

T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETONDA SENTETİK LİF  
KULLANIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

ALPER AVCIALP

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : Dr. Öğr. Üyesi Tamer BİROL (Tez Danışmanı)  
Doç. Dr. Altuğ YAVAŞ  
Dr. Öğr. Üyesi Serkan SAĞIROĞLU

BALIKESİR, ŞUBAT - 2024

## ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımda hazırlanan “**Ultra Yüksek Performanslı Betonda Sentetik Lif Kullanımının Mekanik Özelliklere Etkisi**” başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

**ALPER AVCIALP**

## ÖZET

**ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETONDA SENTETİK LİF  
KULLANIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ALPER AVCIALP  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ TAMER BİROL)**

**BALIKESİR, ŞUBAT - 2024**

Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) yüksek basınç ve çekme dayanımına, yüksek çatlak sonrası deformasyon kapasitesine ve üstün durabilite özelliklerine sahip yeni nesil bir lifli beton türüdür. Kullanılan lif içeriği UYPB'un bu üstün mekanik özelliklere ulaşmasında en önemli faktörlerden biridir. Çelik lifler yüksek dayanım ve rijitlik gibi avantajları nedeniyle UYPB'da en yaygın kullanılan lif tipi olmasına karşın korozyona maruz kalabilmeleri, yüksek özgül ağırlık ve yüksek maliyet gibi dezavantajlara sahiptir. Bu nedenle UYPB'da farklı lif tiplerinin kullanımı ile ilgili araştırmalar artış göstermiştir.

Bu çalışmada sentetik liflerin UYPB için kullanılabilirliğinin mekanik özellikler açısından araştırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla farklı hacimsel oranlarda makro Polipropilen lif içeren UYPB karışımlar üzerinde deneysel bir program hazırlanarak sentetik lif kullanımının UYPB'un mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Karışımların basınç ve yarmada çekme dayanımları küp ve silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilen eksenel basınç ve yarmada çekme testleri ile belirlenmiştir. Karışımların eğilme davranışının incelenmesi amacıyla çentikli kiriş numuneler üretilmiş ve üç noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Kirişlerin deneysel yük-sehim ve yük-çatlak ağzı açıklığı yerdeğiştirmesi ilişkileri elde edilerek eğilmede çekme dayanımı ve kırılma enerjisi parametreleri açısından sentetik liflerin eğilme davranışına katkısı değerlendirilmiştir. Kirişlerin çatlak davranışlarını ve kırılma durumlarını incelemek amacıyla testler sırasında iki boyutlu dijital görüntü korelasyonu uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak Polipropilen lif kullanımının UYPB'un basınç ve yarmada çekme dayanımına belirgin bir katkısının olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte hem eğilmede çekme dayanımı hem de kırılma enerjisi açısından önemli artışlar elde edilmiştir. Kirişlerin çatlak davranışı incelendiğinde Polipropilen liflerin UYPB'da etkin bir çatlak kontrolü sergileyebildiği belirlenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Ultra yüksek performanslı beton, sentetik lif, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme davranışı, dijital görüntü korelasyonu

## **ABSTRACT**

### **EFFECT OF SYNTHETIC FIBER USE ON MECHANICAL PROPERTIES OF ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE**

**MSC THESIS**

**ALPER AVCIALP**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**CIVIL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. TAMER BİROL )**

**BALIKESİR, FEBRUARY - 2024**

Ultra High Performance Concrete (UHPC) is a new generation of fiber reinforced concrete with high compressive and tensile strength, high post-cracking deformation capacity and superior durability. The fiber content is one of the most important factors in achieving these superior mechanical properties of UHPC. Although steel fibers are the widely used fiber type in UHPC due to their advantages such as high strength and stiffness, they have disadvantages such as being exposed to corrosion, high specific gravity, and high cost. For this reason, studies on the use of different fiber types have increased.

In this study, it is aimed to investigate the usability of synthetic fibers for UHPC in terms of mechanical properties. For this purpose, an experimental campaign was prepared on UHPC mixtures having macro polypropylene fibers with different volume ratios and the effects of synthetic fiber usage on the mechanical properties of UHPC were investigated. The compressive and splitting tensile strengths of the mixtures were determined by axial compression and splitting tensile tests on cube and cylinder specimens. In order to investigate the flexural behavior of the mixtures, notched beam specimens were produced and three-point flexural test were performed. The experimental load-deflection and load-crack mouth opening displacement relationships of the beams were obtained and the contribution of synthetic fibers to the flexural behavior was evaluated in terms of flexural tensile strength and fracture energy parameters. Two-dimensional digital image correlation was applied during the test to examine the crack behavior and fracture modes of the beams.

As a result, it was observed that the use of polypropylene fibers had no significant impact on the compressive and splitting tensile strength of UHPC. However, significant increases in both flexural tensile strength and energy absorption capacity were obtained, especially when high volumetric fiber ratios were used. When the cracking behavior of the beams was examined, it was determined that polypropylene fibers could exhibit an effective cracking control in UHPC.

**KEYWORDS:** Ultra high performance concrete, synthetic fiber, compressive strength, splitting tensile strength, flexural behavior, digital image correlation

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>iv</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>KISALTMA LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB).....	1
1.2 Sentetik Lifler .....	3
1.3 Ultra Yüksek Performanslı Beton’da Sentetik Liflerin Kullanımı ile İlgili Çalışmalar .	5
1.4 Çalışmanın amacı ve kapsamı.....	11
<b>2. DENEYSEL ÇALIŞMA</b> .....	<b>12</b>
2.1 UYPB’u Oluşturan Malzemeler ve Özellikleri .....	12
2.2 UYPB’un Üretimi ve Test Numunelerinin Hazırlanması .....	13
2.3 Test Düzenekleri ve Ölçüm Sistemleri .....	17
2.3.1 Eksenel Basınç ve Yarmada Çekme Test Düzenekleri .....	17
2.3.2 Üç Noktalı Eğilme Test Düzeneği .....	18
2.4 Dijital Görüntü Korelasyonu.....	19
<b>3. DENEYSEL ÇALIŞMANIN SONUÇLARI</b> .....	<b>24</b>
3.1 Eksenel Basınç ve Yarmada Çekme Test Sonuçları .....	24
3.2 Yarmada Çekme Test Sonuçları .....	25
3.3 Üç Noktalı Eğilme Testlerinin Sonuçları.....	26
3.3.1 Yük-Sehim Davranışı.....	26
3.3.2 Kırılma Enerjisi .....	31
3.3.3 Yük-ÇAAY davranışı.....	32
3.3.4 Dijital Görüntü Korelasyonu Sonuçları .....	41
<b>4. GENEL SONUÇLAR</b> .....	<b>49</b>
<b>5. KAYNAKLAR</b> .....	<b>51</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>63</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1: Farklı boyut ve geometride çelik lif tipleri (Hasgül vd., 2023).....	3
Şekil 1.2: Farklı sentetik lif tipleri. ....	5
Şekil 1.3: Farklı lif içerikleri için UYPB karışımlarının ilk çatlak dayanımları (Hannawi vd., 2016). ....	6
Şekil 1.4: UYPB karışımlarının hacimsel lif oranına göre yük-sehim grafikleri; a) %0, b) %1.5, c) %2.0, d) %2.5, e) %3.0, f) Toplu grafik (Mostofinejad vd., 2022).....	7
Şekil 1.5: %1.5 mikro naylon ve %0.5 makro polipropilen lif içeren UYPB kiriş numunesinin çatlak şekli (Medina vd., 2022).....	8
Şekil 1.6: Farklı mikro sentetik lif içeriklerinin UYPB'un eğilme davranışına etkisi (Yan vd., 2021). ....	9
Şekil 1.7: Farklı lif içeriklerine sahip UYPB kiriş numunelerinin yük-ÇAAY eğrileri ve eğilme dayanımı sonuçları; a) PVA, b) Cam, c) Çelik (Dehghanpour vd., 2022). ....	10
Şekil 1.8: Eksenel çekme ve eğilme davranışı için DGK analizi sonuçları (Yu vd., 2018).11	
Şekil 2.1: UYPB karışımını oluşturan malzemelerin boyut dağılımı. ....	12
Şekil 2.2: Çalışmada kullanılan makro polipropilen lifler. ....	12
Şekil 2.3: Panmikser ve döküm aracı. ....	14
Şekil 2.4: UYPB Karışımının Hazırlanma Aşamaları; a) Kuru karışım, b) Akışkan kıvam, c) Agrega ilavesi, d) Lif öncesi kıvam, e) Lif eklenmesi, f) Döküm.....	15
Şekil 2.5: a) Yayılma test düzeni, b) Yayılma ölçümü. ....	15
Şekil 2.6: Test numunelerinin üretimi; a) Beton dökümü, b) Döküm sonrası numuneler, c) Numunelerin kürlenmesi. ....	16
Şekil 2.7: Prizmatik kirişlere çentik uygulaması.....	17
Şekil 2.8: a) Eksenel basınç test düzeneği, b) Yarmada çekme test düzeneği. ....	17
Şekil 2.9: a) Üç noktalı eğilme düzeneği, b) Çatlak ağzı açıklığı ölçüm düzeneği. ....	18
Şekil 2.10: Prizmatik kirişlerin boyutları ve ölçer detayları. ....	19
Şekil 2.11: Referans ve hedef alt kümeler (Pérez vd., 2021). ....	20
Şekil 2.12: DGK analizi için seçilen bölgede yapılan benekleme. ....	22
Şekil 2.13: Kamera ve ışıklandırma ile DGK test kurulumu şekli.....	22
Şekil 3.1: Küp numunelerin hacimsel lif oranlarına göre kırılma şekilleri. ....	24
Şekil 3.2: Basınç dayanımının hacimsel lif oranı ile değişimi.....	25
Şekil 3.3: Silindir numunelerin kırılma şekilleri.....	25
Şekil 3.4: Yarmada çekme dayanımının hacimsel lif oranı ile değişimi. ....	26
Şekil 3.5: (a) Eksenel çekme altında yumuşama ve sertleşme davranışları; (b) Üç noktalı eğilme altında yumuşama ve sertleşme davranışları (Guo vd., 2022). ....	27
Şekil 3.6: Kirişlerin hacimsel lif oranlarına ( $V_f$ ) göre yük-sehim ( $P-\delta$ ) grafikleri. ....	28
Şekil 3.7: Karışımların hacimsel lif oranlarına ( $V_f$ ) göre ortalama yük-sehim ( $P-\delta$ ) grafikleri. ....	29
Şekil 3.8: $V_f=0\%$ için kirişlerin kırılma şekli. ....	29
Şekil 3.9: $V_f=0.5\%$ için kirişlerin çatlak şekli. ....	30
Şekil 3.10: $V_f=1.0\%$ için kirişlerin çatlak şekli. ....	30
Şekil 3.11: $V_f=1.5\%$ için kirişlerin çatlak şekli. ....	30
Şekil 3.12: $V_f=2.0\%$ için kirişlerin çatlak şekli. ....	30
Şekil 3.13: Hacimsel lif oranlarına göre $G_f$ değerlerinin değişimi; a) $G_{f,L}$ , b) $G_{f,maks}$ , c) $G_{f,5mm}$ .....	32

<b>Şekil 3.14:</b> $V_f=0.5$ için kirişlerin $P$ -ÇAAY grafikleri ve test sonundaki çatlak şekilleri.	33
<b>Şekil 3.15:</b> $V_f=1.0$ için kirişlerin $P$ -ÇAAY grafikleri ve test sonundaki çatlak şekilleri.	33
<b>Şekil 3.16:</b> $V_f=1.5$ için kirişlerin $P$ -ÇAAY grafikleri ve test sonundaki çatlak şekilleri.	34
<b>Şekil 3.17:</b> $V_f=2.0$ için kirişlerin $P$ -ÇAAY grafikleri ve test sonundaki çatlak şekilleri.	34
<b>Şekil 3.18:</b> Kirişlerin hacimsel lif oranlarına göre $P$ -ÇAAY grafikleri.	35
<b>Şekil 3.19:</b> Karışımların ortalama $P$ -ÇAAY grafikleri.	36
<b>Şekil 3.20:</b> Lifli betonun eğilme davranışı için karakteristik noktalar (Model Code 2010).	37
<b>Şekil 3.21:</b> Model Code 2010'a göre hesaplanan karakteristik eğilme dayanımlarının hacimsel lif oranlarına göre grafiksel gösterimi.	39
<b>Şekil 3.22:</b> Hacimsel lif oranlarına göre dayanım değişimleri.	40
<b>Şekil 3.23:</b> Gom Correlate (2019) yazılımı ile 2B-DGK analizi sonucu ÇAAY değerlerinin ölçümü.	41
<b>Şekil 3.24:</b> $V_f=0.5$ lif için kirişlerin Zaman-ÇAAY grafikleri.	42
<b>Şekil 3.25:</b> $V_f=1.0$ için kirişlerin ÇAAY-zaman grafikleri.	42
<b>Şekil 3.26:</b> $V_f=1.5$ lifli kirişlerin ÇAAY-zaman grafikleri.	43
<b>Şekil 3.27:</b> $V_f=2.0$ lifli kirişlerin ÇAAY-zaman grafikleri.	43
<b>Şekil 3.28:</b> Gom Correlate 2019 yazılımı ile 2B-DGK analizi sonucu çatlak incelemesi.	44
<b>Şekil 3.29:</b> $V_f=0.5$ lifli kirişlerin DGK ile elde edilen çatlak davranışı.	45
<b>Şekil 3.30:</b> $V_f=1.0$ lifli kirişlerin DGK ile elde edilen çatlak davranışı.	46
<b>Şekil 3.31:</b> $V_f=1.5$ lifli kirişlerin DGK ile elde edilen çatlak davranışı.	47
<b>Şekil 3.32:</b> $V_f=2.0$ lifli kirişlerin DGK ile elde edilen çatlak davranışı.	48

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 2.1:</b> Makro Polipropilen liflerin özellikleri. ....	13
<b>Tablo 2.2:</b> UYPB Karışımını Oluşturan Malzemeler ve Oranları (kg/m <sup>3</sup> ). ....	13
<b>Tablo 2.3:</b> UYPB karışımları için ölçülen ortalama yayılma değerleri. ....	16
<b>Tablo 3.1:</b> Eksenel basınç testlerinin sonuçları. ....	24
<b>Tablo 3.2:</b> Yarmada çekme testlerinin sonuçları. ....	26
<b>Tablo 3.3:</b> Karışımların ortalama kırılma enerjileri ( $G_f$ ). ....	31
<b>Tablo 3.4:</b> Karışımların ortalama $P$ -ÇAAY davranışına ait karakteristik değerler. ....	37





## SEMBOL LİSTESİ

$b$	: Kiriş enkesit genişliği
$f_c$	: Karakteristik basınç dayanımı
$f_{ct}$	: Yarmada çekme dayanımı
$f_R$	: Eğilmede çekme dayanımı
$g$	: Yerçekimi ivmesi ( $m/sn^2$ )
$G_f$	: Kırılma enerjisi
$h_{sp}$	: Kiriş açıklık ortasında çentiğin ucu ile numunenin üst kısmı arasındaki mesafe
$l$	: Numune boyu
$D$	: Numune çapı
$m$	: Kütle
$P$	: Yük
$P_j$	: $j=1,2,3,4$ için yük değeri
$V_f$	: Hacimsel lif oranı
$\epsilon_x$	: Birim şekildeğiştirme
$\delta$	: Sehim
$w_0$	: Yük-sehim grafiği altında kalan alan

## KISALTIMA LİSTESİ

<b>BF</b>	: Bazalt Lif
<b>ÇAAY</b>	: Çatlak Ağız Açıklığı Yerdeğiştirmesi
<b>ÇEK</b>	: Çimento Esaslı Kompozit
<b>DGK</b>	: Çimento Esaslı Kompozit
<b>2B-DGK</b>	: İki Boyutlu Dijital Görüntü Korelasyonu
<b>GF</b>	: Cam Lifi
<b>KSD</b>	: Kullanılabilirlik Sınır Durumu
<b>PE</b>	: Polietilen
<b>PP</b>	: Polipropilen
<b>PVA</b>	: Polivinil Alkol
<b>TGSD</b>	: Taşıma Gücü Sınır Durumu
<b>UYPB</b>	: Ultra Yüksek Performanslı Beton
<b>UYP-ÇEK</b>	: Ultra Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozit



## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez konumun belirlenmesinde, çalışma sürecinde, yazım kısmında ve tezin her adımında yol gösterici öneri ve tavsiyeleriyle bilgi ve tecrübelerini aktararak her zaman desteğini esirgemeyen tez danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Tamer BİROL'a, tez çalışmalarında yardımlarını ve kıymetli tecrübelerini aktaran Doç. Dr. Altuğ YAVAŞ'a, tez kapsamında yapılan tüm testlerde her zaman yanımda olan İnşaat Mühendisi Aytaç AYGEN'e, tez yazım süreci boyunca destek veren ve üzerimde çok büyük emekleri olan sevgili ailem Murat AVCIALP ve Nihal AVCIALP'e teşekkürü bir borç bilirim.

**Balıkesir, 2024**

**Alper AVCIALP**



# 1. GİRİŞ

## 1.1 Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB)

Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB)'un geliştirilmesi, beton teknolojisini geliştirmesi açısından en önemli adımlardan biri olarak kabul edilmektedir. UYPB çok yüksek basınç dayanımı, yüksek çekme dayanımı, süneklik ve üstün durabilite özellikleri nedeniyle popüler hale gelmiştir (Richard ve Cheyrezy, 1995; Fang vd., 2011; Wille vd., 2011; Wille vd., 2014; Fang vd., 2020; Shen ve Brühwiler, 2020; Ding vd., 2022). UYPB, çimento, tamamlayıcı malzemeler, agrega, su, süperakışkanlaştırıcı katkı ve lif gibi malzemelerden oluşan çok yüksek dayanımlı bir lifli betondur. UYPB'da çok sıkı bir iç yapı elde edilebilmek amacıyla katı malzemelerin boyut ve miktarları doldurma yoğunluğu teorisine (*packing density*) göre tasarlanmakta ve su/bağlayıcı oranı çok düşük ( $\leq 0.20$ ) tutulmaktadır. UYPB matrisinin tasarımında anahtar parametreler boşluk miktarının azaltılması, mikro iç yapının iyileştirilmesi ve homojen bir lif dağılımının sağlanması olarak öne çıkmaktadır (Shi vd., 2015). Bu faktörler UYPB'da kullanılan tamamlayıcı malzemeler ve lif içeriği ile yakından ilişkilidir.

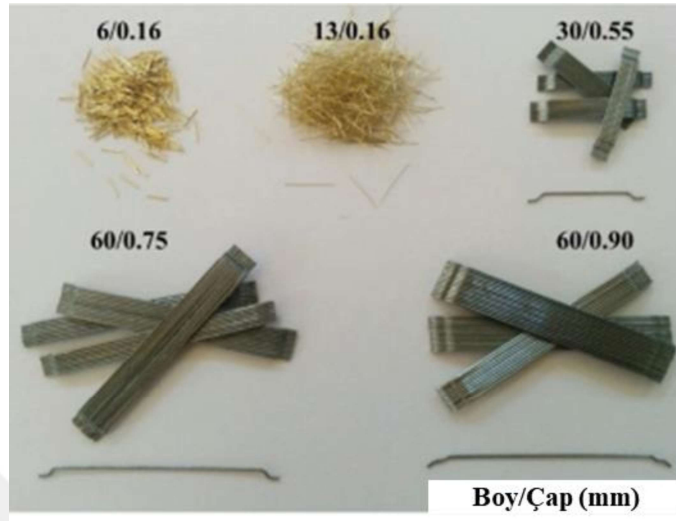
Çimentonun kalitesi ve sınıfının seçimi betonu oluşturan malzemeler içerisinde özellikle yüksek dayanımlı beton karışımlarında olduğu gibi UYPB için de en önemli faktördür. Çok yüksek dayanımlar söz konusu olduğunda, çimentonun miktarı ve cinsi beton basınç dayanımını diğer tüm bileşenlerden daha fazla etkilemektedir. Çimento hamurundaki normal kıvam su ihtiyacını belirlemektedir. Genellikle en yüksek su ihtiyacının en düşük basınç dayanımıyla sonuçlandığı yapılan çalışmalarda gözlemlenmiştir. Dayanım için başlıca parametrelerden biri olan su/bağlayıcı oranı aynı zamanda işlenebilirliği ve tamamlayıcı maddeler ve katkıları ile uyumu belirlemektedir (Ahmad vd., 2021).

Silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, kireç taşı tozu gibi nano boyutlu malzemeler çimentoya ek olarak UYPB'un bağlayıcı kısmında kullanılan tamamlayıcı malzemelerdir. Bu malzemeler çeşitli oranlarda çimento ile ikame edilerek hem yüksek çimento dozajının olumsuz etkileri bertaraf edilmekte, hem de yüksek sıklıkta bir iç yapı oluşturulabilmektedir (Yazıcı, 2007; Yu vd., 2015; Chen vd., 2019). Silis dumanı, UYPB için en yaygın kullanılan tamamlayıcı malzemelerinden biridir. Silis dumanının partikül boyutu 0.1 ila 1  $\mu\text{m}$  arasında değişmektedir. Beton matrisinde taneciklerin arasını doldurması ve yüksek puzolanik reaktivitesi nedeniyle düşük gözenekli ve sıkı bir iç

yapının oluşmasından ana unsur olmaktadır (Chan ve Chu, 2004; Mazloom vd., 2004; Behnood ve Ziari, 2008). Bununla birlikte optimum dozun iyi ayarlanması gerekmektedir. Yüksek dozlarda kullanılması sonucu seyreltme etkisi nedeniyle alkali-silika reaksiyonuna neden olabilmektedir. Yapılan araştırmalar, UYPB karışımında kullanılan tipik silis dumanı içeriğinin çimentolu esaslı malzemelerin kütlesine göre yaklaşık %20-30 olduğunu göstermiştir (Zhang vd., 2018). UYPB’da çokça kullanılan bir diğer tamamlayıcı malzeme partikül boyutu 1 ila 100 µm arasında değişen yüksek fırın cürufudur. Oksitlenmiş tane yüzeyine bağlı olarak UYPB’un çekme davranışını ve işlenebilirliğini iyileştirmek için kullanılmaktadır. Agreganın şekli ve yüzey dokusu, agreganın mineralojisi ile birlikte beton için gereken toplam karışım suyunu etkileyen faktörlerden biridir. Bu nedenle, betonun dayanımda önemli bir rol oynamaktadır. Betona akışkanlığına katkı sağladığı ve nihai karışımın viskozitesini azalttığı için agreganın incelik modülünün 2.8-3.0 arasında olması tavsiye edilmektedir (Ullah vd., 2022).

Betonarme yapı tasarımımda UYPB, sahip olduğu gelişmiş mekanik özellikler yanında üstün durabilitesi açısından da tercih edilmektedir. Yüksek yapılar, büyük açıklıklı köprüler, sanayi yapıları, güvenlik yapıları gibi özel mühendislik yapıları ile kompleks yüklenme koşulları (*evrimsel, darbe, yorulma* vb.) altındaki yapılar için yüksek dayanımla birlikte yüksek süneklik önemli bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır (Yu vd., 2016; Hasgöl vd., 2018; Li vd., 2018; Türker vd., 2019; Zhu vd., 2022). Basınç ve çekme etkisi altında sağladığı yüksek şekildeğiştirme kapasitesi ve etkin çatlak kontrolü nedeniyle UYPB’da çoğunlukla yüksek dayanımlı kısa elik lifler kullanılmaktadır (Wille vd., 2014; Shen ve Brühwiler, 2020; Lao vd., 2022). Farklı boyut ve geometride elik lifler örnek olarak şekil 1.1’de gösterilmiştir. elik liflerin yüksek dayanımları ve elastisite modülleri nedeniyle diğer lif tiplerine kıyasla basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme davranışı ve süneklik gibi mekanik özelliklerde daha iyi performans gösterdiği görölmüştür (Song ve Hwang, 2004). elik lifler sağladıkları avantajları nedeniyle UYPB’da en yaygın kullanılan lif tipi olmasına karşın korozyona maruz kalabilmeleri, yüksek özgül ağırlıkları ve yüksek maliyet gibi dezavantajlara sahiptir (Yoo vd., 2020; Du vd., 2021). Kim vd. (2008) alışmalarında hacimce %1 oranında elik lifin maliyetinin tüm karışımın maliyetinden fazla olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca elik, üretimi çevreye zarar veren ve yüksek sera gazı emisyonuna sebep olan malzemelerden biri olarak sınıflandırılmaktadır (Alawi ve Mashrei, 2022). Bu dezavantajları nedeniyle lifli betonlarda elik liflere alternatif olarak Poliölefin, Polietilen (PE), Polipropilen (PP), Polivinil Alkol (PVA),

Aramid gibi sentetik liflerin kullanımını araştırma konusu olmuştur (Hsie vd., 2008; Aslani ve Nejadi, 2013; Banthia vd., 2014; Lee vd., 2016; Li vd., 2018; Gong vd., 2022).



