanik ve yüksek sıcaklık performansları deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda aşağıdaki öneriler sunulabilir:

- Bu çalışmada yalnızca 6 mm, 12 mm ve 18 mm lif uzunlukları ile %0.3, %0.6 ve %0.9 lif hacim oranları araştırılmıştır. Farklı lif uzunlukları ve daha geniş lif hacim oranlarının kullanıldığı çalışmalar gerçekleştirilerek optimum lif parametreleri daha ayrıntılı olarak belirlenebilir.
- Çalışmada yalnızca tek tip polipropilen lif kullanılmıştır. Gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı geometriye, elastisite modülüne ve çekme dayanımına sahip sentetik liflerin veya hibrit lif sistemlerinin harç performansı üzerindeki etkileri araştırılabilir.
- Yüksek sıcaklık deneyleri 200 °C, 400 °C ve 600 °C sıcaklık seviyeleri ile sınırlandırılmıştır. Daha yüksek sıcaklık seviyelerinde (örneğin 800 °C ve 1000 °C) gerçekleştirilecek çalışmalar, polipropilen lif katkılı harçların yangın sonrası davranışının daha kapsamlı değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.
- Bu çalışmada yüksek sıcaklık sonrasında yalnızca kütle kaybı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı incelenmiştir. Gelecek çalışmalarda elastisite modülü, darbe dayanımı, aşınma direnci, sülfat ve asit etkisi ve artık ultrases geçiş hızı gibi ilave performans parametreleri de araştırılabilir.
- Yüksek sıcaklık sonrasında meydana gelen mikro yapısal değişimlerin daha ayrıntılı değerlendirilmesi amacıyla SEM, EDS, XRD, TGA/DSC ve cıva intrüzyon porozimetresi (MIP) gibi karakterizasyon yöntemlerinden yararlanılabilir. Böylece fiziksel ve mekanik özelliklerde meydana gelen değişimlerin mikroyapısal nedenleri daha ayrıntılı olarak ortaya konulabilir.

KAYNAKÇA

- Abaeian, R., Behbahani, H. P., & Moslem, S. J. (2018). Effects of high temperatures on mechanical behavior of high strength concrete reinforced with high performance synthetic macro polypropylene (HPP) fibres. *Construction and Building Materials*, 165, 631-638.
- Abdulkareem, O. M., Alshahwany, R., & Mousa, A. (2022). Durability of polypropylene fiber reinforced concrete: Literatures review. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 22(01), 14-28.
- Abdulrahman, P. I., Bzeni, D. K., & Ahmed, S. M. (2025). Pull-off and slant-shear tests for evaluating bond strength in polymer-modified cement mortar reinforced with polypropylene fibers. *Journal of Building Engineering*, 104, 112259.
- Açıkgeçenç, M., Arazsu, U., & Alyamaç, K. E. (2012). Farklı karışım oranlarına sahip polipropilen lifli betonların dayanım ve durabilite özellikleri. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 4(3), 41-54.
- Akid, A. S. M., Hossain, S., Munshi, M. I. U., Elahi, M. M. A., Sobuz, M. H. R., Tam, V. W., & Islam, M. S. (2023). Assessing the influence of fly ash and polypropylene fiber on fresh, mechanical and durability properties of concrete. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 35(7), 474-484.
- Algourdin, N., Pliya, P., Beaucour, A. L., Simon, A., & Noumowé, A. (2020). Influence of polypropylene and steel fibres on thermal spalling and physical-mechanical properties of concrete under different heating rates. *Construction and Building Materials*, 259, 119690.
- Al-Khaja, W. A. (1995). Mechanical Properties and Time-Dependent Deformations of Polypropylene Fiber Concrete. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 7(1), 67-75.
- Arazsu, U. (2012). *Polipropilen Lifli Betonların Taze ve Sertleşmiş Beton Özellikleri*. (Yüksek Lisans Tezi). Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Arvizu-Montes, A., Guerrero-Bustamante, O., Polo-Mendoza, R., & Martinez-Echevarria, M. J. (2025). Mechanical performance of fiber-reinforced cement mortars: A comparative study on the effect of synthetic and natural fibers. *Buildings*, 15(13), 2352.
- Azandariani, M. G., Vajdian, M., Asghari, K., & Mehrabi, S. (2023). Mechanical properties of polyolefin and polypropylene fibers-reinforced concrete—An experimental study. *Composites Part C: Open Access*, 12, 100410.
- Bahadır, F. (2010). *Polipropilen lifli betonların mekanik özellikleri*. (Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Bentegri, I., Boukendakdji, O., Kadri, E. H., Ngo, T. T., & Soualhi, H. (2020). Rheological and tribological behaviors of polypropylene fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 261, 119962.
- Blazy, J., & Blazy, R. (2021). Polypropylene fiber reinforced concrete and its application in creating architectural forms of public spaces. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00549.
- Boğa, A. R., Karakurt, C., & Şenol, A. F. (2022). The effect of elevated temperature on the properties of SCC's produced with different types of fibers. *Construction and Building Materials*, 340, 127803.
- Chen, B., & Liu, J. (2004). Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Research*, 34(6), 1065-1069.
- Çelik, S. (2025). *Çimento Esaslı Lifli Kompozitlerde Yüksek Sıcaklık ve Sülfat Etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi). Batman Üniversitesi Lisans Üstü Eğitim Enstitüsü, Batman.