**Şekil 1.1:** Farklı boyut ve geometride çelik lif tipleri (Hasgöl vd., 2023).

## 1.2 Sentetik Lifler

Genellikle kimyasal ekstraksiyon yöntemleri kullanılarak sentezlenen polimerlerden elde edilen sentetik lifler, çelik liflere kıyasla yüksek korozyon direnci, hafiflik ve düşük maliyet gibi avantajlara sahiptir (Rambo vd., 2014; Pajak vd., 2019; Soltanzadeh vd., 2019; Alberti vd., 2020a; Ansari rad vd., 2020). Polipropilen (PP), Polietilen (PE) ve Polivinil Alkol (PVA) gibi sentetik lifler, çelik liflere göre daha düşük çekme dayanımına ve elastisite modülünü sahiptir (Şekil 1.2). Bu nedenle UYPB'un basınç ve çekme dayanımına çelik life kıyasla sınırlı katkı sağlayabilmektedirler. Bununla birlikte sentetik liflerin betonun sünekliğini önemli ölçüde arttırdığı yapılan çalışmalardan görülmektedir (Gong vd., 2022). Sentetik liflerin çekme altındaki davranışı çelik liflerden belirgin şekilde farklıdır. Örnek olarak yüksek kimyasal yapışma özelliğine sahip PVA lifler çevresindeki matrisin lifi koparacak kadar güçlü olması nedeniyle çelik lifler gibi sıyrılmak yerine ciddi şekilde kırıldığı, bunun sonucunda dayanım artışına lif katkısının sınırlı kaldığı görülmüştür (Yu vd., 2019).

PE ve PP lifler hidrofobik, PVA liflerin ise hidrofilik olduğu bilinmektedir. PE ve PP lifler suyun beton matrisinin iç boşluğuna girmesini engellerken, aynı zamanda liflerin yüzeyine daha fazla hava kabarcığı bağlayarak gözenekli bir arayüz arası geçiş bölgesine yol açabilmektedir. Ayrıca, lif miktarının veya uzunluğunun artması liflerin kümelenmesine

yol açarak betonun işlenebilirliğin azalmasına, lokal zayıf alanların oluşmasına ve deformasyon yumuşaması (*strain softening*) davranışına neden olabilmektedir (Hannawi vd., 2016; Li vd., 2019; Oh vd., 2021; Gong vd., 2022). Betonun işlenebilirliği tüm lif tipleri için genel olarak lif miktarının artmasına bağlı olarak düşüş göstermektedir (Ghasemzadeh Mosavinejad vd., 2020; Pei vd., 2021). Bu nedenle, sentetik liflerin eklendiği UYPB'un özellikle basınç dayanımında çelik liflerinkine kıyasla azalama olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte yapılan çalışmalarda makro PP liflerin yük taşıma kapasitesine ve çatlak direncine olumlu etkilerini destekler nitelikte sonuçlar elde edilmiş, makro PP liflerin betonun çatlak sonrası dayanımını ve enerji yutma kapasitesini arttırdığı görülmüştür (Cengiz ve Turanlı, 2004; Hsie vd., 2008; Reddy ve Subramaniam, 2017a; Reddy ve Subramaniam, 2017b). PP liflerin elastisite modüllerinin çelik liflere göre düşük olması nedeniyle (4 ila 10 GPa) çelik liflere benzer performansların elde edilebilmesi için yüksek oranlarda kullanılması gerekmektedir (Banthia ve Sappakittipakorn, 2007). Polipropilenin (PP) yüksek erime noktası, nötr hidrofobik yapısı ve alkali ortam stabilitesi gibi betonda kullanımı için uygun özellikleri nedeniyle lif takviyesi olarak kullanılmak için ideal bir seçim olarak ortaya çıkmaktadır. Diğer sentetik liflere benzer şekilde, PP'in kristal oluşumuna izin veren mikro yapısı sonucu kimyasal direnç ve termal stabilite arasında dengeli bir ilişkiye sahiptir (Zheng ve Feldman, 1995). Makro sentetik PP lifler, kimyasal olarak inert ve ayrışması zor yapıda olduğundan alkalilere, tuzlara ve korozyona karşı yüksek dirence sahiptir. PP liflerin bir diğer önemli özelliği ise çelik liflerin yaklaşık olarak %12'sine karşılık gelen düşük ağırlıklarındır. Diğer sentetik liflerde olduğu gibi topaklanmayı önlemek ve homojen dağılımını sağlamak amacıyla düşük hacimsel oranlarda (tercihen %1'den az) kullanılmaktadır. Tüm bunlara ek olarak PP lifler üretim kolaylıkları ile öne çıkmaktadır (Alberti vd., 2020b)



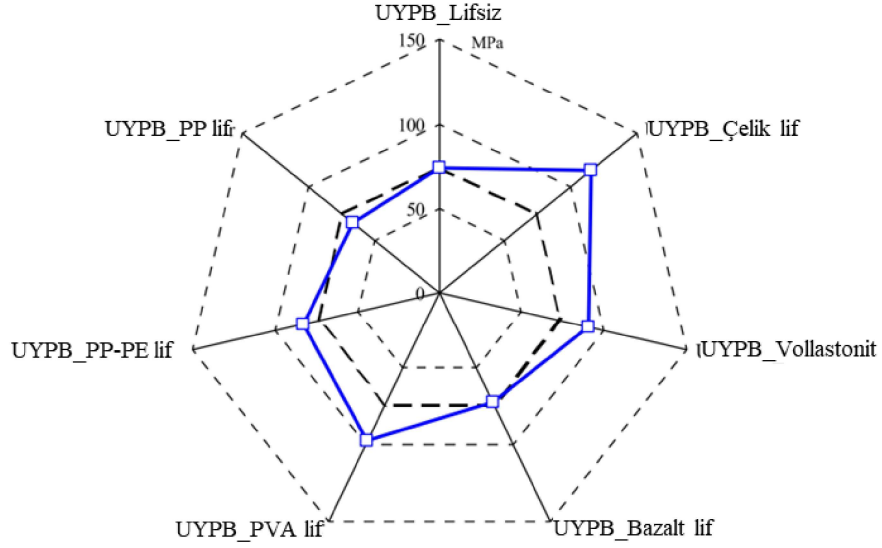
**Şekil 1.2:** Farklı sentetik lif tipleri.

### **1.3 Ultra Yüksek Performanslı Beton’da Sentetik Liflerin Kullanımı ile İlgili**

#### **Çalışmalar**

Hannawi vd. (2016) çalışmalarında farklı lif türlerinin Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB)'nin mikroyapısı ve mekanik özellikleri ve çatlak davranışı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. UYPB’ya hacimce %1 oranında eklenen lifler malzeme (*çelik, sentetik ve mineral*) ve boyut (*mikro ve makro*) açısından farklılık göstermektedir. Deneysel sonuçlar, yüksek rijitliği nedeniyle dayanımda belirgin artış sağlayan çelik lif dışında diğer lif türlerinin betonun basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Lif ilavesi sonucu tepe yüküne karşılık gelen yanıl deformasyonların önemli ölçüde azaldığı ve ilk çatlama ile kararsız çatlama dayanımının arttığı görülmüştür (Şekil 1.3). Bununla birlikte, lif kullanımı sonucu betonun çatlama davranışı belirgin şekilde sınırlanmıştır.



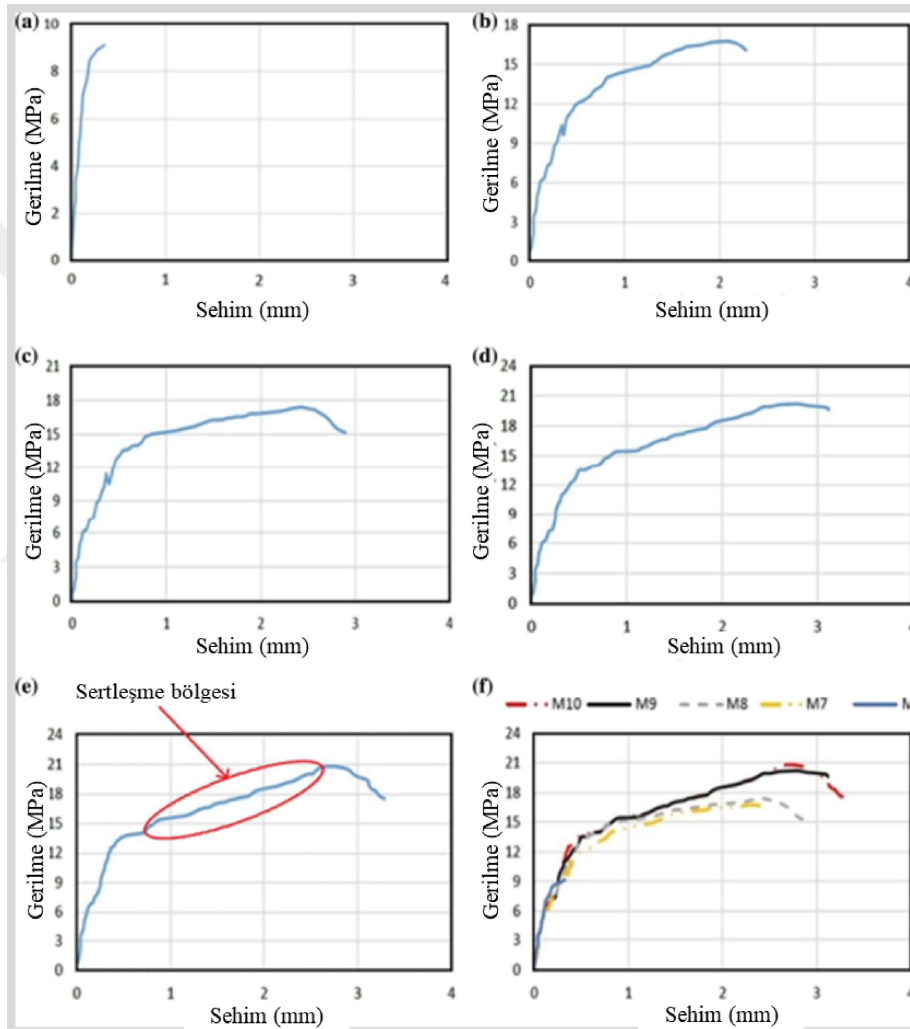


**Şekil 1.3:** Farklı lif içerikleri için UYPB karışımlarının ilk çatlak dayanımları (Hannawi vd., 2016).

Ghasemzadeh Mosavinejad vd. (2020) farklı hacimsel oranlarda mikro PVA liflerin UYPB'un mekanik ve durabilite özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmada %0, %0.3, %0.6, %0.9 ve %1.2 hacimsel lif oranları kullanılarak farklı silis dumanı içerikleri ve farklı kür koşulları altında UYPB karışımlar hazırlanmıştır. Sonuç olarak PVA lif içeriğinin eğilme dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Lif miktarı arttıkça eğilme dayanımında da artış göstermiştir. Lif içermeyen kontrol karışımı ile hacimce %1.2 PVA lif içeren karışımın sonuçları karşılaştırıldığında dayanımın yaklaşık %30 oranında arttığı belirlenmiştir. Bununla birlikte çalışmada kullanılan PVA lif oranlarının UYPB'un basınç dayanımına belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Mostofinejad vd. (2022) çalışmalarında polimer liflerin karma (*hibrit*) olarak kullanılmasının çalışmada geliştirilen UYPB'un mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Çalışmada PVA ve modifiye edilmiş PP lifler farklı hacimsel oranlarda beton matrisini eklenerek karışımlar oluşturulmuştur. Test numunelerinin aksenal basınç ve dört notalı eğilme testleri gerçekleştirilmiş ve karma sentetik lif kullanılarak UYPB'un nihai dayanım, tokluk ve enerji yutma kapasitesinin geliştirilme potansiyeli araştırılmıştır. Çalışma sonucunda lifli UYPB karışımları, lifsiz UYPB'a kıyasla daha yüksek ilk çatlak ve eğilme dayanımı sergilediği görülmüştür. Eğilme dayanımındaki en büyük artış %128 olarak hacimce %3 oranında sentetik lif ilavesi ile elde edilmiştir. Buna ek olarak, lifli

UYPB karışımlarında eğilmede şekildeğiştirme sertleşmesi (*strain hardening*) davranışı elde edilmiştir (Şekil 1.4). Bu sonuç sentetik liflerin kullanılmasıyla betonun çatlama sonrası yük taşıma kapasitesi artarken aynı zamanda daha fazla deformasyon yapabildiğini göstermektedir. Hacimsel lif oranının %2'ye çıkarılması tokluk indeksi değerlerinden önemli artışlar meydana getirmiştir. Çalışmadan elde edilen veriler PVA ve PP liflerin karma olarak kullanımında UYPB için dayanım ve süneklik açısından optimum lif oranının %2 olduğunu göstermiştir.



**Şekil 1.4:** UYPB karışımlarının hacimsel lif oranına göre yük-sehim grafikleri; a) %0, b) %1.5, c) %2.0, d) %2.5, e) %3.0, f) Toplu grafik (Mostofinejad vd., 2022).

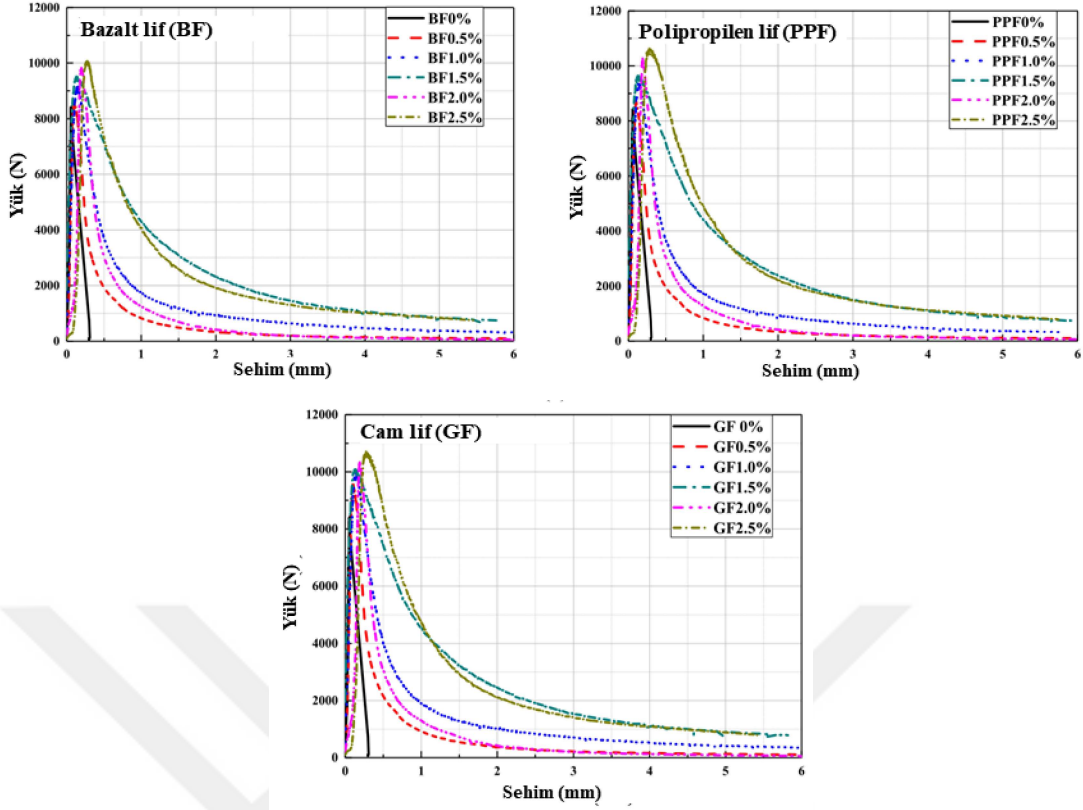
Medina vd. (2022) deneysel çalışmalarında yerel olarak temin edilebilen düşük maliyetli sentetik lif kullanarak önceden optimize edilmiş geri dönüştürülmüş camın kullanıldığı UYPB'un eğilme altındaki davranışının incelenmesi amaçlamışlardır. Ayrıca, sentetik liflerin performansının değerlendirilebilmesi için karşılaştırmalarda kullanılmak amacıyla

yüksek dayanımlı çelik lifli karışımlarda da hazırlanmıştır. Deneysel program kapsamında biri PP vderi PE olmak üzere iki makro sentetik lifin yanı sıra biri PVA vderi naylon olmak üzere iki mikro sentetik lif türü de dahil olmak üzere yaygın olarak temin edilebilen toplam dört tip lif kullanılmıştır. Her bir lif kombinasyonu için üç adet 40×40×160 mm prizmatik kiriş hazırlanmış ve üç noktalı eğilme altında test edilmiştir. Genel olarak mikro sentetik liflerin kullanılması ile daha yüksek ilk çatlak dayanımları elde edilirken, makro sentetik liflerin sehim sertleşmesi davranışı sağlamalarına rağmen ilk çatlak dayanımı azalttığı görülmüştür. Makro PP lif içeriği hacimce %2 olan numuneler tüm sentetik lifli UYPB numuneler içerisinde hem taze hem de sertleşmiş beton özellikleri bakımından en iyi performansı göstermiştir (Şekil 1.5).



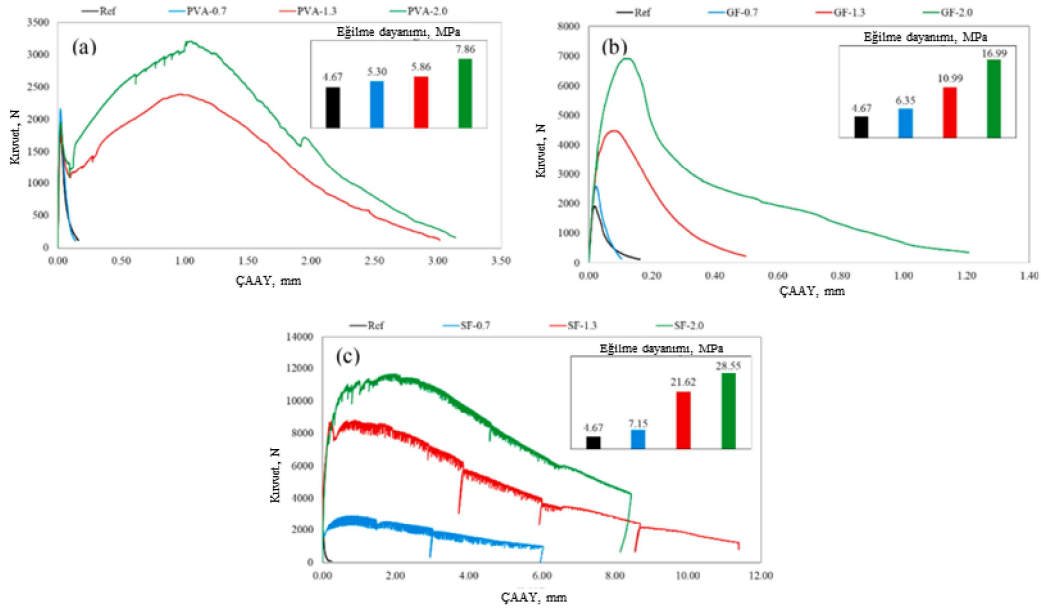
**Şekil 1.5:** %1.5 mikro naylon ve %0.5 makro polipropilen lif içeren UYPB kiriş numunesinin çatlak şekli (Medina vd., 2022).

Yan vd. (2021) bazalt, PP ve cam gibi mikro sentetik liflerin kullanıldığı UYPB'un süneklik özelliklerini araştırdıkları çalışmalarında farklı oranlarda lif içeren UYPB karışımların eğilme davranışına ait parametreleri incelemişlerdir. Kontrol numunesi (lifsiz) ile karşılaştırıldığında, hacimce %2.5 oranında bazalt, PP ve cam lif içeren numunelerin eğilme dayanımı sırasıyla %20.8, %26.9 ve %27.9 oranında arttığı görülmüştür. Bazalt, PP ve cam lif katkılı UYPB numunelerinin tokluk indeksleri, kontrol numunelerine kıyasla sırasıyla yaklaşık 4.64, 4.75 ve 4.86 kat daha yüksek elde edilmiştir. Yük-sehim grafikleri karşılaştırıldığında hacimce %2.5 cam lif katkılı UYPB'da en yüksek tepe yükü elde edilirken bunu PP ve bazalt içeren numuneler takip etmiştir (Şekil 1.6).



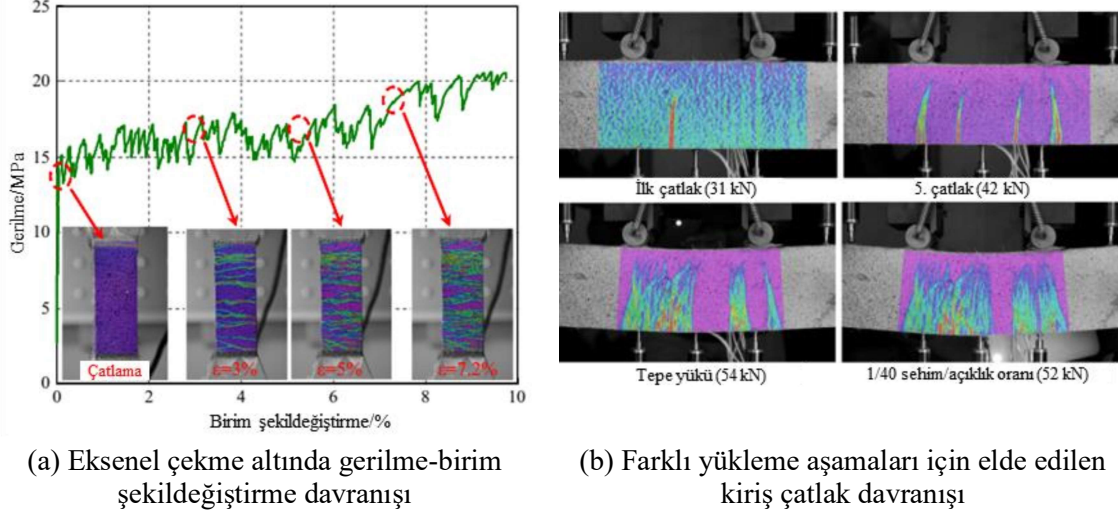
**Şekil 1.6:** Farklı mikro sentetik lif içeriklerinin UYPB'un eğilme davranışına etkisi (Yan vd., 2021).

Dehghanpour vd. (2022) çalışmalarında farklı hacimsel oranlarda (%0, %0.7, %1.3 ve %2) PVA, cam ve çelik liflerle takviye edilmiş UYPB karışımlar üzerinde mekanik, fiziksel, dinamik ve mikroyapı analizleri gerçekleştirmişlerdir. UYPB karışımlarının kırılma enerjisi, yutulan enerji, eğilme dayanımı, çatlama direnci ve süneklik indeksi parametrelerini araştırmak amacıyla çentikli prizmatik kirişler üzerinde eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Eğilme test sonuçlarına göre, en iyi yük-çatlak ağzı açıklığı yerdeğiştirmesi (ÇAAY) değerleri hacimce %2.0 lif içeren UYPB numuneler için elde edilmiştir. Benzer şekilde maksimum eğilme dayanımı, sönmülenen enerji, tepe yükü, kırılma enerjisi değerleri de yine bu lif oranına sahip numunelere aittir. Eğilme davranışı üzerinde en iyi performansı çelik lifler sağlarken onu sırasıyla cam lif ve PVA lif takip etmiştir (Şekil 1.7). Bununla birlikte PVA lifin beton matrisi ile adersınının daha yüksek olması ve daha esnek olması nedeniyle ÇAAY değerini cam life kıyasla iki kattan daha fazla arttırdığı belirlenmiştir.



**Şekil 1.7:** Farklı lif içeriklerine sahip UYPB kiriş numunelerinin yük-ÇAAY eğrileri ve eğilme dayanımı sonuçları; a) PVA, b) Cam, c) Çelik (Dehghanpour vd., 2022).

Yu vd. (2018) deformasyon sertleşmesi ve çoklu çatlak özellikleri ile harç matrisinin yüksek dayanımını bir araya getiren ultra yüksek performanslı çimento esaslı kompozit (UYP-ÇEK) üretimini amaçladıkları çalışmalarında hacimce %2 oranında ultra yüksek moleküler ağırlıklı PE lif kullanmışlardır. Üretilen betonun performansı çekme gerilme-birim şekildeğiştirme ilişkisi, basınç dayanımı ve elastisite modülü ile eğilme davranışı parametreleri açısından incelenmiştir. Çekme ve eğilme testleri sırasında numunelerin çatlak davranışını izlemek için dijital görüntü korelasyonu (DGK) tekniği kullanılmıştır. Numunelerinin aksel çekme altında ortalama dayanımı %6 varyasyon katsayısı (COV) ile 17.42 MPa'ya yaklaşırken buna karşılık %8.17 birim şekildeğiştirme kapasitesi elde edilmiştir. Ortalama ilk çatlak dayanımı ise 10.3 MPa olarak elde edilmiştir (COV %5). UYP-ÇEK'in aksel gerilme altında kırılma enerjisi 1500 kJ/m<sup>3</sup>'ü aşan değerlerde elde edilmiştir. Ortalama basınç dayanımı ise 100 mm boyutlu küp numunelerde 112.69 MPa olarak ölçülmüştür. UYP-ÇEK kirişlerinin ortalama eğilme dayanımı ile 27.68 MPa'ya ulaşmış ve buna karşılık serbest kiriş açıklığının yaklaşık %2.5'i gibi yüksek sehim değerleri elde edilmiştir (Şekil 1.8).



**Şekil 1.8:** Eksenel çekme ve eğilme davranışı için DGK analizi sonuçları (Yu vd., 2018).

#### 1.4 Çalışmanın amacı ve kapsamı

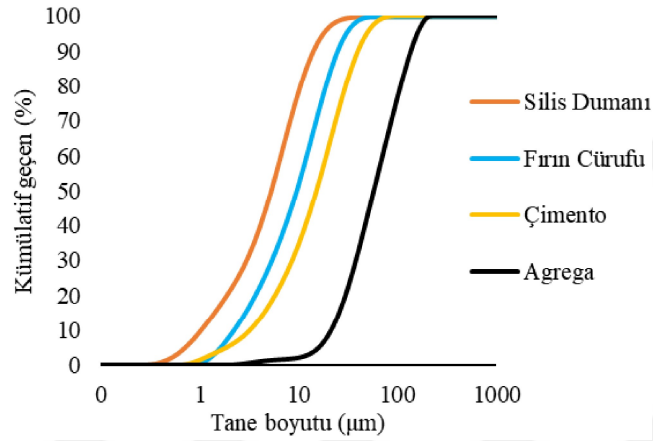
Geleneksel lifli betonlar ile ilgili çalışmalar incelendiğinde sentetik liflerin tek başına ya da diğer lif tipleri ile karma (*hibrit*) olarak kullanılmasıyla ilgili pek çok çalışma yapılmasına karşın Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) için yapılan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada sentetik liflerin UYPB’da kullanılabilirliğinin mekanik özellikler açısından araştırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla farklı hacimsel oranlarda Polipropilen (PP) lifli UYPB karışımlar üzerinde deneysel bir program hazırlanarak sentetik lif kullanımının UYPB’un mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

UYPB karışımların basınç ve yarmada çekme dayanımları küp ve silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilen eksenel basınç ve yarmada çekme testleri ile belirlenmiştir. Karışımların eğilme davranışının incelenmesi amacıyla çentikli kiriş numuneler üretilmiş ve üç noktalı yükleme altında test edilmiştir. Kirişlere ait deneysel yük-sehim ve yük-çatlak ağız açıklığı yer değiştirmesi ilişkileri elde edilerek eğilmede çekme dayanımı ve kırılma enerjisi parametreleri açısından sentetik liflerin UYPB’un eğilme davranışına katkısı değerlendirilmiştir. Kirişlerin çatlak davranışlarının ayrıntılı olarak incelenmesi amacıyla testler sırasında yüksek çözünürlükte görüntüler alınarak iki boyutlu dijital görüntü korelasyonu yöntemi uygulanması gerçekleştirilmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 2.1 UYPB’u Oluşturan Malzemeler ve Özellikleri

Çalışmada kullanılan UYPB karışımındaki kuru malzemeler CEM I 42.5 sınıf çimento, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve kuvars kumudur. Kuru malzemelerin parçacık boyut analizleri yapılmış ve boyut dağılım eğrileri Şekil 2.1’de sunulmuştur. Çimentonun parçacık boyut aralığı 1.0-86  $\mu\text{m}$ , silis dumanının 0.4-46  $\mu\text{m}$ , yüksek fırın cürufunun 1.1-51  $\mu\text{m}$  iken kuvars kumunun 2.2-200  $\mu\text{m}$  arasında olduğu belirlenmiştir.



Şekil 2.1: UYPB karışımını oluşturan malzemelerin boyut dağılımı.

UYPB karışımlarında sentetik lif olarak makro Polipropilen (PP) lif kullanılmıştır (Şekil 2.2). Lifler beton ile aderansın artırılması amacıyla kabartmalı yüzeye sahiptir. PP life ait karakteristik özellikler Tablo 2.1’de sunulmuştur.



Şekil 2.2: Çalışmada kullanılan makro polipropilen lifler.

**Tablo 2.1:** Makro Polipropilen liflerin özellikleri.

Yoğunluk (gr/cm <sup>3</sup> )	Boy (mm)	Çap (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
0.91	48	0.72	550	8.5

Çalışmada göz önüne alınan 5 farklı hacimsel lif oranı ( $V_f$ ) için karışımlara ait malzeme içerikleri ve oranları Tablo 2.2’de sunulmuştur. Lifsiz Referans UYPB karışımı R ile kodlanırken lifli UYPB karışımları için L kodu kullanılmış ve yanında hacimsel lif oranı sayı ile gösterilmiştir. Örnek olarak L0.5 kodlu karışım hacimce %0.5 oranında makro PP lif içeren UYPB karışımını temsil etmektedir. Karışımların su/bağlayıcı oranlarının 0.2’nin altında olması hedeflenmiştir. İşlenebilirliğinin sağlanabilmesi amacıyla polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır.

**Tablo 2.2:** UYPB karışımını oluşturan malzemeler ve oranları (kg/m<sup>3</sup>).

Karışım	R	L0.5	L1.0	L1.5	L2.0
Çimento	700	700	700	700	700
Silis Dumanı	170	170	170	170	170
Fırın Cürufu	300	300	300	300	300
Agrega	1032	1015	1005	992	978
Su	200	200	200	200	200
Katkı	17	17	17	17.4	17.8
Lif	0	4.5	9	13.5	18
Lif (Hacimce %)	0	0.5	1.0	1.5	2.0

## 2.2 UYPB’un Üretimi ve Test Numunelerinin Hazırlanması

UYPB’un hazırlanmasında 100 dm<sup>3</sup> karıştırma kapasiteli bir panmikser ve betonun kalıplara aktarımında kullanılmak üzere özel olarak tasarlanmış bir döküm aracı kullanılmıştır (Şekil 2.3).



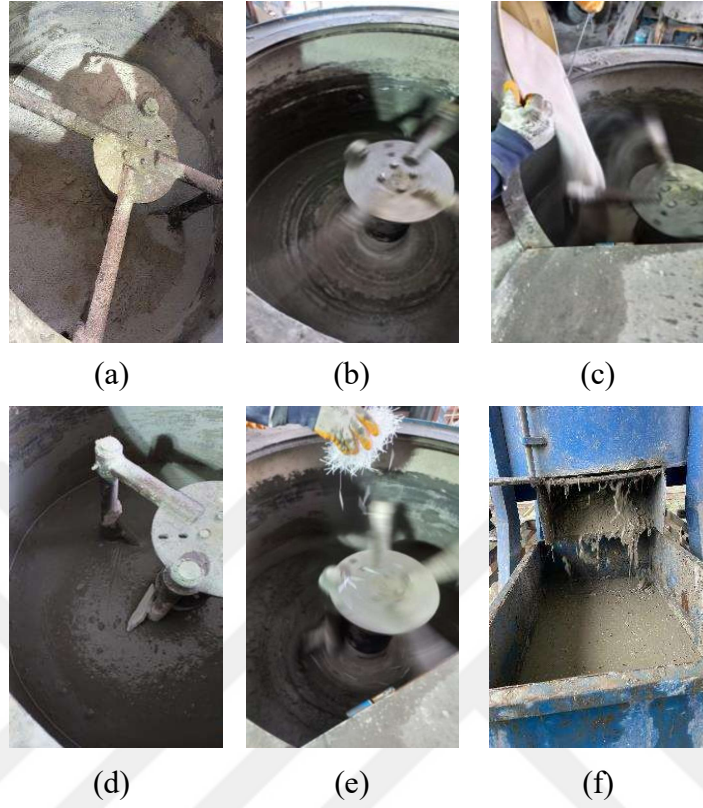


**Şekil 2.3:** Panmikser ve döküm aracı.

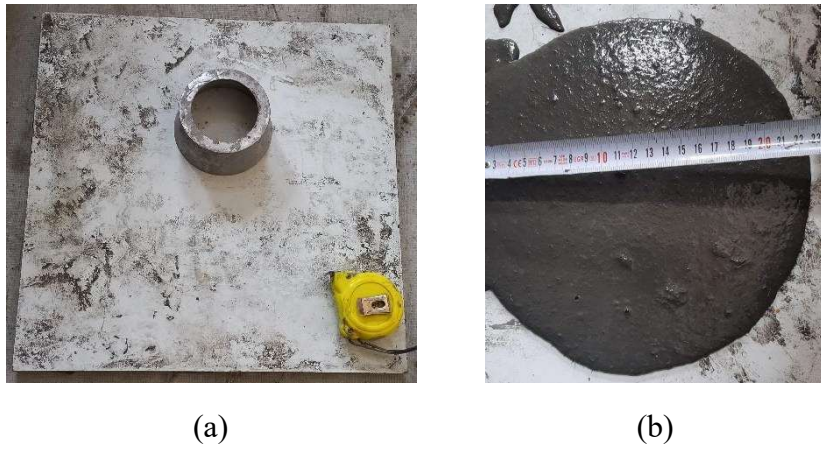
Öncelikle betonun bağlayıcı kısmını oluşturan çimento, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu karıştırıcıda 50 devir/dakika hızla karıştırılmıştır (Şekil 2.4a). Ardından süper akışkanlaştırıcı katkının yarısının eklenmiş olduğu su ilave edilerek akışkan bir kıvam elde edilene kadar aynı hızda karıştırılmaktadır (Şekil 2.4b). Daha sonra kuvars kumu karışıma yavaşça eklenmiş ve karıştırma hızı 100 devir/dakikaya çıkartılarak yüksek devirde işleme devam edilmiştir. Karıştırma hızı en seviyeye alınarak sentetik lifler yavaşça el yardımıyla karışıma eklenmiştir (Şekil 2.4e). Bu aşmada mümkün olduğunca liflerin topaklanması önlenmeye çalışılmaktadır. Hedeflenen homojen lif dağılımının ve akışkan kıvamın gözle kontrolü sağlandıktan sonra karıştırma işlemi tamamlanmış ve beton döküm aracına alınmıştır (Şekil 2.4f).

Karışımların kıvamları numunelerin üretimi sırasında ASTM C1437-20 (2020) standardına göre gerçekleştirilen yayılma testleri ile belirlenmiştir. Beton mini çökme hunisine yerleştirildikten sonra dik olarak kaldırılmış ve betonun serbest olarak yayılması sağlanmıştır. Yayılma durduktan sonra birbirine dik iki doğrultuda yayılma değeri ölçülmüş ve ortalaması alınmıştır Şekil 2.5. Karışımlar için ölçülen yayılma değerleri Tablo 2.3'te sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde en yüksek yayılma değerinin lifsiz Referans karışımında elde edilmiştir. Lif miktarının artmasıyla birlikte betonun

akışkanlığının azaldığı açıkça görülmektedir. Hacimce %2 lif kullanıldığında akışkanlığın Referans karışıma göre yaklaşık olarak yarı yarıya azaldığı belirlenmiştir (Tablo 2.3).



**Şekil 2.4:** UYPB Karışımının Hazırlanma Aşamaları; a) Kuru karışım, b) Akışkan kıvam, c) Agrega ilavesi, d) Lif öncesi kıvam, e) Lif eklenmesi, f) Döküm.

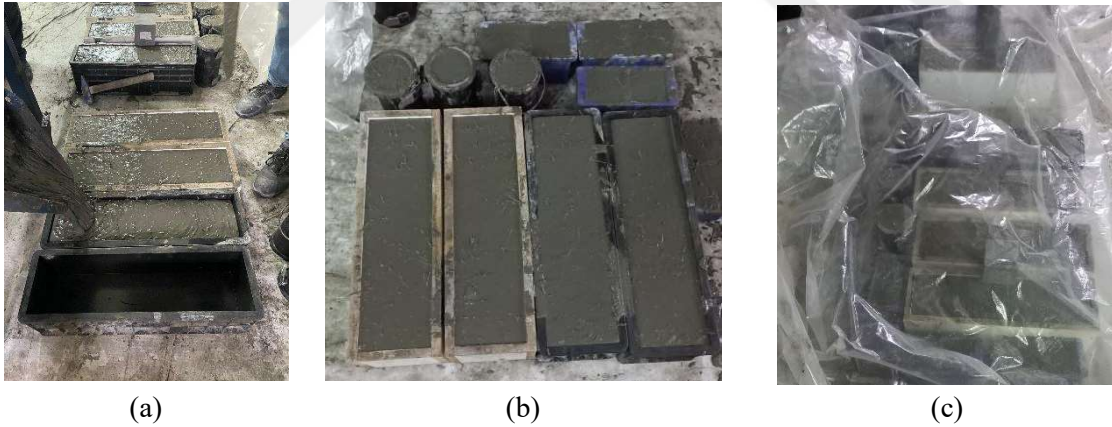


**Şekil 2.5:** a) Yayılma test düzeni, b) Yayılma ölçümü.

**Tablo 2.3:** UYPB karışımları için ölçülen ortalama yayılma değerleri.

Karışım	R	L0.5	L1.0	L1.5	L2.0
Yayılma (cm)	21	16	12	13	11

UYPB karışımlarının basınç dayanımlarının belirlenmesi amacıyla EN 12390-1 (2021) standardına göre 100×100×100 mm boyutlarında küp numuneler hazırlanmıştır. Karışımların yarmada çekme dayanımlarının belirlenebilmesi için yarmada çekme testlerinde kullanılmak üzere 100×200 mm (çap×boy) boyutlarında silindir numuneler üretilmiştir (EN 12390-1, 2021). Makro sentetik lifli UYPB karışımlarının eğilme davranışlarının incelenmesi için üç noktalı eğilme testlerinde kullanılmak üzere EN 14651+A1 (2007) standardına uygun olarak enkesit boyutu 150×150 mm ve toplam uzunluğu 550 mm olan kiriş numuneler hazırlanmıştır. Döküm arabasına aktarılan UYPB kalıpların bir ucundan serbest olarak akıtılarak beton dökümü gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.6). UYPB kalıplara yerleştirildikten sonra zaman kaybetmeden plastik bir örtü yardımıyla örtülerek 1 gün beklenmektedir (Şekil 2.6c).



**Şekil 2.6:** Test numunelerinin üretimi; a) Beton dökümü, b) Döküm sonrası numuneler, c) Numunelerin kürlenmesi.

Test numuneleri kalıptan çıkarıldıktan sonra test gününe kadar normal ortam koşullarında bekletilmiştir. EN 14651+A1 (2007) standardına göre test edilecek kiriş numunelerin açıklık ortasında beton kesici kullanılarak 25 mm derinliğinde ve 2 mm genişliğinde bir çentik açılmıştır (Şekil 2.7). Kirişler çentik açılmadan önce döküm yüzeyleri yan tarafa gelecek şekilde 90° döndürülmüştür.



Şekil 2.7: Prizmatik kirişlere çentik uygulaması.

## 2.3 Test Düzenekleri ve Ölçüm Sistemleri

### 2.3.1 Eksenel Basınç ve Yarmada Çekme Test Düzenekleri

Karışımların basınç dayanımları küp numunelerin EN 12390-3 (2019) standardına göre gerçekleştirilen eksenel basınç testleri ile belirlenmiştir. Testlerde 2000 kN kapasiteli hidrolik basınç presi kullanılmıştır (Şekil 2.8a). Eksenel basınç testleri yük kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Karışımlara ait yarmada çekme dayanımları EN 12390-6 (2009) standardına göre silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilen yarmada çekme testleri ile belirlenmiştir. Testler için özel bir yükleme çerçevesi ve 2000 kN kapasiteli basınç presi kullanılmıştır (Şekil 2.8b). Yükleme çerçevesine yatay olarak yerleştirilen silindir test numuneleri enkesit düzlemine dik doğrultuda çizgisel olarak yapılmaktadır (Şekil 2.8b). Yükleme hızı 1256 N/sn olarak uygulanmıştır (EN 12390-6, 2009).



(a)

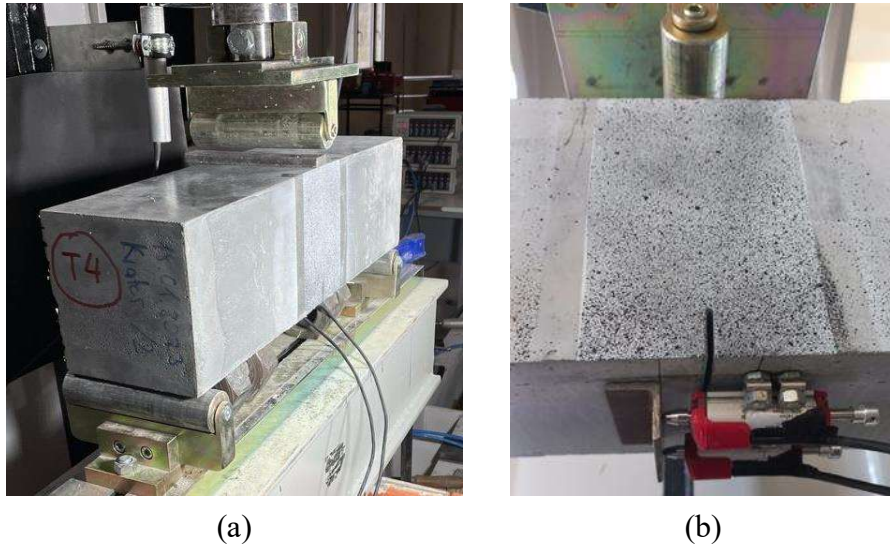


(b)

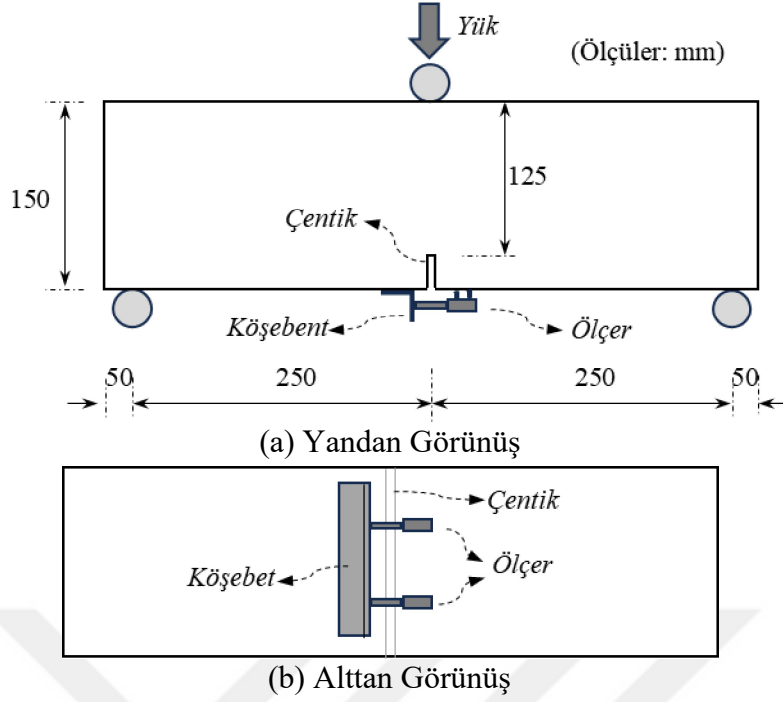
Şekil 2.8: a) Eksenel basınç test düzeneği, b) Yarmada çekme test düzeneği.

### 2.3.2 Üç Noktalı Eğilme Test Düzenegi

Liflerin betonun süneklik özelliklerini geliştirmedeki etkinliğini değerlendirmek için çatlak sonrası davranışın araştırılması gerekmektedir. Bu amaçla prizmatik kiriş numuneleri üzerinde gerçekleştirilen eğilme testleri, liflerin çatlak sonrası kalıcı dayanıma ve çatlak davranışına katkısını değerlendirebilmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada makro PP liflerin UYPB'un çatlak sonrası davranışa etkisinin incelenmesi amacıyla çentikli kiriş numuneler üzerinde EN 14651+A1 (2007) standardına göre üç noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Kirişler temiz açıklığı 500 mm olacak şekilde mesnetlenmiş ve kirişlerin açıklık ortasından tekil yük uygulanmıştır. Test kirişlerinin üç noktalı eğilme testleri için servo-hidrolik güç ünitesi ile kontrol edilen 500 kN kapasiteli eğilme test düzeneği kullanılmıştır (Şekil 2.9a). Yük değerlerinin ölçülebilmesi için yük verenin ucuna 500 kN kapasiteli yassı tip bir yük hücresi yerleştirilmiştir. Testler yük verenin ilerleme hızı 0.2 mm/dk olacak şekilde yerdeğiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Kirişlerin açıklık ortasında bulunun çentiğin uç kısmındaki açılmayı ifade eden çatlak ağzı açıklığı yerdeğiştirmesi (ÇAAY) değerlerinin belirlenebilmesi için kiriş alt kısmına iki adet 10 mm kapasiteli potansiyometrik cetvel yatay olarak yerleştirilmiştir (Şekil 2.9b). Ölçerlerin uç kısmına bir köşebent yerleştirilmiştir. Böylece çentik bölgesini içine alacak şekilde 40 mm'lik bir bölümden ölçüm alınabilmektedir. ÇAAY ölçüm düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 2.10'da sunulmuştur.



Şekil 2.9: a) Üç noktalı eğilme düzeneği, b) Çatlak ağzı açıklığı ölçüm düzeneği.

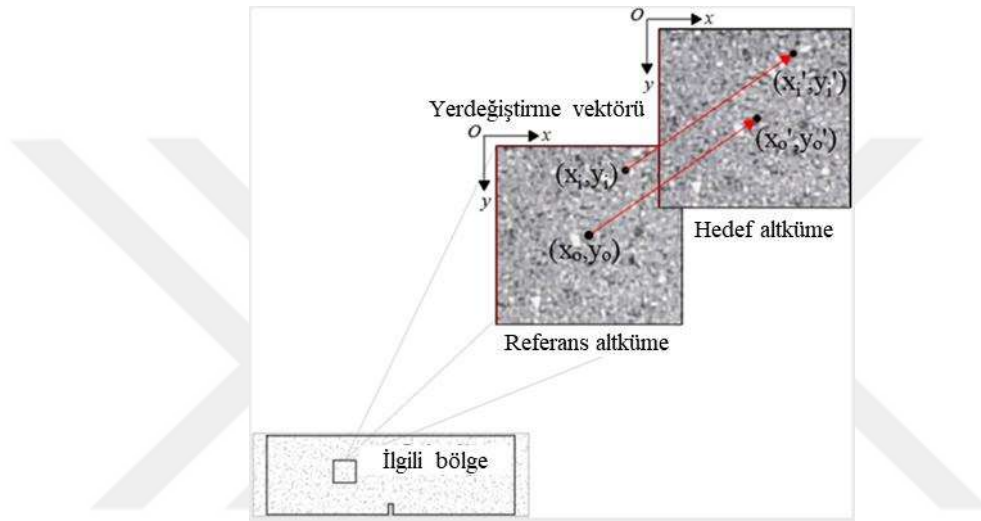


Şekil 2.10: Prizmatik kirişlerin boyutları ve ölçer detayları.