- Dirikgil, T. (2009). *Polipropilen Lifli Betonların Yüksek Sıcaklık Etkisi Altında Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Deneysel Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi). Kayseri Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Erdoğan, T. Y. (2013). *Beton*. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık. Türkiye.
- Garg, R., & Garg, R. (2021). Performance evaluation of polypropylene fiber waste reinforced concrete in presence of silica fume. *Materials Today: Proceedings*, 43, 809-816.
- Hossain, M. T., Shahid, M. A., Mahmud, N., Habib, A., Rana, M. M., Khan, S. A., & Hossain, M. D. (2024). Research and application of polypropylene: a review. *Discover Nano*, 19(1), 2. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2025.102119>.
- Kara, Ş. (2011). *Farklı enine kesit şekillerinde üretilen kimyasal liflerin yapısal davranışları ve kullanım özelliklerinin incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Karahan, O., & Atış, C. D. (2011). The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete. *Materials & Design*, 32(2), 1044-1049.
- Karimov, A. (2024). *Eğilme Hasarlı Kirişlerin Yüksek Dayanımlı Harç ve Cfrp ile Onarılmasının Dayanım Üzerindeki Etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Köseoğlu, A. (2024). *Yüksek Oranda Mikro Çelik ve Polipropilen Lif İçerikli Harçların Performansının İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Kutzing, L. (1996). Influence of fibres on the improving of ductility of high performance concrete (HPC). *Institute for Massivbau und Baustofftechnologie i Gr. Universität Leipzig*, 135-41.
- Lee, J. H., Cho, B., Choi, E., & Kim, Y. H. (2016). Experimental study of the reinforcement effect of macro-type high strength polypropylene on the flexural capacity of concrete. *Construction and Building Materials*, 126, 967-975.
- Liu, T., Jin, J., Qin, Z., Li, M., Liu, Q., Zhao, J., & Zuo, S. (2026). Reinforcement effect of polypropylene fiber on mechanical properties of highly flowable cement-tailings grout. *Construction and Building Materials*, 520, 145976.
- Manjunath, B., Ouellet-Plamondon, C. M., Das, B. B., & Bhojaraju, C. (2023). Potential utilization of regional cashew nutshell ash wastes as a cementitious replacement on the performance and environmental impact of eco-friendly mortar. *Journal of Building Engineering*, 66, 105941.
- Matar, P., & Assaad, J. J. (2019). Concurrent effects of recycled aggregates and polypropylene fibers on workability and key strength properties of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 199, 492-500.
- Nili, M., & Afroughsabet, V. (2010). The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 24(6), 927-933.
- Oktaç, D., Aktürk, B., & Kabay, N. (2014). Properties of cement mortars reinforced with polypropylene fibers. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 32(2), 164-175.
- Portakal, Ö. F., Çalışkan, Ö., & Şenol, A. F. (2026). Çimentolu Harç ve Betonlarda Polipropilen Liflerin Performansı. *Mühendislik Çağdaş ve Yenilikçi Araştırmalar*, (Uö.). All Sciences Academy 58-68.
- Ramesh, B., Gokulnath, V., & Kumar, M. R. (2020). Detailed study on flexural strength of polypropylene fiber reinforced self-compacting concrete. *Materials Today: Proceedings*, 22, 1054-1058.
- Ramezani-pour, A. A., Esmaeili, M., Ghahari, S. A., & Najafi, M. H. (2013). Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical

- characteristic of concrete for application in sleepers. *Construction and Building Materials*, 44, 411-418.
- Rostami, R., Zarrebini, M., Sanginabadi, K., Mostofinejad, D., Abtahi, S. M., & Fashandi, H. (2020). An investigation into influence of physical and chemical surface modification of macro-polypropylene fibers on properties of cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 244, 118340.
- Şahin, Z. (2022). *Yüksek Dayanımlı Karma Lifli Betonların Yüksek Sıcaklık Performansı Üzerine Çimento Türü ve Lif Kombinasyonunun Etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Şenol, A. F., & Çalışkan, Ö. (2025). Recycling bio-waste into durable green mortars: Effects of eggshell powder on strength, microstructure, and durability. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 46, 102119.
- Şenol, A. F., & Çalışkan, Ö. (2026a). *Polipropilen Lifli Betonlarda Performans Değerlendirmesi: İşlenebilirlik, Mekanik Özellikler ve Dayanıklılık*. 6th International Conference on Trends in Advanced Research, Konya, Türkiye. S. 38-44.
- Şenol, A. F., & Çalışkan, Ö. (2026b). High-temperature mechanical performance and microstructural insights of polypropylene fiber-reinforced fly ash-slag geopolymer mortars. *Next Materials*, 13, 102737.
- Şimşek, O., Dur, A. ve Yaprak, H. (2004). Silis Dumanı ve Süperakışkanlaştırıcı Katkılı Harçların Özellikleri. *Politeknik Dergisi*, 7 (2), 169-179.
- Tanriöven, F. (2009). *Yüksek sıcaklık etkilerindeki karma lifli betonların mekanik özelliklerinin incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Tezel, O. O. (2010). *Farklı Tiplerdeki Çelik ve Polipropilen Liflerin Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda İşlenebilirliğe ve Mekanik Davranışa Etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Topcu, I. B., & Canbaz, M. (2007). Effect of different fibers on the mechanical properties of concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1486-1491.
- Topçu, A. Tarihçe: Çimento/Beton/Betonarme/Betonarme Yapılar/İnşaat Mühendisliği. [Erişim: 01.09.2026, https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/44269953/Betonarme_yapilar_tarihi_-_1756dan_gunumuze_-_Ahmet_Topcu_-_Esk_Osmangazi_Univ-libre.pdf?1459452781=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DTarihce_Cimento_Beton_Betonarme_Betonarm.pdf&Expires=1791102150&Signature=gHwPDm8MCVv4UQsmhM213Hzntxhg2oaBMSC0N5vTsL4wviYJGHkIjgW3tJurfZndV8vuhMXL36Mvm8CakdKsUyxLUCEmzVISnlkSyzRvAXW0lWcCt3DoymQwHFWsX83CL9ggthWkHOM3re8ZbyGt3FgYnsFY963OE-m~TkR4aIQv4kgLqcwYueqJOdlKJE3nK4vklSr2MrdCVzfui6v4EOiQL7Zfp2eDwXy0Rwson5rnuRDMZe0SbUxkjU3g4ELLSplfHYZ0oDhpvzbQ9aQNRZRt0t47~H7-YZcx6WSyIFeDVkuqBCrbfaWq878BkqZmtQuEDfaMUPNQSnqnOziUg_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- Topçu, İ. B., Demirel, O. E., & Uygunoğlu, T. (2017). Polipropilen lif katkılı harçların fiziksel ve mekanik özellikleri. *Politeknik Dergisi*, 20(1), 91-96.
- TSE, Türk Standartları Enstitüsü, *Kagir harçlar-Deney metotları- Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımı tayini*. Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü. 2019, TS EN 1015-11.
- TSE, Türk Standartları Enstitüsü, *Kagir Harcı Deney Metotları – Bölüm 3: Taze Harcın Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası ile)*. Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü. 2006, TS EN 1015-3/A2.

- TSE, Türk Standartları Enstitüsü, *Beton Deneyleri-Bölüm 4: Ultrasonik Atılımı Dalga Hızının Tayini*. Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü. 2021, TS EN 12504-4.
- TSE, Türk Standartları Enstitüsü, *Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri*. Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü. 2012, TS EN 197-1.
- TSE, Türk Standartları Enstitüsü, *Beton – Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk*. Türkiye: Türk Standartları Enstitüsü. 2021, TS EN 206+A2.
- Yaprak, H., Şimşek, O., & Öneş, A. (2004). Cam ve çelik liflerin bazı beton özelliklerine etkisi. *Politeknik Dergisi*, 7(4), 353-358.
- Yiğit, N. (2020). *Polipropilen lif boyutlarının asfalt aşınma tabakası taşıma kapasitesine etkilerinin incelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Sakarya.