#### 2.4 Dijital Görüntü Korelasyonu

Üç noktalı eğilme testlerinde kirişlerin açıklık ortasında meydana gelecek deformasyonları ve çatlak davranışını incelemek amacıyla 2 boyutlu Dijital Görüntü Korelasyonu (2B-DGK) metodu kullanılmıştır. Dijital Görüntü Korelasyonu (DGK), bir yüzeyin tümünde meydana gelen deformasyonları ölçmek amacıyla kullanılan görüntü tabanlı temassız optik bir yöntemdir (Pan, 2018). Geleneksel metotların aksine DGK ile belirli yüzeyde meydana gelen deformasyonlar herhangi bir mekanik ölçer yerleştirmeden ayrıntılı bir şekilde elde edilebilmektedir (Mazzanti, 2017). DGK yönteminin temel prensibi yüksek çözünürlükte kaydedilen bir dizi görüntü kullanılarak test sırasında numunenin yüzeyi üzerindeki belirli bir alanda oluşturan rasgele bir modelde meydana gelen deformasyonların karşılaştırmalı olarak izlenmesine dayanmaktadır (Chu vd., 1985; Pan vd., 2009). Bunun için genellikle yüzey üzerine belirli bir düzende olmayan (*gelişigüzel*), izotropik ve yüksek kontrast yaratabilecek bir benekleme yapılmaktadır. Sonrasında benek deseni piksel düzeyinde alt yüzeylere bölünür. Bu alt yüzeyler  $n \times n$  gri tonlu matrislerden oluşmakta ve her alt yüzeyin merkezine benzersiz gri tonlardan oluşan bir set atanmaktadır. Yükleme nedeniyle test numunesinde deformasyonlar meydana geleceği için birbirini takip eden aşamalarındaki görüntülerin karşılaştırılması ile söz konusu alt yüzeylerin başlangıç konumları da değişmektedir. Buna bağlı olarak korelasyon tabanlı eşleştirme algoritmaları ve sayısal türev yaklaşımları ile görüntü analizi gerçekleştirilerek malzeme, eleman veya yapının tam

alan deformasyon veya yerdeşistirmeleri elde edilebilmektedir (Peters ve Ranson, 1982; Peters vd., 1983; Sutton vd., 1983; Chu vd., 1985; Sutton vd., 1986; Orteu, 2009; Pan, 2010; Sutton ve Hild, 2015). Alt yüzeylerin boyutları oluşturulan benek deseninin ayrıntı düzeyine bağlıdır. Bu nedenle güvenilir bir deformasyon ölçümünü elde edebilecek boyutu belirleyebilmek için işlenecek görüntülerin tipolojisinin iyi bilinmesi gerekmektedir (Lecompte vd., 2006; Lava vd., 2009; Lava vd., 2010). Ayrıca, korelasyon işlemi sırasında alt kümenin ilerlemesini ifade eden adım boyutunun dikkatli bir şekilde ayarlanması gerekir.



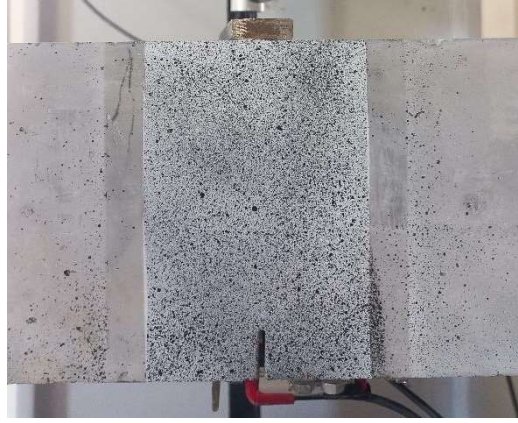
**Şekil 2.11:** Referans ve hedef alt kümeler (Pérez vd., 2021).

Son yıllarda lifli betonların çatlak davranışının incelenmesinde geleneksel ölçüm metotlarına alternatif olarak DGK yönteminin kullanımı giderek artış göstermiş ve oldukça başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Skarzyński ve Suchorzewski (2018) çalışmalarında yalın beton ile çelik lifli betonun kırılma davranışlarını DGK yöntemi ile karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Picazo vd. (2018) poliolefin lifli betonun kesme davranışını incelemek amacıyla bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada çatlak oluşumu ve ilerlemesi sürecinin kayma gerilmesi bağlı ile ilişkisi DGK yöntemiyle analiz edilmiştir. Liu vd. (2020) mercan katkılı karbon lifli betonun kırılma davranışını inceledikleri çalışmalarında eğilme yüklemesi altında meydana gelen ilk çatlak oluşumu, çatlak gelişimi ve ana çatlak oluşumu gibi farklı aşamaların takibinde DGK yöntemini kullanmışlardır. Rucka vd. (2021) poliolefin lifli kirişler üzerinde üç noktalı eğilme testleri gerçekleştirmiş ve çatlak davranışının farklı aşamalarda DGK yöntemiyle başarılı şekilde takip edilebildiğini belirlemişlerdir. Trinh-Duc vd. (2021) çelik ve polipropilen lif katkılı betonun çatlak davranışını prizma numuneler üzerinde üç noktalı eğilme testleri

gerçekleştirmiş ve davranışın incelemesinde DGK yöntemini kullanmışlardır. Çalışma sonucunda deneysel olarak elde edilen ölçümler ile DGK analizi sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Pérez vd. (2021) çelik lif katkılı kendinden yerleşen beton numunelerin dört noktalı eğilme testlerinde yerdeğiştirmelerin ölçümünde DGK yöntemini kullanmışlardır. Wang vd. (2021) bazalt lif katkılı geopolimer betonun kırılma parametrelerini ve çatlak davranışını üç noktalı eğilme testleri ile incelemiş, yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme tayininde DGK metodunu uygulamışlardır. Bhosale vd. (2020) çelik ve poliolefin lifli beton prizma numunelerin üç noktalı eğilme testlerini gerçekleştirdikleri çalışmalarında farklı enkesit yüksekliklerinde ve farklı yükleme aşamalarında oluşan çatlak genişliklerinin belirlenmesinde DGK yöntemini kullanmışlardır. Suárez vd. (2020) alçı taşı içeren lifli betonun mekanik özelliklerini araştırdıkları çalışmalarında farklı tip ve miktarda polimer lifler kullanmışlardır. Beton karışımlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirdikleri testlerde kılcal çatlakların oluşumunun belirlenmesi ve çatlakların takibinde DGK yöntemini kullanmışlardır.

Eğilme testinde düzlem dışı deformasyonların ihmal edilebilecek kadar küçük olması nedeniyle 2B-DGK geçmiş çalışmalarda da sıklıkla kullanılmaktadır. Analizi yapılmak üzere kiriş açıklık ortasında  $100 \times 150 \text{ mm}^2$ 'lik bir alan seçilmiştir. Bu bölge önce mat beyaz spreyci boya ile boyanmıştır. Ardından bu bölgeye belirli bir mesafeden mat siyah spreyci boya uygulaması ile geliş güzel benekleme yapılmıştır (Şekil 2.12). 2B-DGK uygulaması için yüksek çözünürlüklü bir fotoğraf makinesi kullanılmıştır. Fotoğraf makinesi 2B-DGK uygulanacak alana mümkün olduğunca yakın yerleştirilmeye çalışılmıştır. Böylece fotoğraf makinesinin odak kaybını en aza indirerek ilgili bölgede en fazla piksel yoğunluğu sağlanmaya çalışılmıştır (Şekil 2.13). Bununla birlikte kırışta meydana gelecek sehim nedeniyle hedef bölgenin çekim alanının dışına çıkmamasına da dikkat edilmiştir. Bunu sağlayacak şekilde fotoğraf makinesi test numunesine 50 cm uzaklığa yerleştirilmiştir (Şekil 2.13). Doğal ışıktaki değişimlerin fotoğraflar arasında farklılık yaratmasını engellemek amacıyla yapay ışıklandırma kullanılmıştır. Hedef bölgenin aydınlatması gölge oluşumunu engellemek amacıyla  $45^\circ$  açıyla yerleştirilmiş iki adet led projektör ile sağlanmıştır (Şekil 2.13). Testler sırasında her 10 sn'de bir  $3008 \times 2000$  piksel çözünürlükte görüntü alınmıştır.





Şekil 2.12: DGK analizi için seçilen bölgede yapılan benekleme.



Şekil 2.13: Kamera ve ışıklandırma ile DGK test kurulumu şekli.

Çekilen fotoğrafların 2B-DGK metodu ile analizleri GOM Correlate 2019 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Herhangi bir yerdeğiştirme veya deformasyonun olmadığı ilk fotoğraf referans olarak alınarak incelenecek bölge için bir yüzey bileşeni (*surface component*) tanımlanmaktadır. Yazılım yüzey bileşeninin oluştururken seçilen alt küme boyutuna (*facet size*) bağlı olarak  $n \times n$  piksel boyutlarında alt yüzeylere (*facet*) bölmektedir. Yazılımda birbirine komşu olan kare şeklindeki bu alt yüzeylerin merkezleri arasındaki mesafeyi

ifade eden adım mesafesi (*step size*) ayrıca tanımlanabilmektedir. Adım mesafesi ile yüzey bileşeni içindeki ölçüm noktası yoğunluğu ayarlanabilmektedir. Testin ileriki aşamalarında meydana gelecek deformasyonlar nedeniyle bu alt kümelerin merkezlerinin konumları değişmektedir. Farklı aşamalarda çekilen fotoğraflardaki değişimler tespit edilerek referans durum ile ilişkilendirilmekte ve böylece fotoğrafları çekilen herhangi bir aşmaya ait deformasyonlar veya değiştirmeler sayısal ve görsel olarak izlenebilmektedir. Analizler GOM Correlate 2019 yazılımında bulunan standart korelasyon metodu ile gerçekleştirilmiştir. Alt küme boyutu 19×19 piksel, adım aralığı ise 16 piksel olarak seçilmiştir.



### 3. DENEYSEL ÇALIŞMANIN SONUÇLARI

#### 3.1 Eksenel Basınç ve Yarmada Çekme Test Sonuçları

Her bir karışım için 6 adet küp numunesi EN 12390-3 (2019) standardına göre eksenel basınç altında test edilmiştir. Kırılma yüküne ulaşan lifsiz ve lifli küp numunelerin kırılma şekilleri karşılaştırmalı olarak Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Lifsiz numuneler dayanımlarına ulaştıklarına testler ani bir patlama ile sona ererken lifli numunelerde kırılma durumunda numunenin bütünlüğünün korunduğu görülmektedir (Şekil 3.1). Karışımlara ait basınç dayanımları ( $f_c$ ) 6 küpün dayanımlarının ortalaması alınarak belirlenmiş ve Tablo 3.1’de sunulmuştur. Basınç dayanımlarının hacimsel lif oranına ( $V_f$ ) göre değişimi Şekil 3.2’de grafiksel olarak sunulmuştur.

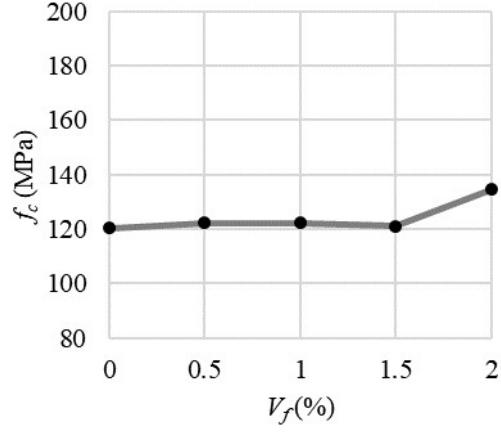


Şekil 3.1: Küp numunelerin hacimsel lif oranlarına göre kırılma şekilleri.

Tablo 3.1: Eksenel basınç testlerinin sonuçları.

Karışım	R	L0.5	L1.0	L1.5	L2.0
$f_c$ (MPa)	120	122	122	122	136

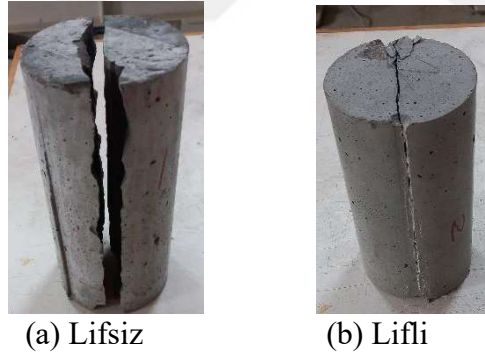
Eksenel basınç testlerinin sonucunda hacimce %2.0 oranında PP lif içeren L2.0 karışımı dışındaki karışımlar için basınç dayanımında belirgin farkın olmadığı görülmektedir. L2.0 karışımı için ortalama 136 MPa basınç dayanımı elde edilmiş.



**Şekil 3.2:** Basınç dayanımının hacimsel lif oranı ile değişimi.

### 3.2 Yarmada Çekme Test Sonuçları

Silindir numunelerin EN 12390-6 (2009) standardına göre yarmada çekme testleri gerçekleştirilmiş ve kırılma yükleri elde edilmiştir. Şekil 3.3'te Referans (*lifsiz*) ve lifli UYPB silindir numunelerin kırılma şekilleri karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Görüldüğü gibi lifsiz numuneler iki parça halinde yükleme çizgisinden ayrılırken, lifli numunelerde kırılma meydana gelmesine rağmen liflerin köprüleme özelliği nedeniyle bütünlük korunabilmiştir.



**Şekil 3.3:** Silindir numunelerin kırılma şekilleri.

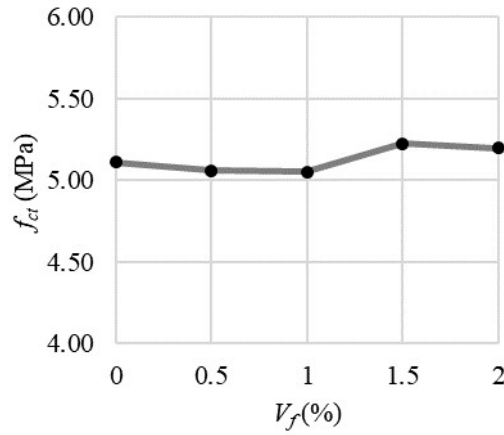
Her karışım için testi gerçekleştirilen 3 adet silindir numunenin kırılma yüklerinin ortalaması alınmış ve ortalama yarmada çekme dayanımları ( $f_{ct}$ ) Bağıntı (3.1) yardımıyla hesaplanmıştır. Bağıntı (3.1)'de  $P$  kırılma yükü ve  $l$  ve  $D$  sırasıyla numune boyu ve çapını ifade etmektedir. Hesaplanan ortalama  $f_{ct}$  değerleri tüm karışımlar için Tablo 3.2'de sunulmuştur. Dayanımların hacimsel lif oranı ( $V_f$ ) ile değişimi Şekil 3.4'te grafiksel olarak karşılaştırılmıştır. Düşük lif oranları için ( $V_f = \%0.5$  ve  $\%1.0$ ) lifsiz Referans karışıma (R) göre belirgin bir farkın olmadığı görülmektedir. Daha yüksek lif oranlarında ise ( $\%1.5$  ve

%2.0) ancak ortalama %2'lik bir artış elde edilebilmiştir. Sonuç olarak PP lif kullanımının yarmada çekme dayanımı açısından belirgin bir katkısının olmadığı görülmektedir.

$$f_{ct} = \frac{2 \times P}{\pi \times l \times D} \quad (3.1)$$

**Tablo 3.2:** Yarmada çekme testlerinin sonuçları.

Karışım	R	L0.5	L1.0	L1.5	L2.0
$f_{ct}$ (MPa)	5.11	5.06	5.05	5.22	5.20



**Şekil 3.4:** Yarmada çekme dayanımının hacimsel lif oranı ile değişimi.

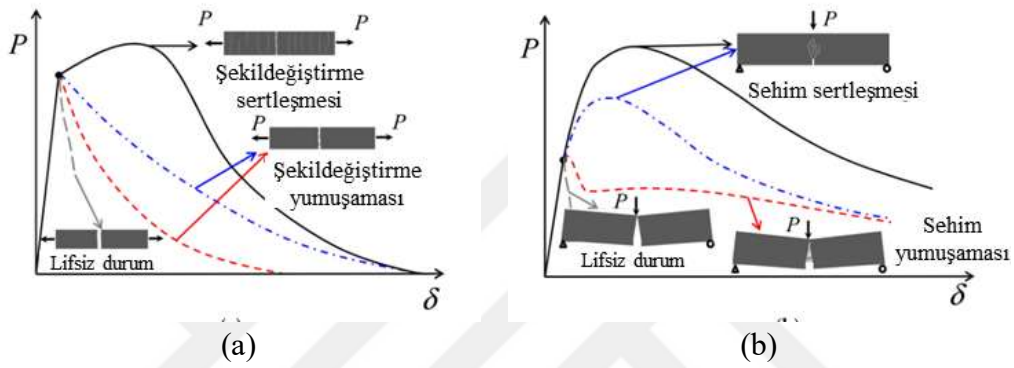
### 3.3 Üç Noktalı Eğilme Testlerinin Sonuçları

Her bir UYPB karışımı için 4 adet çentikli kiriş numunesi EN 14651+A1 (2007) standardına uygun olarak üç noktalı yükleme altında test edilmiştir. Kirişlerin eğilme davranışları yük-sehim ( $P-\delta$ ) ve yük-çatlak ağzı açıklığı yerdeğiştirmesi ( $P-\zeta$ ) ilişkileri açısından değerlendirilmiştir. Kirişlerin çatlak davranışı 2 boyutlu dijital görüntü korelasyonu yöntemi (2B-DGK) ile incelenmiştir.

#### 3.3.1 Yük-Sehim Davranışı

UYPB'un çekme altındaki davranışı lif türü, lif dağılımı veya yönelimi gibi birçok parametreden önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu davranış genellikle şekildeğiştirme sertleşmesi (*strain hardening*) ve şekildeğiştirme yumuşaması (*strain softening*) olarak gruplandırılabilir (Leutbecher ve Rebling, 2019; Huang vd., 2021). Şekil değiştirme yumuşaması davranışında çatlama sonrası dayanımda düşüş başlamakta ve kırılmaya kadar

dayanım azalması etkili olmaktadır (Şekil 3.5a). Şekildeğiştirme sertleşmesi ise ilk çatlak sonrası artan yük taşıma kapasitesi ile tanımlanmaktadır. Sertleşme davranışı gösteren betonlarda yumuşamaya göre daha fazla dayanım ve süneklik elde edilebilmektedir. Bununla birlikte, aksenal çekme ve eğilme davranışları arasındaki belirgin farklılık nedeniyle aksenal çekmede şekildeğiştirme yumuşaması davranışı gösteren bir beton için Şekil 3.5'te de gösterildiği gibi eğilme altında sehim sertleşmesi (*deflection hardening*) veya sehim yumuşaması (*deflection softening*) davranışları elde edilebilmektedir. (Guo vd., 2022).

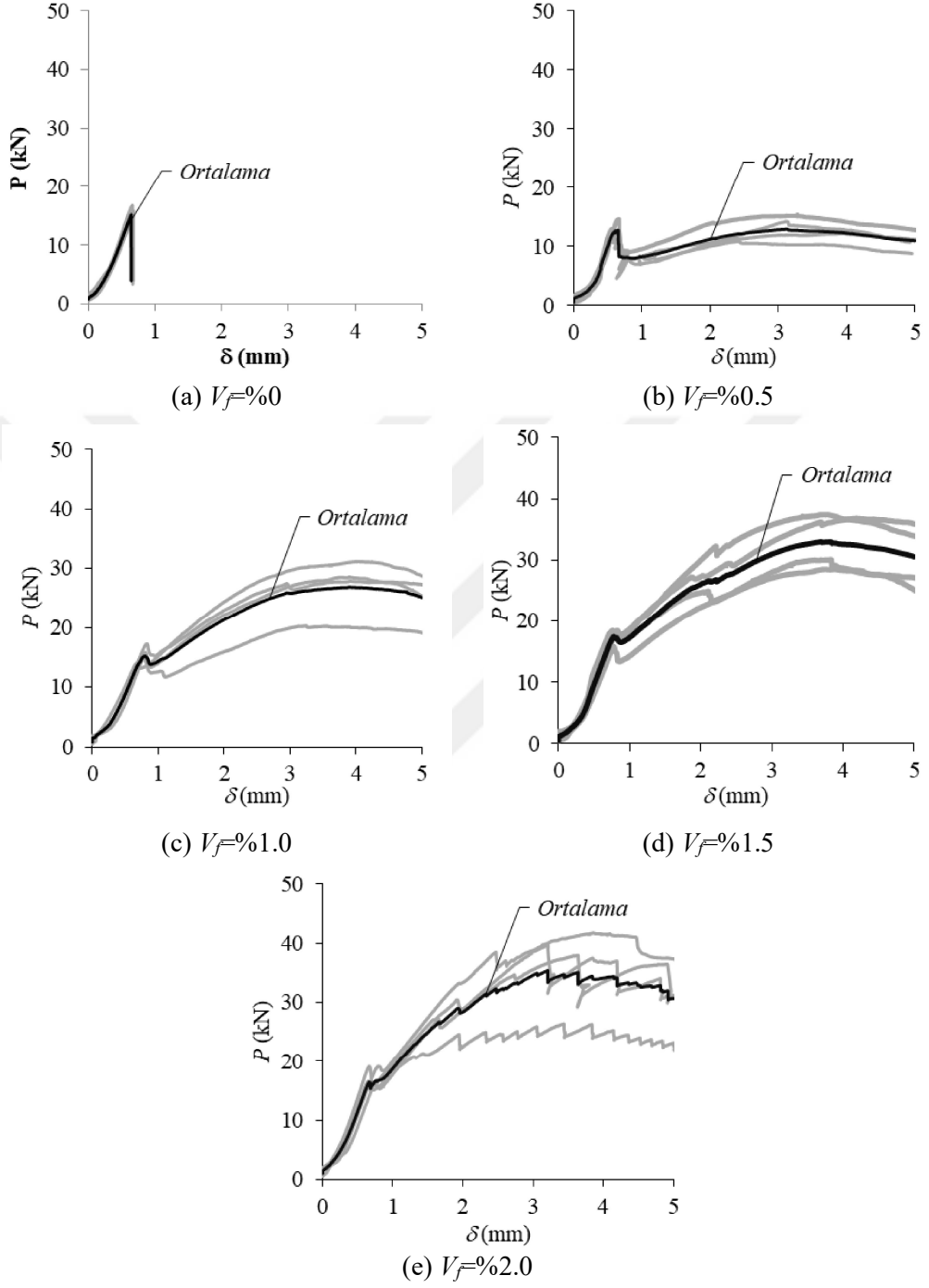


**Şekil 3.5:** (a) Aksenal çekme altında yumuşama ve sertleşme davranışları; (b) Üç noktalı eğilme altında yumuşama ve sertleşme davranışları (Guo vd., 2022).

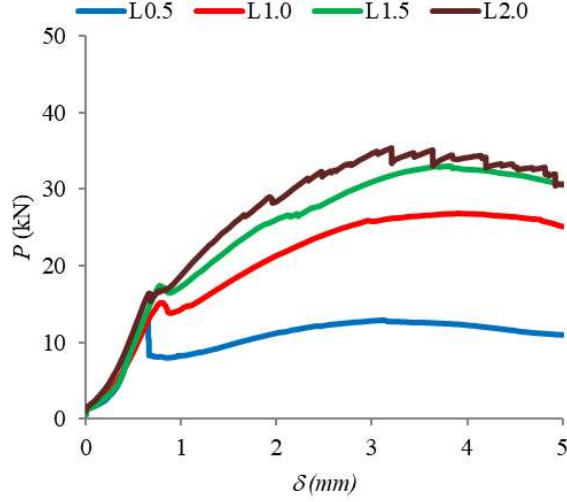
Her karışım için üç noktalı eğilme testleri gerçekleştirilen 4 adet kiriş için elde edilen deneysel yük-sehim ( $P-\delta$ ) ilişkisi grafiksel olarak elde edilmiş ve Şekil 3.6'da sunulmuştur. 4 kirişin ortalama ( $P-\delta$ ) davranışları ayrıca hesaplanmış ve Şekil 3.6'da koyu renkli eğriler ile grafiklere işlenmiştir. Grafiklerde maksimum sehim değeri ( $\delta_{maks}$ ) yerdeğiştirme ölçerin kapasitesine bağlı olarak 5 mm ile sınırlandırılmıştır. Karışımlara ait ortalama  $P-\delta$  grafikleri toplu olarak Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

Lifsiz karışımda çatlama ile birlikte kapasiteye ulaşılmakta ve davranış sona ermektedir (Şekil 3.6a). Hacimce %0.5 lif içeren UYPB karışımında ise çatlama sonrası belirli bir dayanım kaybı oluşmasına rağmen davranış sona ermemiş, belirli bir dayanım kaybının ardından lifler devreye girerek tekrar dayanım artışı elde edilmiştir. Bununla birlikte çatlama sonrası dayanımın çatlama dayanımını aşmadığı görülmektedir (*sehim yumuşaması*) (Şekil 3.6b). Diğer lif oranlarının hepsinde çatlama sonrası çok sınırlı bir dayanım kaybı oluşmuş ve liflerin çatlak köprüleme özelliği sonucu yük taşıma kapasitesi

artan bir seyir izlemiştir. Bu davranış sehim sertleşmesi olarak adlandırılmakta ve tepe yüküne kadar devam etmektedir (Şekil 3.6c-e).

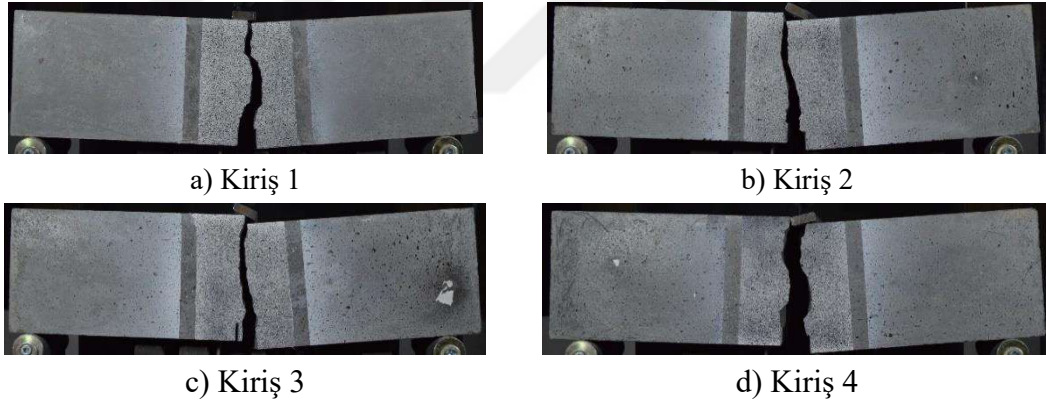


Şekil 3.6: Kirişlerin hacimsel lif oranlarına ( $V_f$ ) göre yük-sehim ( $P$ - $\delta$ ) grafikleri.



**Şekil 3.7:** Karışımların hacimsel lif oranlarına ( $V_f$ ) göre ortalama yük-sehim ( $P-\delta$ ) grafikleri.

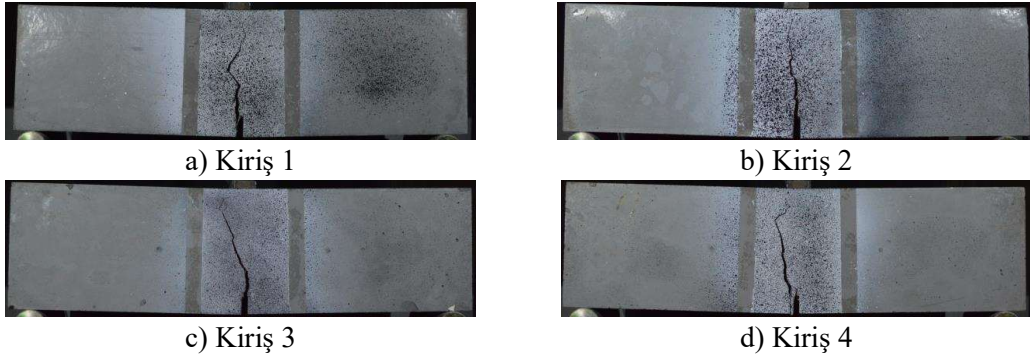
Şekiller 3.8’de lifsiz kirişlerin kırılma şekilleri sunulmuştur. Çentik bölgesinde çatlama meydana geldikten hemen sonra kirişlerde kırılma gerçekleşmiş ve numuneler ikiye ayrılmıştır.



**Şekil 3.8:**  $V_f=0\%$  için kirişlerin kırılma şekli.

Lifli kirişlerin eğilme testi sonundaki çatlak şekli her bir hacimsel lif oranı için Şekiller 3.9-3.12’de sunulmuştur. Görüldüğü tüm kirişlerde çentik bölgesinden başlayan çatlak kirişin üst noktasına doğru ilerlemiştir. Bununla birlikte lifsiz kirişlerden farklı olarak çatlama oluştuktan sonra makro PP liflerin çatlakları köprülemesi nedeniyle çatlakların açılması ve ilerlemesi sınırlandırılmış ve ani kırılma meydana gelmemiştir.

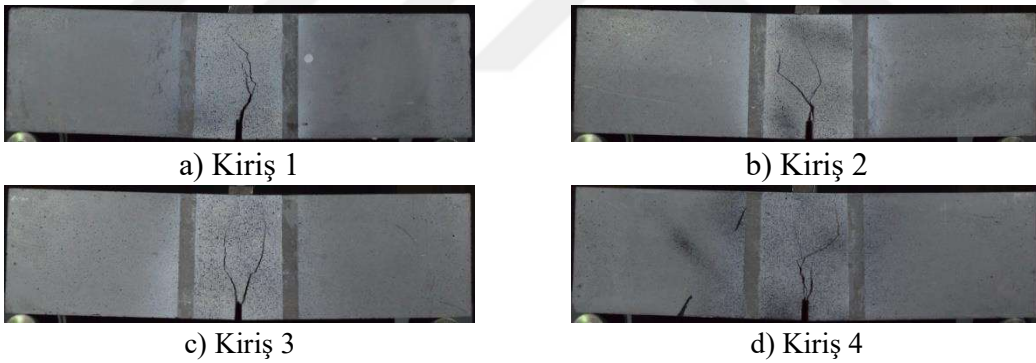




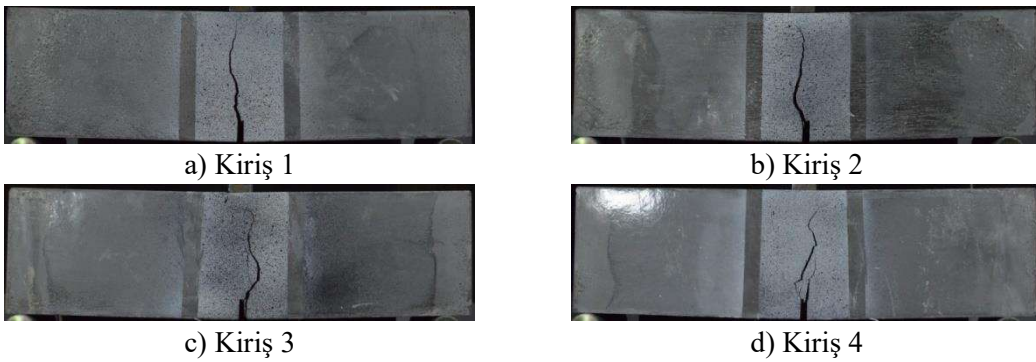
**Şekil 3.9:**  $V_f=0.5$  için kirişlerin çatlak şekli.



**Şekil 3.10:**  $V_f=1.0$  için kirişlerin çatlak şekli.



**Şekil 3.11:**  $V_f=1.5$  için kirişlerin çatlak şekli.



**Şekil 3.12:**  $V_f=2.0$  için kirişlerin çatlak şekli.

### 3.3.2 Kırılma Enerjisi

Kırılma enerjisi ( $G_f$ ) numunede bir birim çatlak oluşturmak için gereken enerji olarak tanımlanmaktadır. Betonun tokluğunu, gevrekliğini ve çatlama direncini analiz etmek ve belirlemek için kullanılabilen malzemenin temel özelliklerinden biridir. Kırılma enerjisi RILEM 50-FMC (1985)'ye göre Bağıntı (3.2) ile hesaplanabilmektedir. Burada  $w_0$ ,  $P$ - $\delta$  eğrisinin altında kalan alanı (N/m),  $m$  kiriş numunelerinin mesnetler arası açıklığı arasında kalan kütle (kg),  $g$  yerçekimi ivmesini ( $m/s^2$ ),  $b$  kiriş enkesit genişliğini ve  $h_{sp}$  ise açıklık ortasında bölümünde çentiğin ucu ile test numunesinin üst kısmı arasındaki mesafe ifade etmektedir. Bu çalışmada kırılma enerjisi orantılılık sınırına ( $G_{f,LOP}$ ), çatlak sonrası maksimum yüke ( $G_{f,maks}$ ) ve testin sonlandırıldığı 5 mm'lik ÇAAY değerine kadarlık ( $G_{f,5mm}$ ) alanlar için hesaplanmış ve Tablo 3.3'te sunulmuştur. Lifsiz numunelerde (R) çatlak sonrası ani yük düşüşü sonucunda test tamamlanması nedeniyle bu noktadan sonra herhangi bir enerji sönümlenmesi gerçekleşmemektedir (Şekil 3.5a).

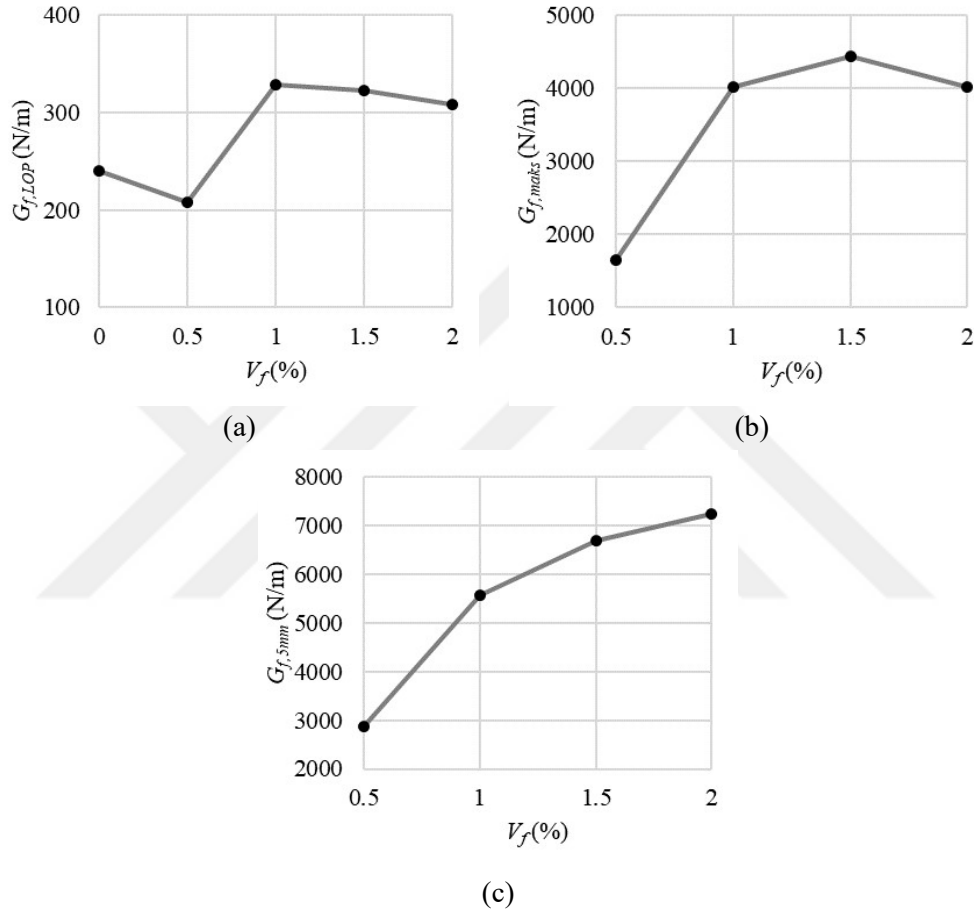
$$G_f = \frac{w_0 + m \times g \times \delta}{b \times h_{sp}} \quad (3.2)$$

**Tablo 3.3:** Karışımların ortalama kırılma enerjileri ( $G_f$ ).

Karışım	R	L0.5	L1.0	L1.5	L2.0
$G_{f,LOP}$ (N/m)	240	208	329	322	308
$G_{f,maks}$ (N/m)	-	1641	4016	4432	4016
$G_{f,5mm}$ (N/m)	-	2866	5567	6679	7238

Hacimsel lif oranına ( $V_f$ ) göre  $G_f$  değerinin değişimi Şekil 3.13'te grafiksel olarak gösterilmiştir. Çatlama yüküne kadar oldukça düşük oranda enerji yutulduğunun görüldüğü elastik bölgede hacimce %0.5 lif kullanımı Referans karışıma göre avantaj sağlayamazken daha yüksek lif oranlarında ortalama %33'lük bir artış elde edilmiştir. Bu noktadan sonra Referans numunede davranış sona ererken lifli numunelerde deformasyonların devam ettiği görülmektedir. Tepe yüküne kadar %0.5 lif oranı için 1641 N/m'lik ( $G_{f,maks}$ ) kırılma enerjisi elde edilmiş, lif miktarının artması ile 2.7 kata varan artışlar elde edilmiştir (Şekil 3.13b). Tepe yükünden sonraki bölgede ise kırılma enerjisinde önemli artışlar olduğu görülmüştür. Testlerin sonlandırıldığı 5 mm'lik sehim değerine kadarki bölgede deformasyon sertleşmesi davranışının da etkisiyle hacimce %2.0 lif kullanımı sonucu

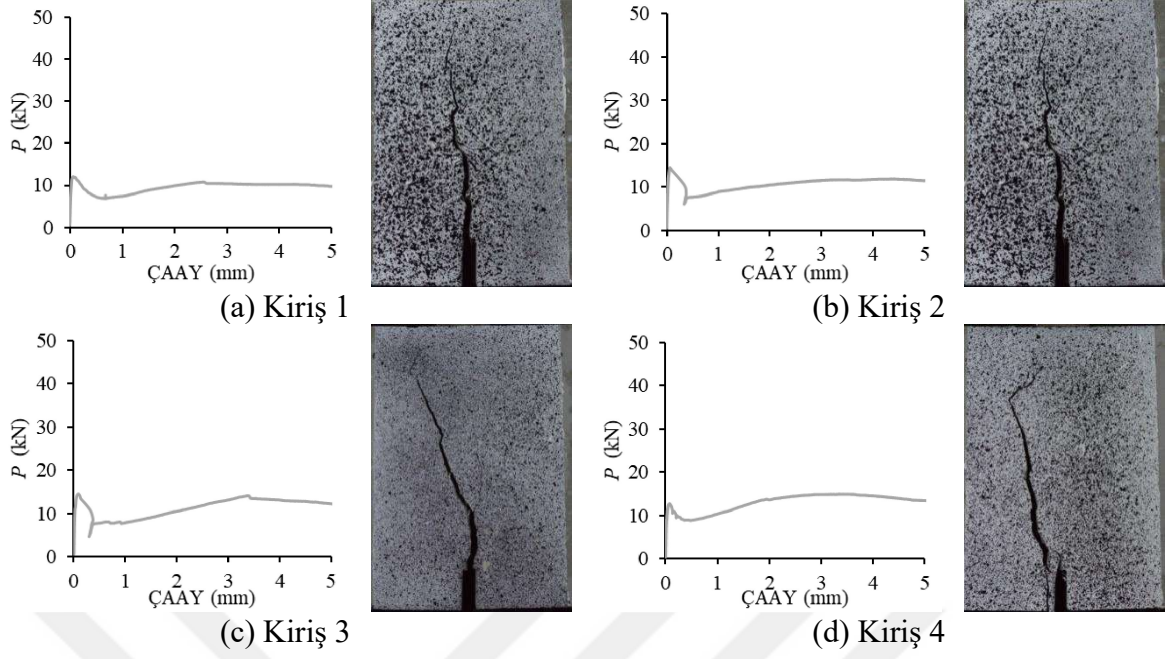
yutulan enerji 7238 N/m'ye çıkmıştır. Bu değer %0.5 lif kullanımına karşılık elde edilen  $G_f$  değerinin 2.5 katıdır (Şekil 3.13c). Sonuç olarak makro PP lif kullanımının UYPB'un sünekliğini önemli oranda arttırdığı, hacimce %0.5 lif oranının diğer lif miktarlarına göre etkisinin sınırlı olduğu görülmüştür. Genel olarak lif miktarının artışına bağlı olarak  $G_f$  değerlerinde de artışlar gözlenirken bu parametre için optimum lif miktarının hacimce %1.5 olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.13).



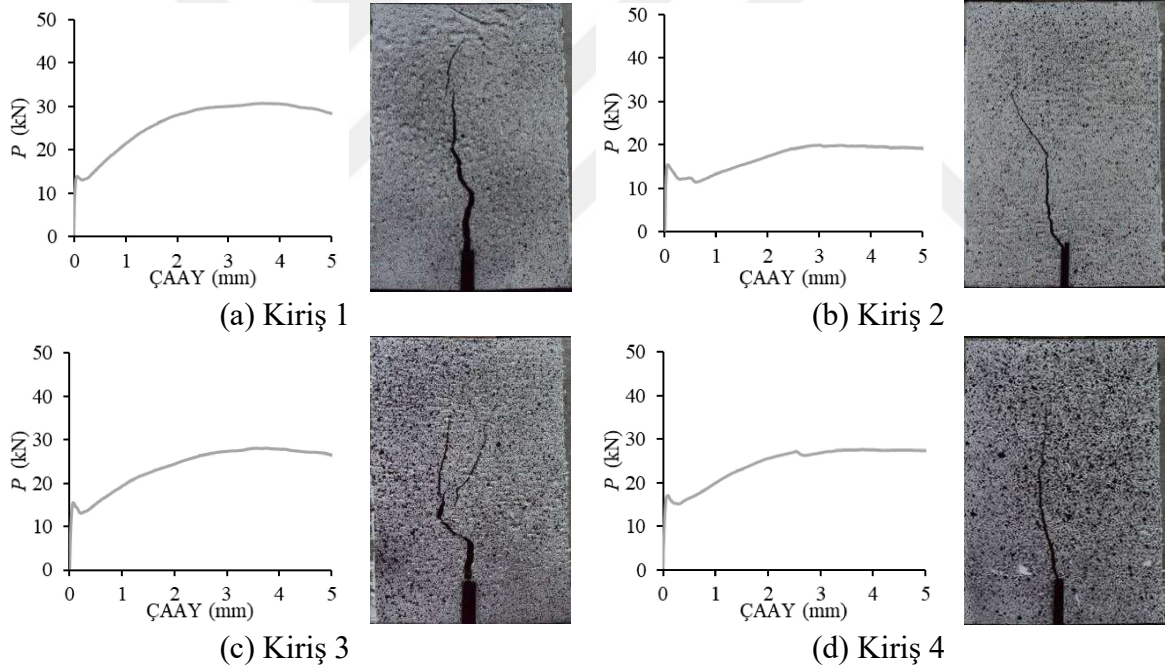
Şekil 3.13: Hacimsel lif oranlarına göre  $G_f$  değerlerinin değişimi; a)  $G_{f,L}$ , b)  $G_{f,maks}$ , c)  $G_{f,5mm}$ .

### 3.3.3 Yük-ÇAAY davranışı

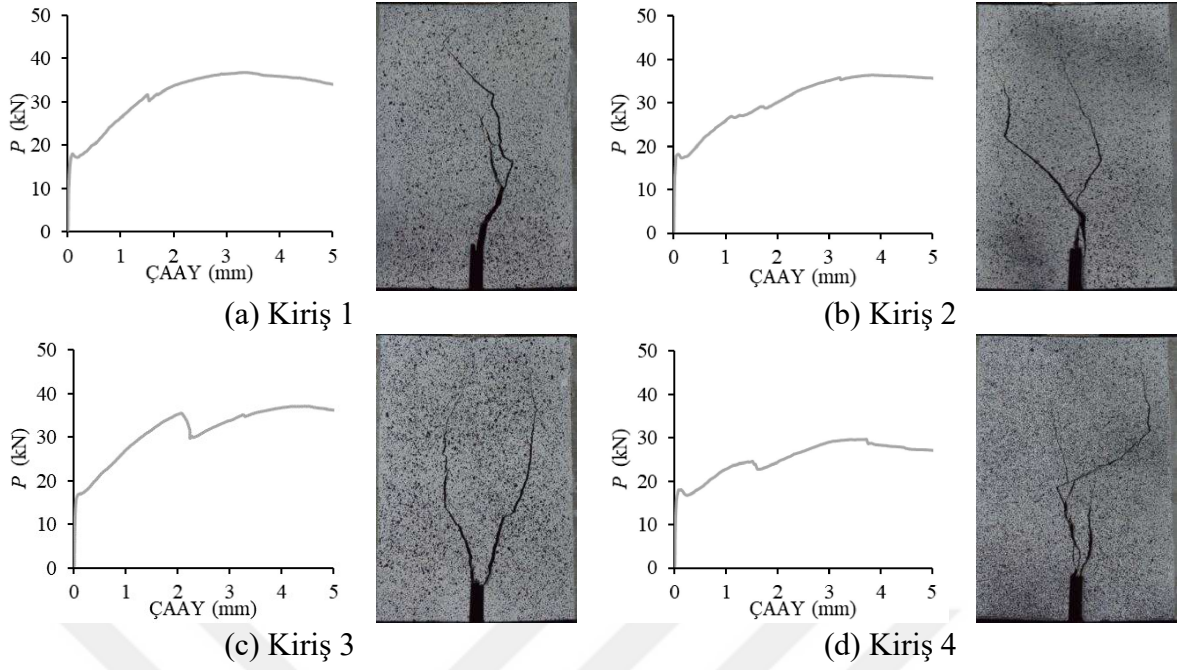
Makro Polipropilen lifli UYPB karışımlarına ait kirişlerin üç noktalı eğilme testleri sonucunda elde edilen  $P$ -ÇAAY grafikleri ve çatlak modları her bir hacimsel lif oranı için Şekiller 3.14-3.17'de sunulmuştur. Beklenildiği gibi tüm kirişlerde çatlak oluşumu çentikten başlayarak yükleme noktasına doğru ilerlemiştir.



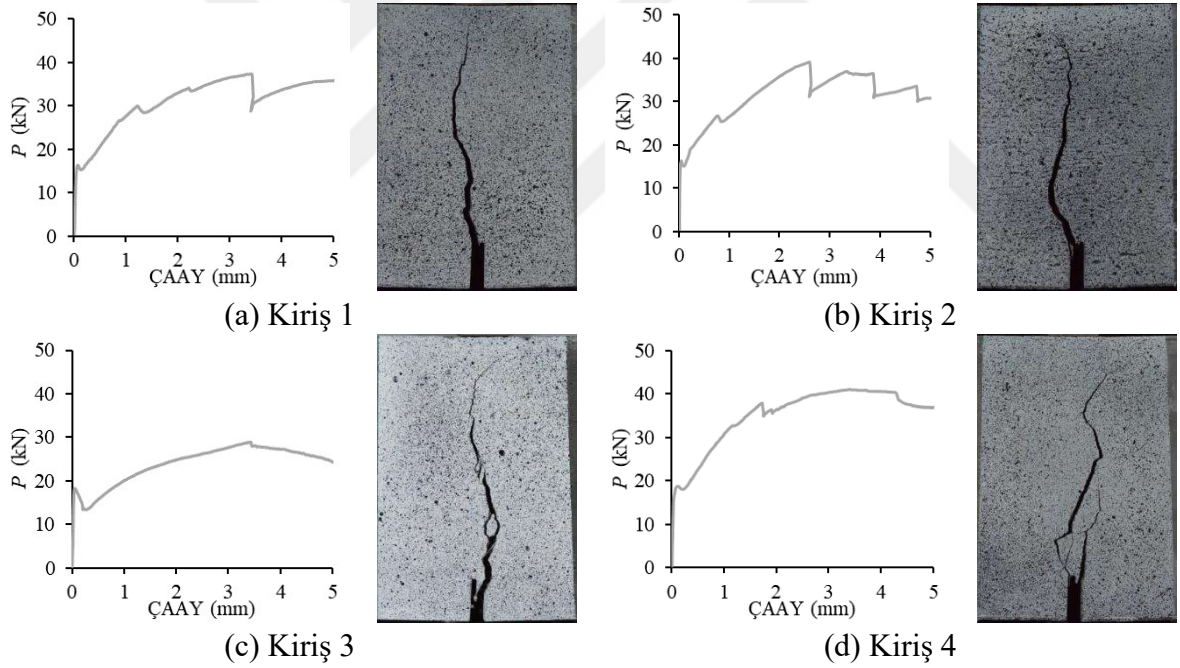
**Şekil 3.14:**  $V_f = 0.5$  için kirişlerin  $P$ - $\text{ÇAAY}$  grafikleri ve test sonundaki çatlak şekilleri.



**Şekil 3.15:**  $V_f = 1.0$  için kirişlerin  $P$ - $\text{ÇAAY}$  grafikleri ve test sonundaki çatlak şekilleri.



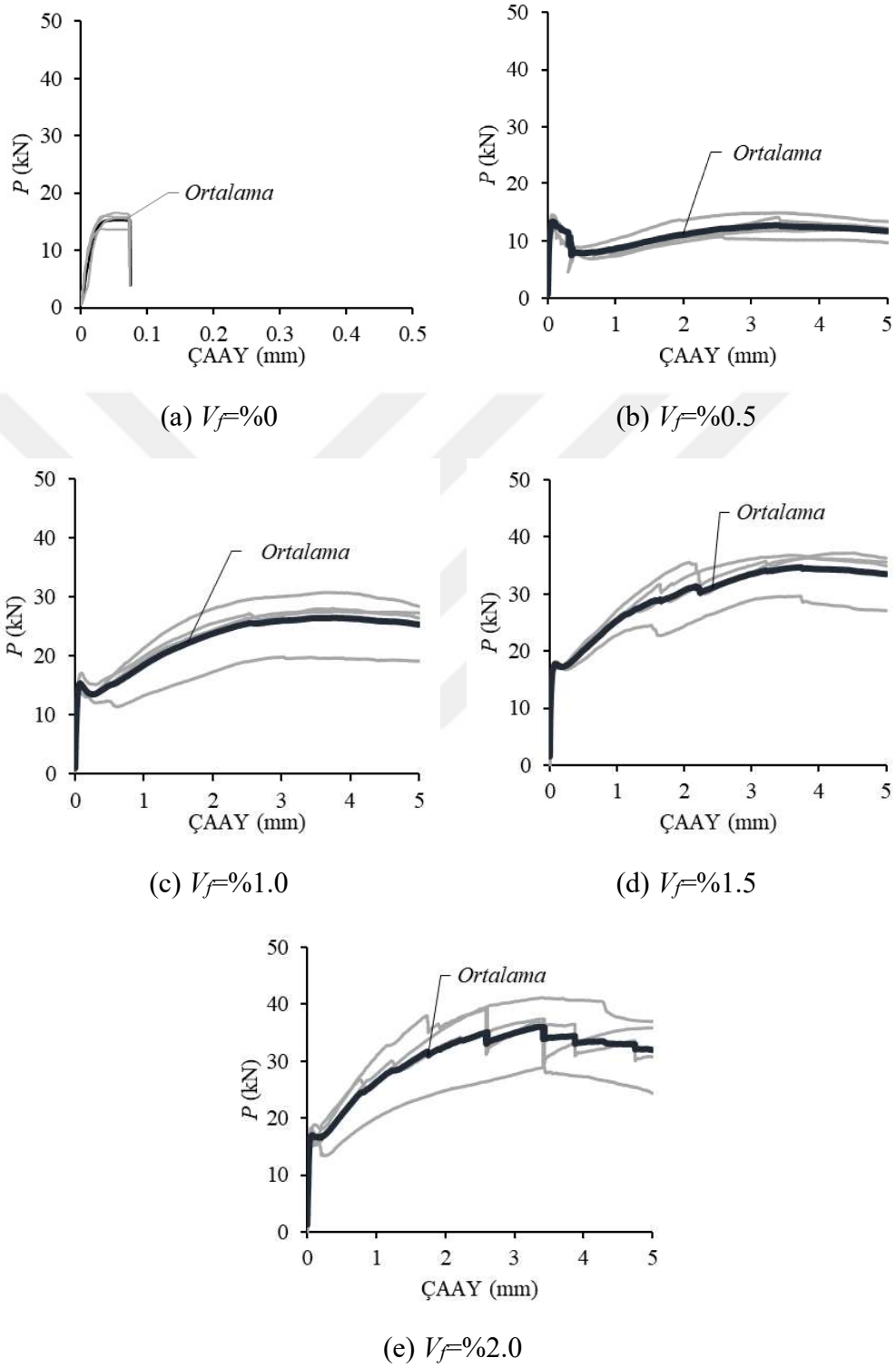
**Şekil 3.16:**  $V_f=0.15$  için kirişlerin  $P$ -ÇAAY grafikleri ve test sonundaki çatlak şekilleri.



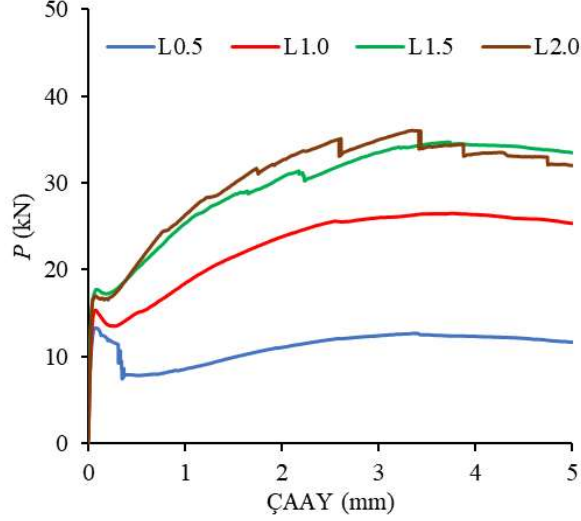
**Şekil 3.17:**  $V_f=0.20$  için kirişlerin  $P$ -ÇAAY grafikleri ve test sonundaki çatlak şekilleri.

Şekil 3.18'de her bir hacimsel lif oranı ( $V_f$ ) için dört kirişin deneysel  $P$ -ÇAAY ilişkileri toplu olarak sunulurken ortalama davranış koyu renkli grafik ile gösterilmiştir. Her karışım için belirlenen ortalama  $P$ -ÇAAY grafikleri Şekil 3.19'da ayrıca sunulmuştur. Şekil 3.19'dan görülebileceği üzere tüm numunelerde yük, çatlama oluşana kadar ÇAAY'nin artmasıyla yaklaşık olarak doğrusal bir şekilde artmaktadır. Çatlama meydana geldiğinde elastik deformasyon aşaması sona ermektedir. Lifsiz kirişlerde çatlama sonrası davranış

sona ererken lifli kirişlerde lif miktarına bağlı olarak davranışın devam ettiği görülmektedir.



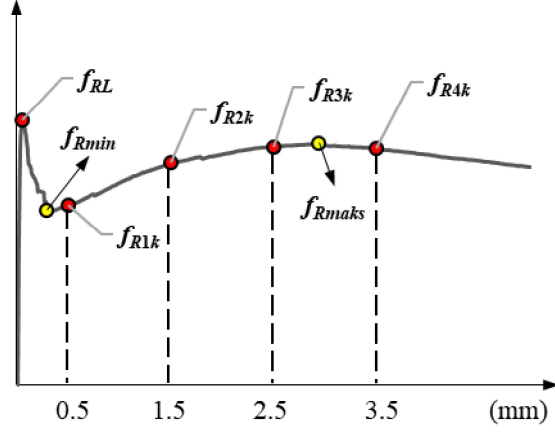
**Şekil 3.18:** Kirişlerin hacimsel lif oranlarına göre  $P$ - $\ÇAAY$  grafikleri.



**Şekil 3.19:** Karışımların ortalama  $P$ -ÇAAY grafikleri.

Belirli ÇAAY değerleri için Bağıntı 3.3 kullanılarak elde edilen kalıcı eğilmede çekme dayanımları ( $f_R$ ),  $P$ - $\delta$  veya  $P$ -ÇAAY grafiklerinde betonun çatlak sonrası davranışın karakteristiğini belirlemektedir. Burada  $l$  mesnetler arası açıklığı,  $b$  kiriş enkesitinin genişliğini ifade ederken  $h_{sp}$  çentiğin ucu ile enkesitin en üst kısmı arasındaki mesafedir. Model Code 2010 (2013)'da lifli betonun çatlama sonrası dayanımını sınıflandırmak için *Kullanılabilirlik Sınır Durumu* (KSD) için  $f_{R1k}$  (ÇAAY<sub>1</sub>=0.5 mm) ve *Taşıma Gücü Sınır Durumu* (TGSD) için  $f_{R3k}$  (ÇAAY<sub>3</sub>=2.5 mm) karakteristik kalıcı dayanımlar dikkate alınmaktadır. Betonda çatlamanın oluşmasıyla elastik davranışın sonlandığı noktadaki dayanım  $f_{RL}$ , 1.5 mm ve 3.5 mm ÇAAY değerlerine karşılık gelen dayanımlar ise sırasıyla  $f_{R2k}$  ve  $f_{R4k}$  olarak nitelenmektedir. Çalışmada bu karakteristik noktalara ek olarak çatlama sonrasındaki yük düşüşü sonrasındaki minimum dayanım ( $f_{R,min}$ ) ve çatlama sonrası elde edilen maksimum dayanıma ( $f_{R,maks}$ ) karşılık gelen noktalarda dikkate alınmıştır. Karakteristik dayanımlar şematik olarak Şekil 3.20'de gösterilmiştir. Karışımlara ait ortalama  $P$ -ÇAAY grafikleri kullanılarak hesaplanan eğilme dayanımları Tablo 3.4'te sunulmuştur. Hesaplanan değerler ortalama  $P$ -ÇAAY grafikleri üzerine işaretlenerek Şekil 3.21'de gösterilmiştir.

$$f_{R,j} = \frac{3 \times P_j \times L}{2 \times b \times h_{sp}^2} \quad (3.3)$$



Şekil 3.20: Lifli betonun eğilme davranışı için karakteristik noktalar (Model Code 2010).

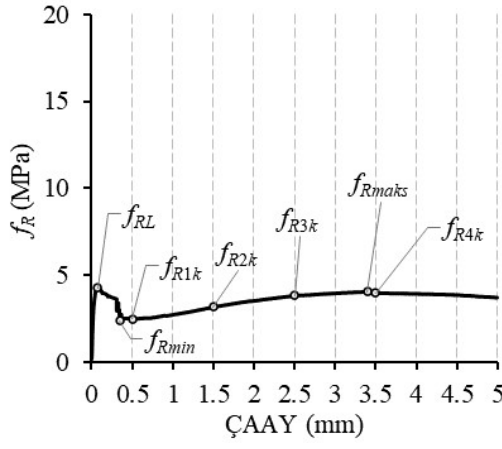
Tablo 3.4: Karışımların ortalama  $P$ -ÇAAY davranışına ait karakteristik değerler.

UYPB Karışımı	R	L0.5	L1.0	L1.5	L2.0
$f_{RL}$ (MPa)	4.89	4.27	4.91	5.68	5.44
ÇAAY <sub>L</sub> (mm)	0.07	0.07	0.07	0.08	0.07
$f_{R1k}$ (MPa)	-	2.52	4.81	6.44	6.59
ÇAAY <sub>1</sub> (mm)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
$f_{R2k}$ (MPa)	-	3.19	6.88	9.16	9.56
ÇAAY <sub>2</sub> (mm)	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
$f_{R3k}$ (MPa)	-	3.83	8.16	10.09	11.11
ÇAAY <sub>3</sub> (mm)	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
$f_{R4k}$ (MPa)	-	4.01	8.46	11.03	10.92
ÇAAY <sub>4</sub> (mm)	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
$f_{Rmin}$ (MPa)	-	2.39	4.33	5.52	5.30
ÇAAY <sub>min</sub> (mm)	-	0.35	0.26	0.18	0.20
$f_{Rmaks}$ (MPa)	-	4.07	8.48	11.11	11.54
ÇAAY <sub>maks</sub> (mm)	-	3.40	3.77	3.72	3.34

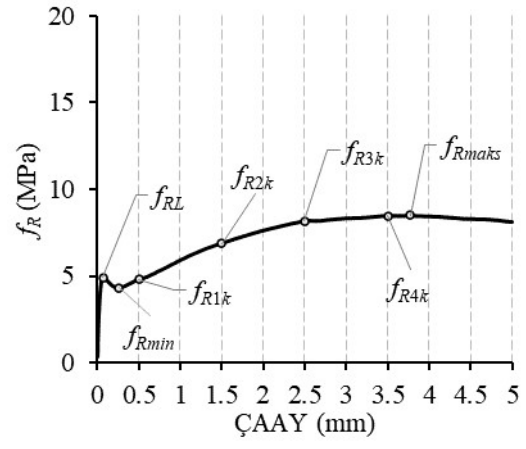


L0.5 karışımı için çatlak sonrası maksimum dayanımın ( $f_{R,maks}$ ) çatlama dayanımının ( $f_{RL}$ ) altında kaldığı görülmüştür (Şekil 3.21a). Bu sonuç hacimce %0.5 PP lif için sehimi yumuşaması davranışın hakim olduğunu göstermektedir. Diğer tüm lif oranları için  $f_{R,maks}$  değerleri  $f_{RL}$  değerlerin üzerine çıkmış ve sehimi sertleşmesi hakim davranış elde edilmiştir (Şekil 3.21). Çatlama sonrası sehimi sertleşmesi davranışı açısından  $f_{R,maks}/f_{RL}$  oranları hesaplanmış, %1.0, %1.5 ve %2.0 lif içerikleri için oranlar sırasıyla 1.7, 2.0 ve 2.1 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak %1.5 ve %2.0 PP lif kullanımının arasında önemli bir farkın olmadığı görülmüştür. Çatlama sonrası lif miktarının çatlak kontrolü kabiliyetini değerlendirmek amacıyla çatlama sonrası minimum dayanımı  $f_{R,min}$  ve çatlama dayanımı  $f_{RL}$  oranlanmıştır. Hacimce %0.5, %1.0, %1.5 ve %2.0 lif içerikleri için  $f_{R,min}/f_{RL}$  oranları sırasıyla 0.6, 0.9, 1.0 ve 1.0 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlardan %0.5 lif kullanımı sonucu çatlama sonrası %44 gibi önemli bir dayanım kaybının meydana geldiği görülmektedir. Buna karşın %1.5 ve %2.0 lif oranları için %3 gibi çok sınırlı bir dayanım kaybı meydana gelmektedir.

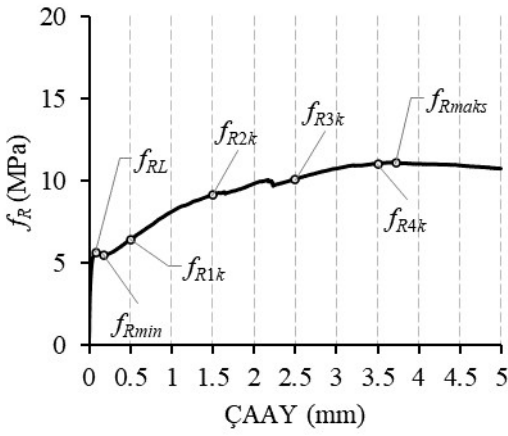
Tüm karakteristik noktadaki dayanımların ( $f_R$ ) hacimsel lif oranlarına göre değişimi Şekil 3.22’de grafiksel olarak sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde genel olarak lif oranının artışı ile birlikte dayanımların artış trendinde olduğu belirlenmiştir (Şekil 3.22). Bununla birlikte %1.5 ve %2.0’lık lif oranları arasında belirgin bir farkın olmadığı görülmektedir. Çatlamaya karşılık gelen dayanımlar ( $f_{RL}$ ) karşılaştırıldığında lif oranının belirgin bir etkisinin olmadığı görülmektedir. KSD için limit durumu ifade eden 0.5 mm’lik ÇAAY’ne karşılık gelen  $f_{R1k}$  dayanımları karşılaştırıldığında lif miktarı arttıkça dayanımda da artış meydana geldiği görülmektedir. Bununla birlikte hacimsel lif oranı %1.5 ve %2.0 arasında dayanım artışı oldukça sınırlı olmuştur. TGSD içinde benzer şekilde dayanım değerleri ( $f_{R3k}$ ) lif oranı ile artış göstermiştir.



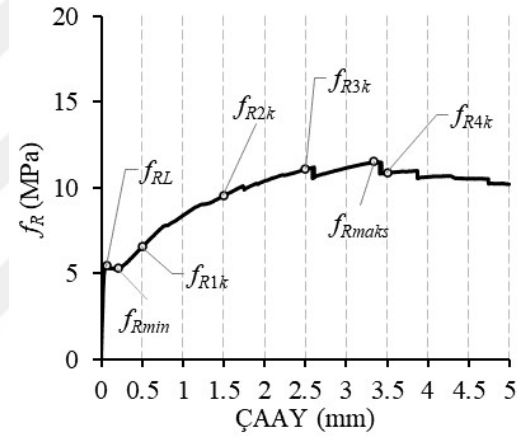
(a)  $V_f=0.5$



(b)  $V_f=1.0$

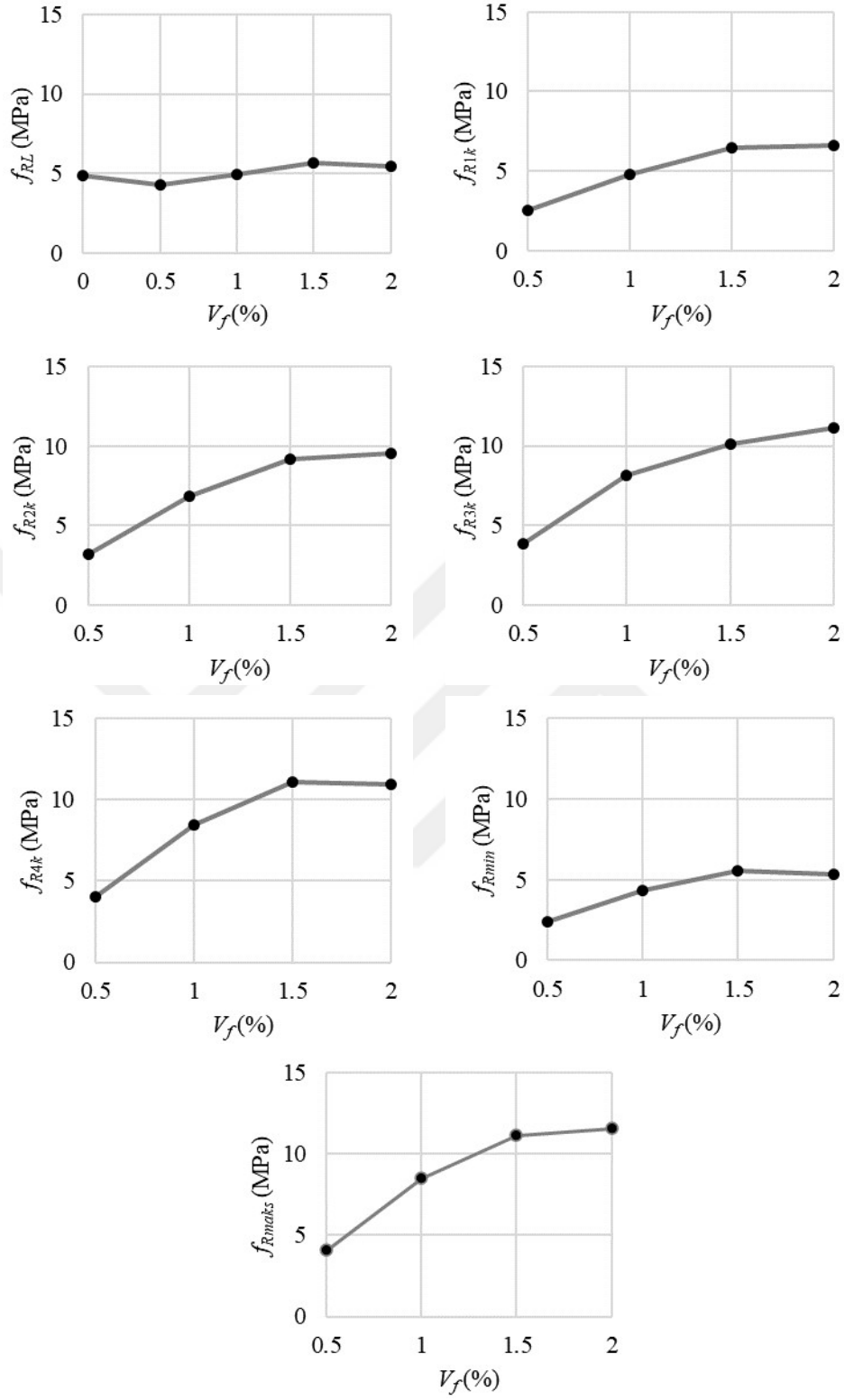


(c)  $V_f=1.5$



(d)  $V_f=2.0$

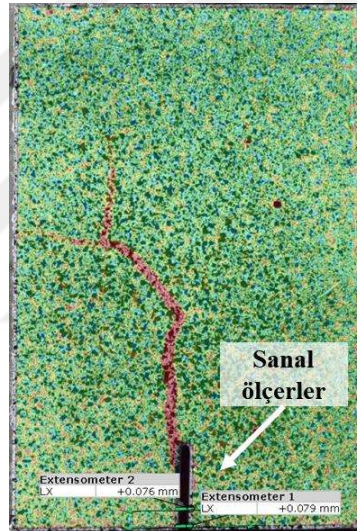
**Şekil 3.21:** Model Code 2010'a göre hesaplanan karakteristik eğilme dayanımlarının hacimsel lif oranlarına göre grafiksel gösterimi.



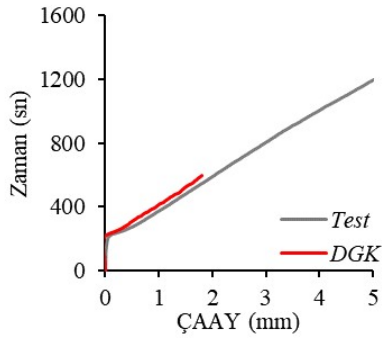
Şekil 3.22: Hacimsel lif oranlarına göre dayanım değişimleri.

### 3.3.4 Dijital Görüntü Korelasyonu Sonuçları

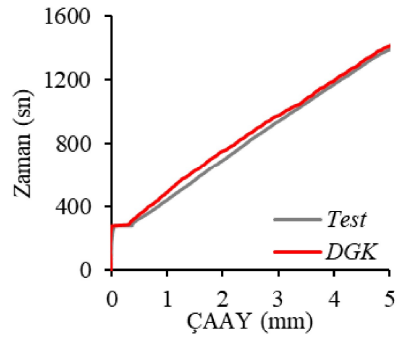
Bu bölümde test kirişlerinin çatlak deseninin ve çatlak ilerlemesini değerlendirmek için yapılan 2B-DGK yönteminin sonuçları paylaşılmıştır. Farklı lif oranlarının çatlama davranışına etkilerinin incelenmesi amacıyla 2B-DGK metodu kullanılarak numunelerin yüzeylerinde oluşan deformasyonlar GOM Correlate 2019 yazılımı ile belirlenmiştir. Yazılım yardımıyla kirişlerin çatlak ağzına sanal ölçerler yerleştirilerek ÇAAY değerleri belirlenmiştir (Şekil 3.23). DGK'nun ölçüm doğruluğunu belirleyebilmek amacıyla GOM Correlate 2019 ile elde ÇAAY-Zaman grafikleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmalı olarak hacimsel lif oranlarına göre Şekiller 3.24-3.27'de sunulmuştur. Şekillerden 2B-DGK ile elde edilen ölçümlerin deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Grafiklerde yakalanan bu uyum DGK'nun eleman yüzeyindeki deformasyonları başarılı bir şekilde belirleyebildiğini göstermektedir.



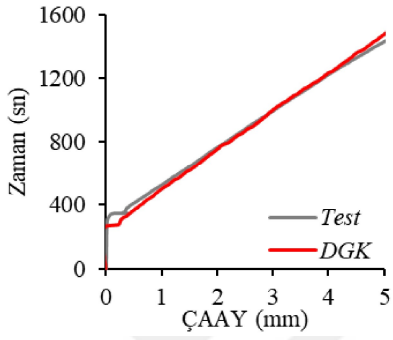
**Şekil 3.23:** Gom Correlate (2019) yazılımı ile 2B-DGK analizi sonucu ÇAAY değerlerinin ölçümü.



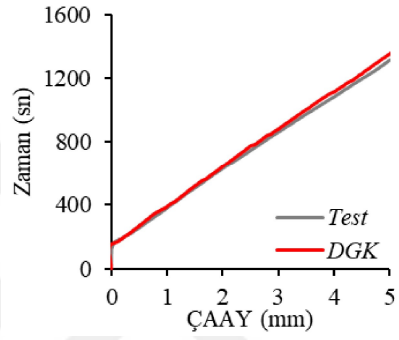
(a) Kiriş 1



(b) Kiriş 2

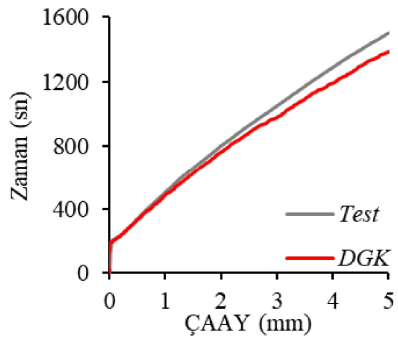


(c) Kiriş 3

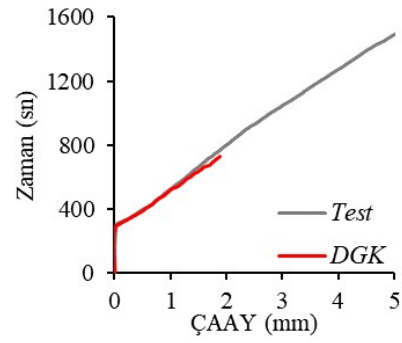


(d) Kiriş 4

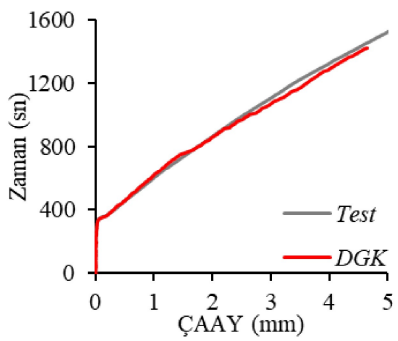
**Şekil 3.24:**  $V_f=0.5$  lif için kirişlerin Zaman-ÇAAAY grafikleri.



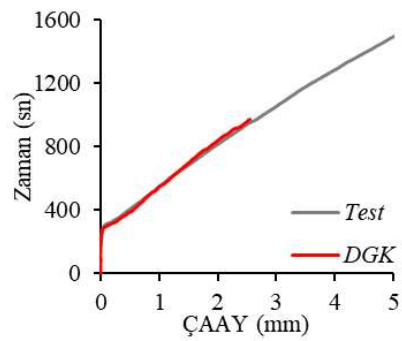
(a) Kiriş 1



(b) Kiriş 2

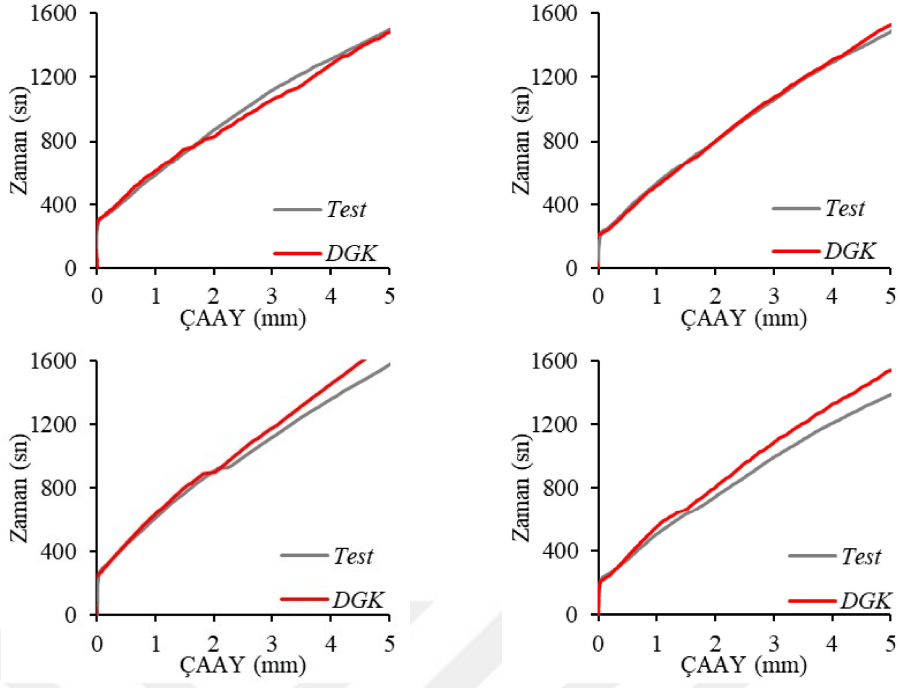


(c) Kiriş 3

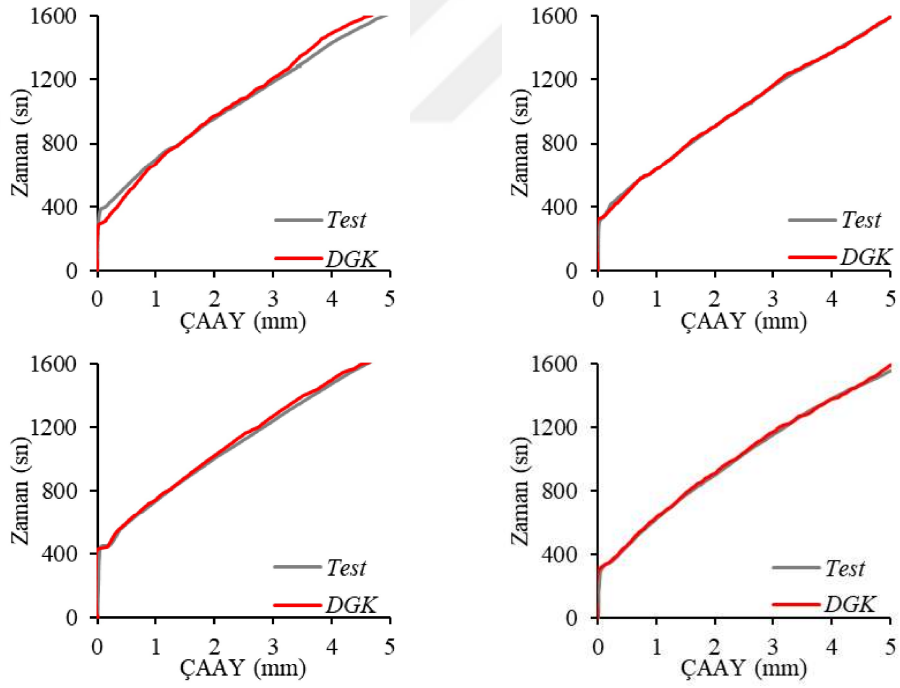


(d) Kiriş 4

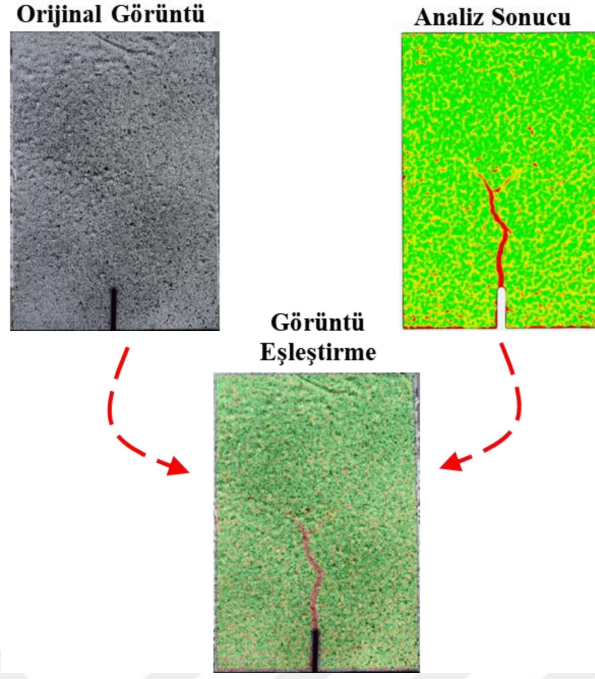
**Şekil 3.25:**  $V_f=1.0$  için kirişlerin ÇAAAY-zaman grafikleri.



Şekil 3.26:  $V_f=1.5$  lifli kirişlerin ÇAAY-zaman grafikleri.

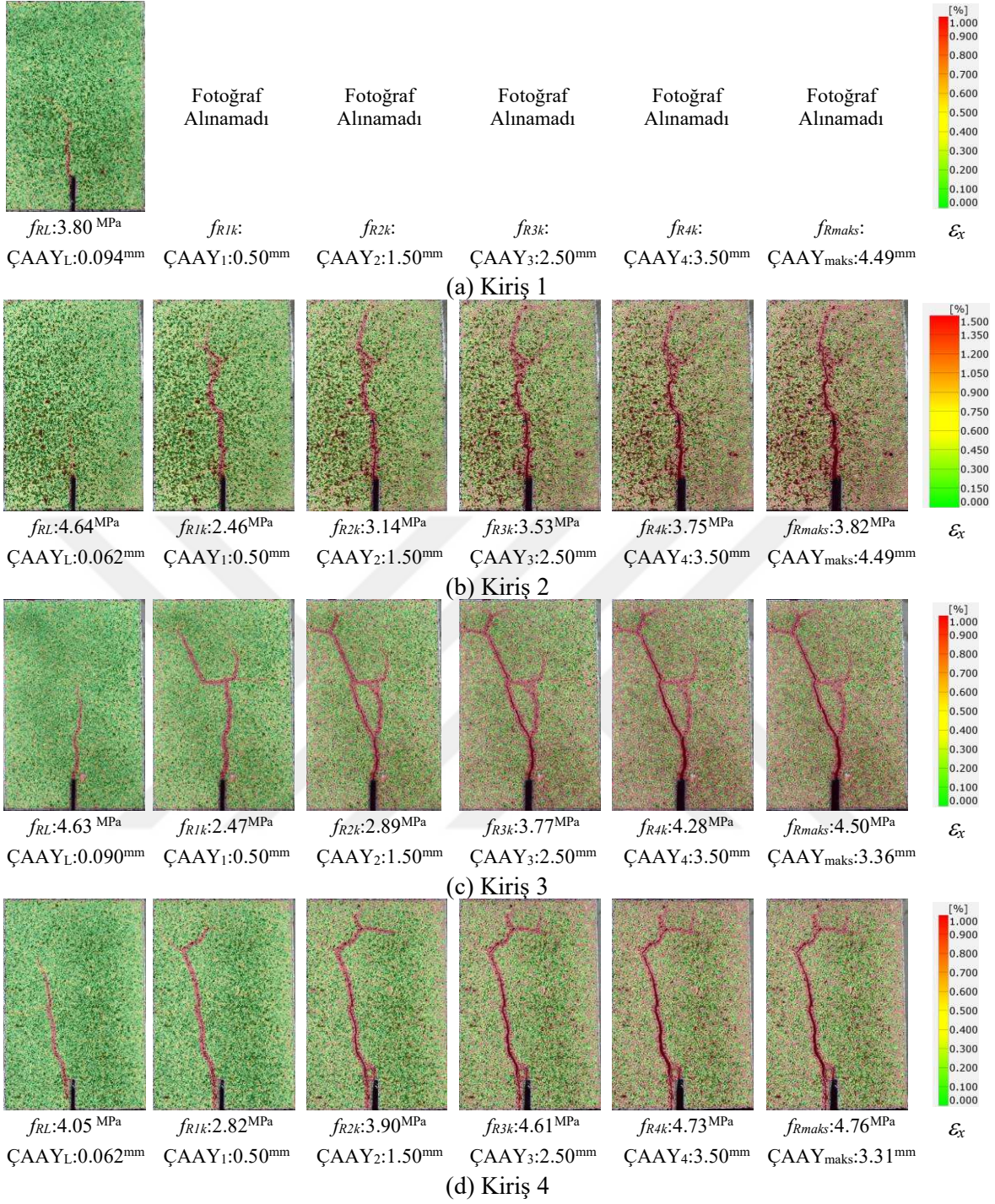


Şekil 3.27:  $V_f=2.0$  lifli kirişlerin ÇAAY-zaman grafikleri.



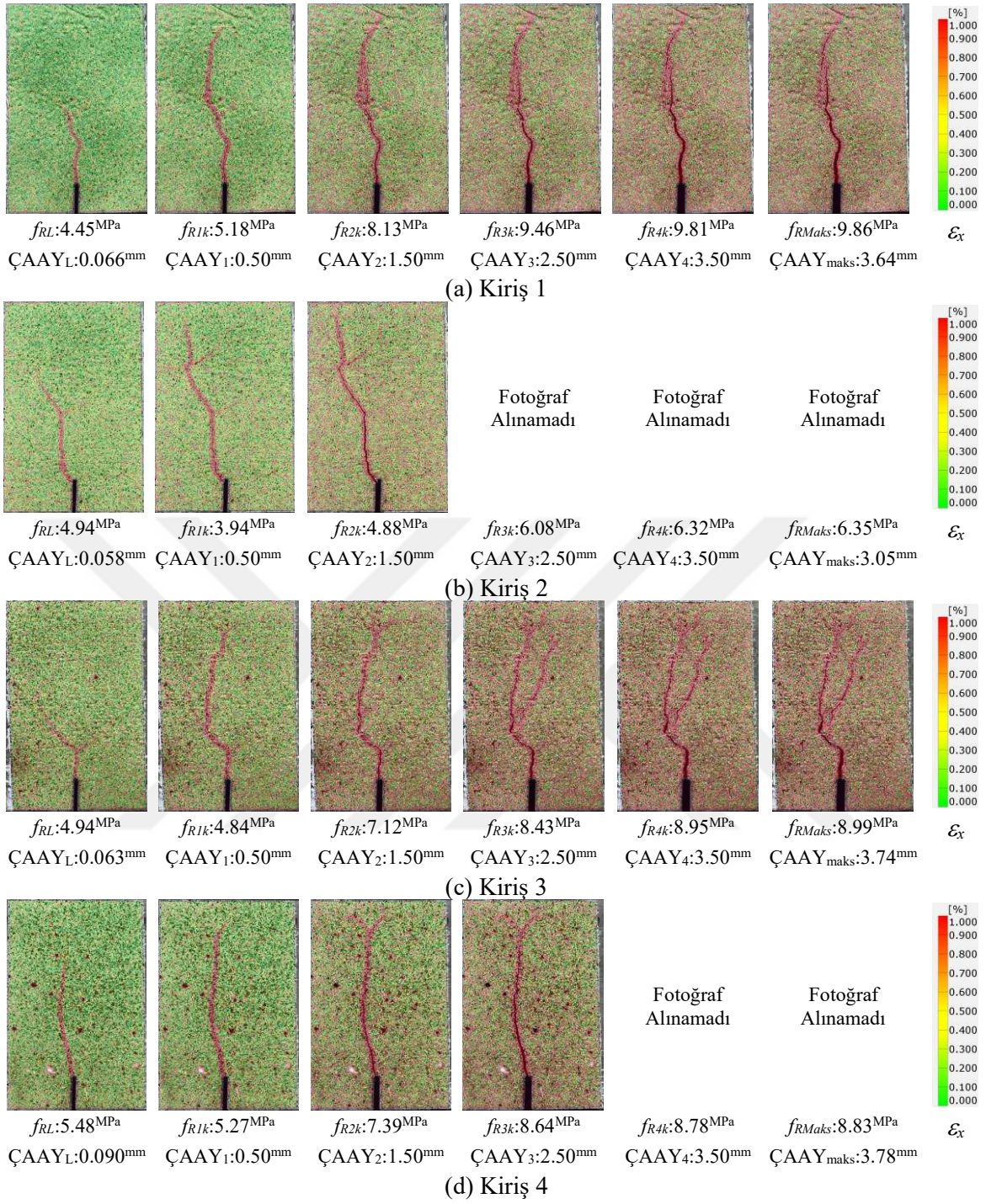
**Şekil 3.28:** Gom Correlate 2019 yazılımı ile 2B-DGK analizi sonucu çatlak incelemesi.

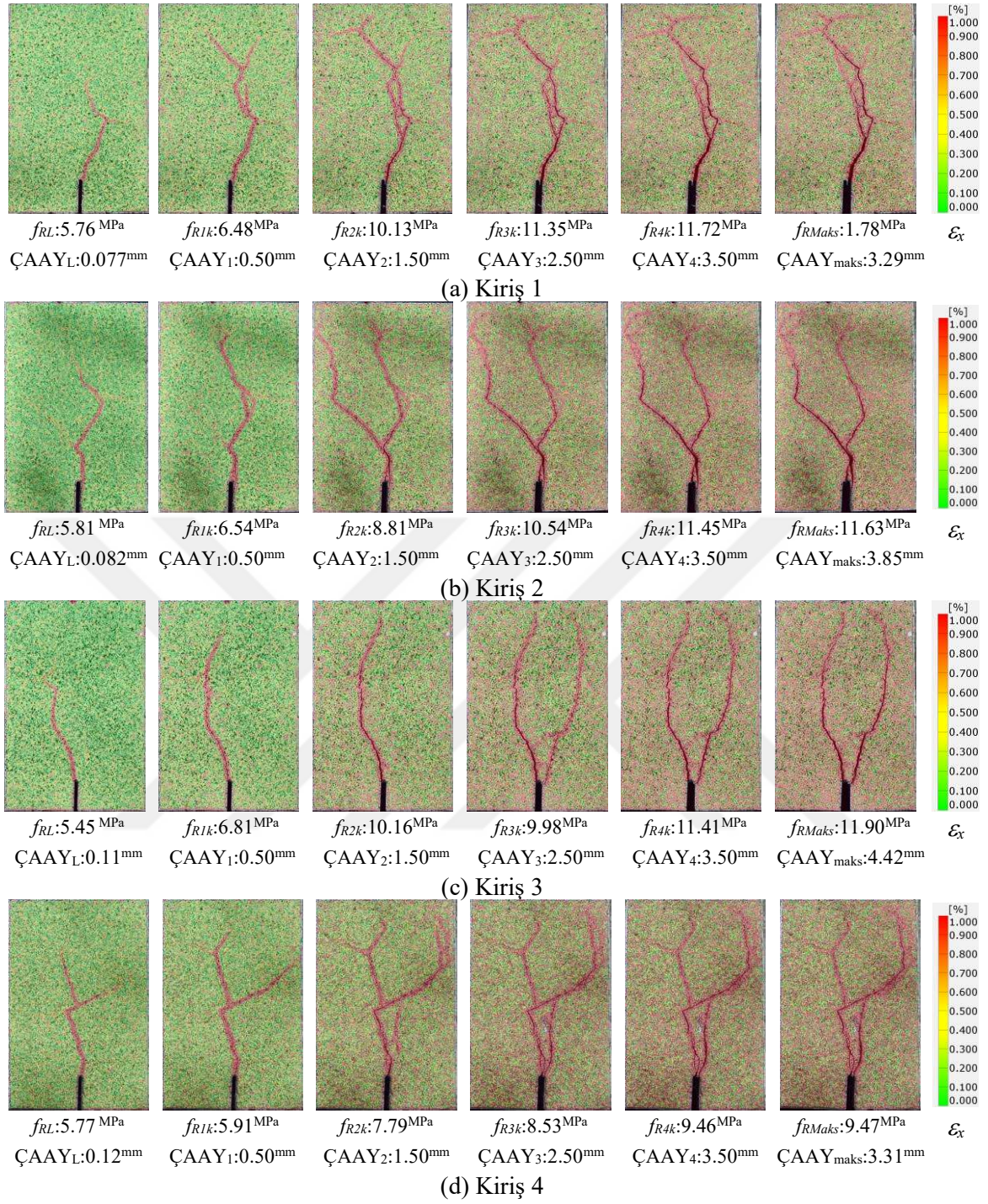
Kirişlerin yüzeyinde oluşan çatlak desenini ve çatlak gelişimini görsel olarak elde edebilmek için yatay yönde 2B-DGK ile elde edilen birim şekildeğiştirme ( $\epsilon_v$ ) alanları, kullanılmıştır. Yüzeydeki çatlakları tanımlamak için, küçük bir bölgede yoğunlaşmış bir deformasyon konturları ile çatlak görselleştirilebilmektedir. Çatlak deseni ve ilerleyişi bu prosedür kullanılarak elde edilmektedir. 2B-DGK analiz sonuçları, Şekil 3.28'de gösterildiği gibi görsel gözleme kıyasla düşük yük seviyelerinde oluşan bir çatlağın tespit edilmesiyle gösterilen görsel gözlemden çok daha detaylı bir incelemeye imkan tanımaktadır. Kirişlerin eğilme davranışının karakteristik noktaları için 2B-DGK ile elde edilen çatlak şekilleri Şekiller 3.29-3.32'de sunulmuştur. Bazı kirişlerin testleri sırasında yaşanan teknik aksaklıklar nedeniyle fotoğraf alınamaması nedeniyle analiz yapılamamıştır.



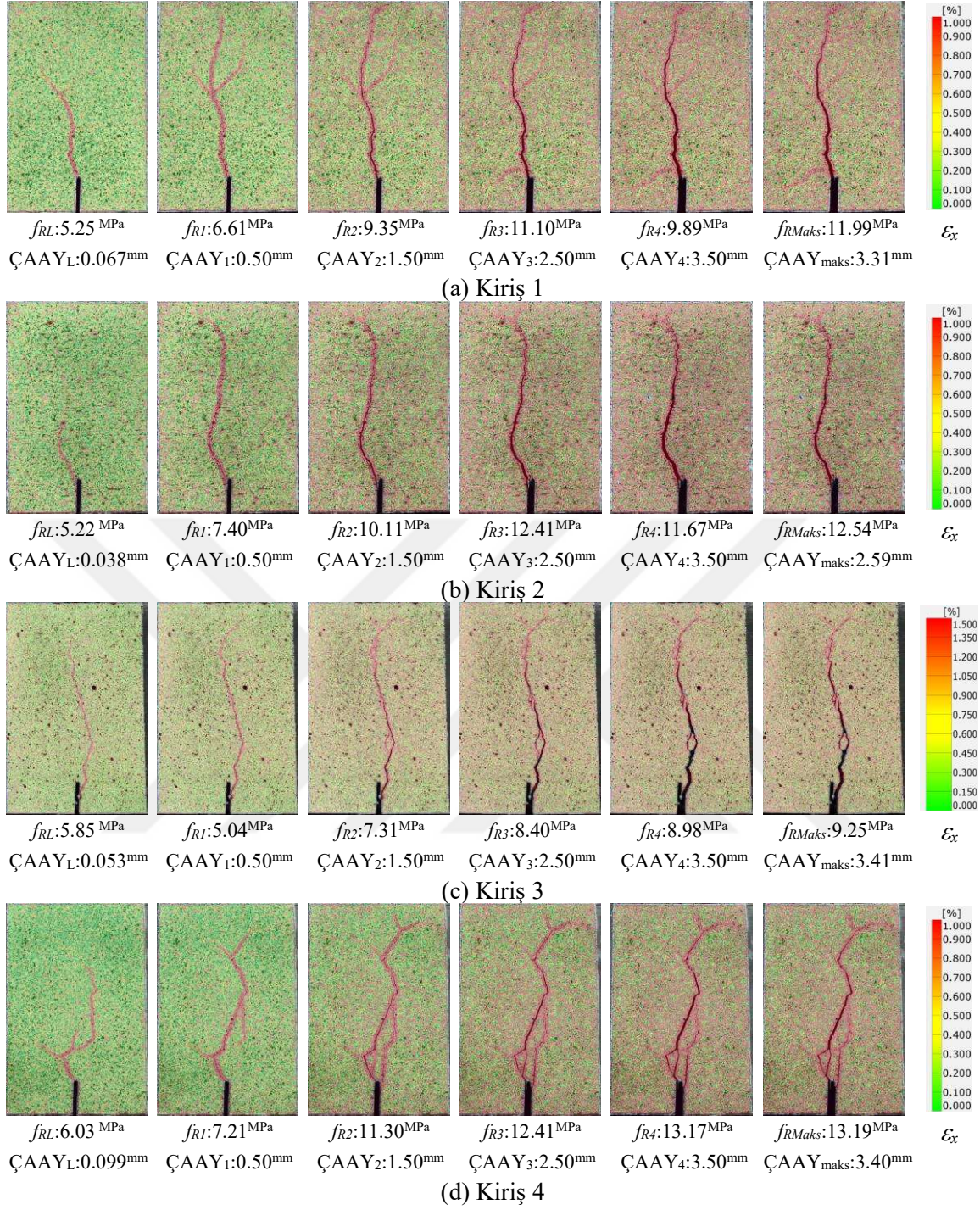
**Şekil 3.29:**  $V_f=0.5$  lifli kirişlerin DGK ile elde edilen çatlak davranışı.







Şekil 3.31:  $V_f = 1.5\%$  lifli kirişlerin DGK ile elde edilen çatlak davranışı.



Şekil 3.32:  $V_f=2.0\%$  lifli kirişlerin DGK ile elde edilen çatlak davranışı.

#### 4. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada sentetik liflerin Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) için kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla farklı hacimsel oranlarda Polipropilen (PP) lifli UYPB karışımlar üzerinde deneysel bir program gerçekleştirilmiştir. Karışımların basınç ve yarmada çekme dayanımları küp ve silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilen eksenel basınç ve yarmada çekme testleri ile belirlenmiştir. Karışımların eğilme davranışının incelenmesi amacıyla çentikli kiriş numuneler üretilmiş ve üç noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Kirişlere ait deneysel yük-sehim ve yük-çatlak ağız açıklığı yerdeğiştirmesi (ÇAAY) ilişkileri elde edilerek eğilme çekme dayanımı ve kırılma enerjisi parametreleri açısından sentetik liflerin eğilme davranışına katkısı değerlendirilmiştir. Kirişlerin çatlak davranışları ve kırılma durumlarını ayrıntılı olarak incelemek amacıyla testler sırasında yüksek çözünürlükte görüntüler alınarak 2 boyutlu dijital görüntü korelasyonu (2B-DGK) yöntemi uygulaması gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Eksenel basınç testlerinin sonucunda hacimce %2.0 oranında PP lif içeren UYPB karışımı dışındaki lif miktarları için basınç dayanımında belirgin bir değişimin olmadığı görülmektedir.
- Yarmada çekme testlerinin sonuçları karşılaştırıldığında basınç dayanımına benzer şekilde PP lif kullanımının yarmada çekme dayanımı açısından belirgin bir katkısının olmadığı belirlenmiştir.
- Karışımların enerji yutma kapasiteleri değerlendirildiğinde çatlama yüküne kadar oldukça düşük oranda enerji yutulduğu görülürken elastik bölgede hacimce %0.5 PP lif kullanımı lifsiz karışıma göre avantaj sağlayamamıştır. Bununla birlikte daha yüksek lif oranlarına çıkıldığına %33'e varan artışların sağlanabildiği belirlenmiştir.
- Eğilme testleri sonucunda lifsiz kirişlerde çatlama ile birlikte kapasiteye ulaşmakta ve davranış gevrek bir şekilde aniden sona ermiştir. Hacimce %0.5 lif içeren UYPB kirişlerinde ise çatlama sonrası belirli bir dayanım kaybı oluşmasına rağmen davranış sona ermemiş ve deformasyon yumuşaması davranışı hakim olmuştur. Diğer lif oranlarının hepsinde çatlama sonrası çok sınırlı bir dayanım kaybı oluşmuş, liflerin çatlak köprüleme özelliği sonucu yük taşıma kapasitesi artan bir seyir elde edilmiştir. Bu davranış UYPB'da karakteristik olarak görülen

deformasyon sertleşmesi olarak adlandırılmakta ve tepe yüküne kadar devam etmektedir.

- Karışımların yük-çatlak ağız açıklığı yerdeğiştirmesi (ÇAAY) davranışları incelendiğinde hacimce %0.5 lif kullanımını sonucu çatlama sonrası %44 gibi önemli bir dayanım kaybının meydana geldiği görölmektedir. Buna karşın %1.5 ve %2.0 lif oranları için %3 gibi çok sınırlı bir dayanım kaybı meydana gelmiştir.
- Çatlamaya karşılık gelen dayanımlar karşılaştırıldığında lif oranının belirgin bir etkisinin olmadığı görölmektedir. Kullanılabilirlik Sınır Durumu için limit durumu ifade eden 0.5 mm'lik ÇAAY'ne karşılık gelen dayanımlar karşılaştırıldığında lif miktarı arttıkça dayanımda da artış meydana geldiği görölmektedir. Bununla birlikte hacimsel lif oranı %1.5 ve %2.0 arasında dayanım artışı oldukça sınırlı olmuştur. Taşıma Gücü Sınır Durumu içinde benzer şekilde dayanım değerleri lif oranı ile artış göstermiştir.
- Çalışmada 2 Boyutlu Dijital Görüntü Korelasyonu (2B-DGK) analizleri sonucunda elde edilen sonuçların mekanik ölçerler ile elde edilen verilerle oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir. 2B-DGK sayesinde testlerin çok erken aşamalarında meydana gelen deformasyonlar ve çatlak gelişimi ayrıntılı bir şekilde incelenebilmiştir.

## 5. KAYNAKLAR

- Ahmad, J., Zaid, O., Shahzaib, M., Abdullah, M. U., Ullah, A., & Ullah, R. (2021). Mechanical properties of sustainable concrete modified by adding marble slurry as cement substitution. *AIMS Materials Science*, 8(3), 343–358. <https://doi.org/10.3934/materci.2021022>
- Alawi, A., & Mashrei, M. (2022). Shear capacity of sustainable ultra-high performance concrete beam reinforced with macro synthetic fiber as a sustainable alternative for stirrups and steel fiber. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01443. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01443>
- Alberti, M. G., Enfedaque, A., Gálvez, J. C., & Cortez, A. (2020a). Optimisation of fibre reinforcement with a combination strategy and through the use of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 235, 117289. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117289>
- Alberti, M. G., Enfedaque, A., & Iranzo, Á. P. (2020b). Recent advances in structural fibre-reinforced concrete focused on polyolefin-based macro-synthetic fibres. *Materiales De Construcción*, 70(337), 206. <https://doi.org/10.3989/mc.2020.12418>
- Ansari rad, T., Tanzadeh, J., pourdada, A. (2020). Laboratory evaluation of self-compacting fiber-reinforced concrete modified with hybrid of nanomaterials. *Construction and Building Materials*. 232, 117211. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117211>
- Aslani, F., & Nejadi, S. (2013). Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: Compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress–strain curve, and energy dissipated under compression. *Composites Part B: Engineering*, 53, 121–133. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.044>
- ASTM C1437-20. (2020). Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. ASTM International.
- Banthia, N., & Sappakittipakorn, M. (2007). Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cement and Concrete Research*, 37(9), 1366–1372. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.05.005>

- Banthia, N., Majdzadeh, F., Wu, J., & Bindiganavile, V. (2014). Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear. *Cement and Concrete Composites*, 48, 91–97. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.10.018>
- Behnood, A., & Ziari, H. (2008). Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures, *Cem. Concr. Compos.* 30 (2) 106–112.
- Bhosale, A., Lakavath, C., & Prakash, S. S. (2020). Multi-linear tensile stress-crack width relationships for hybrid fibre reinforced concrete using inverse analysis and digital image correlation. *Engineering Structures*, 225, 111275. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111275>
- Cengiz, Ö., & Turanlı, L. (2004). Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test. *Cement and Concrete Research*, 34(8), 1357–1364. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.024>
- Chan, Y. W., & Chu, S.H. (2004). Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1167–1172.
- Chen, X., Wan, D., Jin, L., Qian, K., & Fu, F. (2019). Experimental studies and microstructure analysis for ultra high-performance reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 229, 116924. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116924>
- Chu, T. P., Ranson, W. F., & Sutton, M. A. (1985). Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental Mechanics*, 25(3), 232–244. <https://doi.org/10.1007/bf02325092>
- Dehghanpour, H., Subaşı, S., Guntepe, S., Emiroğlu, M., & Maraşlı, M. (2022). Investigation of fracture mechanics, physical and dynamic properties of UHPCs containing PVA, glass and steel fibers. *Construction and Building Materials*, 328, 127079. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127079>

- Ding, Y., Yu, K., & Li, M. (2022). A review on high-strength engineered cementitious composites (HS-ECC): Design, mechanical property and structural application. *Structures*, 35, 903–921. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.10.036>
- Du, J., Meng, W., Khayat, K. H., Bao, Y., Guo, P., Lyu, Z., Abu-Obeidah, A., Nassif, H., & Wang, H. (2021). New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). *Composites Part B: Engineering*, 224, 109220. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109220>
- EN 12390-1. (2021). Testing hardened concrete - Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds, European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 12390-3. (2019). Testing Hardened Concrete—Part 3: Compressive Strength of Test Specimens, European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 12390-6. (2009). Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens, European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 14651+A1. (2007). Test method for Metallic Fibre Concrete Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality (LOP), Residual), European Committee for Standardization, Brussels.
- Fang, Z., Xiang, Y., Kuang, Z., & Wang, C. (2011). Fatigue properties of reactive powder concrete with different steel fiber ratios. *Journal of Hunan University Natural Sciences*, 38(6), 6-12.
- Fang, Z., Hu, R., Jiang, R., Yu, X., & Liu, C. (2020). Fatigue Behavior of Stirrup Free Reactive Powder Concrete Beams Prestressed with CFRP Tendons. *Journal of Composites for Construction*, 24(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cc.1943-5614.0001027](https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0001027)
- Ghasemzadeh Mosavinejad, S. H., Langaroudi, M. A. M., Barandoust, J., & Ghanizadeh, A. (2020). Electrical and microstructural analysis of UHPC containing short PVA fibers. *Construction and Building Materials*, 235.
- GOM Correlate. Versiyon 2019. Zeiss GOM Metrology.



- Gong, J., Ma, Y., Fu, J., Hu, J., Ouyang, X., Zhang, Z., & Wang, H. (2022). Utilization of fibers in ultra-high performance concrete: A review. *Composites Part B: Engineering*, 241, 109995. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109995>
- Guo, Y.-Q., Wang, J.-Y., & Gu, J.-B. (2022). Nonlinear Inverse Analysis for predicting the tensile Properties of Strain-Softening and Strain-Hardening UHPFRC. *Materials*, 15(9), 3067. <https://doi.org/10.3390/ma15093067>
- Hannawi, K., Bian, H., Prince-Agbodjan, W., & Raghavan, B. (2016). Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes. *Composites Part B: Engineering*, 86, 214–220. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.059>
- Hasgül, U., Türker, K., Birol, T., & Yavaş, A. (2018). Flexural behavior of ultra-high-performance fiber reinforced concrete beams with low and high reinforcement ratios. *Structural Concrete*, 19(6), 1577–1590. <https://doi.org/10.1002/suco.201700089>
- Hasgül, U., Yavaş, A., & Birol, T. (2023). Replacement of stirrups by steel fibers in shear dominant UHPFRC beams. *Turkish Journal of Civil Engineering*, 34(2), 103–124. <https://doi.org/10.18400/tjce.1237663>
- Hsie, M., Tu, C., & Song, P. (2008). Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. *Materials Science and Engineering: A*, 494(1–2), 153–157. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2008.05.037>
- Huang, H., Gao, X., & Teng, L. (2021). Fiber alignment and its effect on mechanical properties of UHPC: An overview. *Construction and Building Materials*, 296, 123741. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123741>
- Kim, D. J., Naaman, A., & El-Tawil, S. (2008, March). High tensile strength strain-hardening FRC composites with less than 2% fiber content. In Fehling, E., Schmidt, M., Sturwald, S. (Eds.), *Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete* (pp. 169–176). Germany.

- Lava, P., Cooreman, S., Coppieters, S., De Strycker, M., & Debruyne, D. (2009). Assessment of measuring errors in DIC using deformation fields generated by plastic FEA. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(7–8), 747–753. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.03.007>
- Lava, P., Cooreman, S., & Debruyne, D. (2010). Study of systematic errors in strain fields obtained via DIC using heterogeneous deformation generated by plastic FEA. *Optics and Lasers in Engineering*, 48(4), 457–468. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2009.08.013>
- Lao, J., Xu, L., Huang, B., Dai, J., & Shah, S. P. (2022). Strain-hardening Ultra-High-Performance Geopolymer Concrete (UHPC): Matrix design and effect of steel fibers. *Composites Communications*, 30, 101081. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2022.101081>
- Lecompte, D., Smits, A., Bossuyt, S., Sol, H., Vantomme, J., Van Hemelrijck, D., & Habraken, A. M. (2006). Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. *Optics and Lasers in Engineering*, 44(11), 1132–1145. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2005.10.004>
- Lee, J., Cho, B., Choi, E., & Kim, Y. (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. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.017>
- Leutbecher, T., & Rebling, J. (2019). Predicting the postcracking strength of ultra-high performance fiber reinforced concrete by means of three-point bending tests according to EN 14651. *Structural Concrete*, 20, 2081–2095.
- Li, P., Yu, Q., & Brouwers, H. J. (2018). Effect of coarse basalt aggregates on the properties of Ultra-high Performance Concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, 170, 649–659. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.109>
- Li, B., Chi, Y., Xu, L., Shi, Y., & Li, C. (2018). Experimental investigation on the flexural behavior of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 191, 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.202>

- Li, Y., Zhang, Y., Yang, E., & Tan, K. H. (2019). Effects of geometry and fraction of polypropylene fibers on permeability of ultra-high performance concrete after heat exposure. *Cement and Concrete Research*, 116, 168–178. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.11.009>
- Liu, B., Guo, J., Wen, X., Zhou, J., & Deng, Z. (2020). Study on flexural behavior of carbon fibers reinforced coral concrete using digital image correlation. *Construction and Building Materials*, 242, 117968. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117968>
- Mazloom, M. Ramezani pour, A. A., & Brooks, J. J. (2004). Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete, *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 347–357.
- Mazzanti, P. (2017). Toward transportation asset management: what is the role of geotechnical monitoring? *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 7(5), 645–656. <https://doi.org/10.1007/s13349-017-0249-0>
- Model Code 2010. (2013). In *Fib Model Code 2010; Structural Concrete*: Lausanne, Switzerland.
- Mosavinejad, S. H. G., Langaroudi, M. a. M., Barandoust, J., & Ghanizadeh, A. (2020). Electrical and microstructural analysis of UHPC containing short PVA fibers. *Construction and Building Materials*, 235, 117448. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117448>
- Mostofinejad, D., Moosaie, I., Eftekhari, M., & Hesami, E. (2022). Ultra-High Performance Hybrid Polyvinyl Alcohol-Polypropylene Fiber-Reinforced Cementitious Composites with Augmented Toughness and Strain-Hardening Behavior. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46(3), 1997–2009. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00815-4>
- Medina, A. L. N., García, J. A., & Castellanos, N. T. (2022). Flexural behavior of environmentally friendly ultra-high-performance concrete with locally available low-cost synthetic fibers. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(13), 6281–6304. <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1938686>

- Oh, T., You, I., Banthia, N., ve Yoo, D-Y. (2021). Deposition of nanosilica particles on fiber surface for improving interfacial bond and tensile performances of ultra-highperformance fiber-reinforced concrete. *Composite B Engineering*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109030>
- Orteu, J. (2009). 3-D computer vision in experimental mechanics. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(3–4), 282–291. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2007.11.009>
- Pająk, M., Janiszewski, J., & Kruszka, L. (2019). Laboratory investigation on the influence of high compressive strain rates on the hybrid fibre reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 227, 116687. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116687>
- Pan, B., Kemaq, Q., Xie, H., & Asundi, A. (2009). Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement Science and Technology*, 20(6), 062001. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/20/6/062001>
- Pan, B. (2010). Recent progress in digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 51(7), 1223–1235. <https://doi.org/10.1007/s11340-010-9418-3>
- Pan, B. (2018). Digital image correlation for surface deformation measurement: historical developments, recent advances and future goals. *Measurement Science and Technology*, 29(8), 082001. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aac55b>
- Pei, Y., Chen, B., Afgan, S., Haque, M. A., Wu, M., & Han, J. (2021). Experimental research on ductility enhancement of ultra-high performance concrete incorporation with basalt fibre, polypropylene fibre and glass fibre. *Construction and Building Materials*, 279, 122489. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122489>
- Pérez, V. Q., Prieto, D. C., & Orduz, L. E. Z. (2021). Mechanical characterization of self-compacting steel fiber reinforced concrete using digital image correlation. *Engineering Fracture Mechanics*, 246, 107618. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107618>
- Peters, W. H., & Ranson, W. F. (1982). Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Optical Engineering*, 21(3). <https://doi.org/10.1117/12.7972925>

- Peters, W. H., Ranson, W. F., Sutton, M. A., Chu, T. P., & Anderson, J. T. (1983). Application of digital correlation methods to rigid body mechanics. *Optical Engineering*, 22(6). <https://doi.org/10.1117/12.7973231>
- Picazo, A., Gálvez, J. C., Alberti, M. G., & Enfedaque, A. (2018). Assessment of the shear behaviour of polyolefin fibre reinforced concrete and verification by means of digital image correlation. *Construction and Building Materials*, 181, 565–578.
- Rambo, D. a. S., De Andrade Silva, F., & Filho, R. D. T. (2014). Mechanical behavior of hybrid steel-fiber self-consolidating concrete: Materials and structural aspects. *Materials in Engineering*, 54, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.014>
- Reddy, K. C., & Subramaniam, K. V. L. (2017a). Experimental investigation of crack propagation and post-cracking behaviour in macrosynthetic fibre reinforced concrete. *Magazine of Concrete Research*, 69(9), 467–478. <https://doi.org/10.1680/jmacr.16.00396>
- Reddy, K. C., & Subramaniam, K. V. L. (2017b). Analysis for multi-linear stress-crack opening cohesive relationship: Application to macro-synthetic fiber reinforced concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 169, 128–145. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.11.015>
- Richard, P., & Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501–1511. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2)
- RILEM 50-FMC Committee (Fracture Mechanics of Concrete). (1985). Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Materials and Structures*, 18(106) 285-290.
- Rucka, M., Wojtczak, E., Knak, M., & Kurpińska, M. (2021). Characterization of fracture process in polyolefin fibre-reinforced concrete using ultrasonic waves and digital image correlation. *Construction and Building Materials*, 280, 122522. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122522>

- Shen, X., & Brühwiler, E. (2020). Influence of local fiber distribution on tensile behavior of strain hardening UHPFRC using NDT and DIC. *Cement and Concrete Research*, *132*, 106042. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106042>
- Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., & Fang, Z. (2015). A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*, *101*, 741–751. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>
- Skarżyński, Ł., & Suchorzewski, J. (2018). Mechanical and fracture properties of concrete reinforced with recycled and industrial steel fibers using Digital Image Correlation technique and X-ray micro computed tomography. *Construction and Building Materials*, *183*, 283–299. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.182>
- Soltanzadeh, F., Cunha, V. M. C. F., & Barros, J. a. O. (2019). Assessment of different methods for characterization and simulation of post-cracking behavior of self-compacting steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, *227*, 116704. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116704>
- Song, P., & Hwang, S. Y. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, *18*(9), 669–673. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027>
- Suárez, F., Felipe-Sesé, L., Díaz, F., Gálvez, J. C., & Alberti M. G. (2020). On the fracture behaviour of fibre-reinforced gypsum using micro and macro polymer fibres. *Construction and Building Materials*, *244*, 118347. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118347>
- Sutton, M. A., Wolters, W., Peters, W. H., Ranson, W. F., & McNeill, S. R. (1983). Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and Vision Computing*, *1*(3), 133–139. [https://doi.org/10.1016/0262-8856\(83\)90064-1](https://doi.org/10.1016/0262-8856(83)90064-1)
- Sutton, M. A., Cheng, M., Peters, W. H., Chao, Y. J., & McNeill, S. R. (1986). Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis. *Image and Vision Computing*, *4*(3), 143–150. [https://doi.org/10.1016/0262-8856\(86\)90057-0](https://doi.org/10.1016/0262-8856(86)90057-0)

- Sutton, M. A., & Hild, F. (2015). Recent advances and perspectives in digital image correlation. *Experimental Mechanics*, *55*(1), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s11340-015-9991-6>
- Trinh-Duc, D., Piotrowski, A., Ajdukiewicz, C., Woyciechowski, P., & Gajewski, M. (2021). Estimation of Post-Cracking Dissipation Capabilities of Fiber Reinforced Concretes in Three Point Bending Test Monitored with Application of Digital Image Correlation System. *Materials*, *14*(17), 5088. <https://doi.org/10.3390/ma14175088>
- Türker, K., Hasgül, U., Birol, T., Yavaş, A., & Yazıcı, H. (2019). Hybrid fiber use on flexural behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete beams. *Composite Structures*, *229*, 111400. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111400>
- Ullah, R., Yuan, Q., Ahmad, J., Vatin, N., & El-Shorbagy, M. A. (2022). Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A State-of-the-Art review. *Materials*, *15*(12), 4131. <https://doi.org/10.3390/ma15124131>
- Wang, Y., Hu, S., & He, Z. (2021). Mechanical and fracture properties of geopolymer concrete with basalt fiber using digital image correlation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, *112*, 102909. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.102909>
- Wille, K., Naaman, A. E., El-Tawil, S., & Parra-Montesinos, G. J. (2011). Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing. *Materials and Structures*, *45*(3), 309–324. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9767-0>
- Wille, K., El-Tawil, S., & Naaman, A. E. (2014). Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. *Cement and Concrete Composites*, *48*, 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.015>

- Yan, P., Chen, B., Afgan, S., Haque, M. A., Wu, M., & Han, J. (2021). Experimental research on ductility enhancement of ultra-high performance concrete incorporation with basalt fibre, polypropylene fibre and glass fibre. *Construction and Building Materials*, 279, 122489. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122489>
- Yazıcı, H. (2007). The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures. *Building and Environment*, 42(5), 2083–2089. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.013>
- Yoo, D. Y., Shin, W., Chun, B., & Banthia, N. (2020). Assessment of steel fiber corrosion in self-healed ultra-high-performance fiber-reinforced concrete and its effect on tensile performance. *Cement and Concrete Research*, 133, 106091. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106091>
- Yu, R., Spiesz, P. P., & Brouwers, H. J. (2015). Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. *Cement and Concrete Composites*, 55, 383–394. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.024>
- Yu, R., Van Beers, L., Spiesz, P. P., & Brouwers, H. J. (2016). Impact resistance of a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) under pendulum impact loadings. *Construction and Building Materials*, 107, 203–215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.157>
- Yu, K., Yu, J., Dai, J., Lu, Z., & Shah, S. P. (2018). Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers. *Construction and Building Materials*, 158, 217–227. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.040>
- Yu, K., Zhu, W., Ding, Y., Lu, Z., Yu, J., & Xiao, J. (2019). Micro-structural and mechanical properties of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) incorporation of recycled fine powder (RFP). *Cement and Concrete Research*, 124, 105813. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105813>



- Zhang, D., Dasari, A., & Tan, K. H. (2018). On the mechanism of prevention of explosive spalling in ultra-high performance concrete with polymer fibers. *Cement and Concrete Research*, *113*, 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.08.012>
- Zheng, Z., & Feldman, D. (1995). Synthetic fibre-reinforced concrete. *Progress in Polymer Science*, *20*(2), 185–210. [https://doi.org/10.1016/0079-6700\(94\)00030-6](https://doi.org/10.1016/0079-6700(94)00030-6)
- Zhu, J., Xu, L., Huang, B., Weng, K., & Dai, J. (2022). Recent developments in Engineered/Strain-Hardening Cementitious Composites (ECC/SHCC) with high and ultra-high strength. *Construction and Building Materials*, *342*, 127956. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127956>



# ÖZGEÇMİŞ

## Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Alper AVCIALP

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

## Öğrenim Bilgileri

Derece	Okul/Program	Yıl
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2024
Lisans	İzmir Ekonomi Üniversitesi / İnşaat Mühendisliği	2019
Lise	Gülser Mehmet Bolluk Anadolu Lisesi	2014