

# Sentetik lifin Ultra Yüksek Performanslı Beton'un kırılma davranışına etkisi

Tamer BİROL\*

Balıkesir Üniversitesi Müh. Fak. İnşaat Müh. Böl., Çağış kampüsü, Balıkesir.

Geliş Tarihi (Received Date): 10.10.2024

Kabul Tarihi (Accepted Date): 14.12.2024

## Öz

Bu çalışmada sentetik lifin Ultra Yüksek Performanslı Beton'un (UYPB) kırılma davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada hacimce %0, %0.5 ve %1.0 oranlarında sentetik lif içeren toplam üç adet UYPB karışımı kullanılarak çentikli prizma numuneler üretilmiş ve üç noktalı eğilme altında test edilmiştir. Deneysel çalışmanın sonuçları basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, kırılma enerjisi ve çatlak davranışı parametreleri açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar sentetik lif kullanımının UYPB'un kırılma davranışında etkili olduğunu göstermiştir. Çatlama dayanımı açısından sentetik lif kullanımının belirgin bir etkisi gözlemlenmezken, çatlak sonrası enerji sönümlenme kapasitesini önemli şekilde arttırdığı belirlenmiştir. Çalışmada incelenen lif oranları kendi içerisinde değerlendirildiğinde hacimce %1.0 sentetik lif kullanımının hem çatlak sonrası dayanımda hem de süneklikte %0.5 lif oranına göre çok daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Ultra yüksek performanslı beton, sentetik lif, eğilmede çekme dayanımı, kırılma enerjisi

## Effect of synthetic fiber on fracture behavior of Ultra High-Performance Concrete

### Abstract

In this study, the effects of synthetic fiber use on the fracture behavior of Ultra High-Performance Concrete (UHPC) were experimentally investigated. The notched prism specimens were produced using three UHPC mixtures, containing 0%, 0.5% and 1.0% synthetic fibers by volume, and tested under three-point bending. The results of the experimental study were evaluated in terms of compressive strength, flexural tensile

\*Tamer BİROL, tbirol@balikesir.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0003-2428-6202>

*strength, fracture energy and cracking behavior. The results showed that the use of synthetic fibers has a significant effect on the fracture behavior of UHPC. While no significant impact of synthetic fiber use was observed in terms of cracking strength, the post-crack energy absorption capacity significantly increased. The 1.0% volumetric fiber ratio gave better results than the 0.5% ratio for both post-crack strength and ductility.*

**Keywords:** *Ultra high-performance concrete, synthetic fiber, flexural tensile strength, fracture energy*

## 1. Giriş

Ultra Yüksek Performanslı Beton'un (UYPB) mekanik özellikleri kullanılan liflerin tipi, miktarı, dayanımı, beton matrisi içerisindeki dağılımı ve yönelimi gibi parametrelerden belirgin şekilde etkilenmektedir. Çelik lifler yüksek dayanım ve rijitlik özellikleri nedeniyle UYPB için en çok tercih edilen lif tipi olarak öne çıkmaktadır [1-4]. Bununla birlikte çelik liflerin korozyon, yüksek ağırlık ve diğer lif tiplerine göre yüksek maliyet gibi dezavantajları bulunmaktadır [5-7]. Çelik lif, UYPB'ü oluşturan malzemeler içerisindeki en pahalı malzeme olup yaklaşık olarak hacimce %1.0 oranında çelik lifin maliyeti karışımı oluşturan diğer malzemelerin toplam maliyetinden daha fazla olmaktadır [8]. Bu nedenle polipropilen (PP), polivinil alkol (PVA), polietilen (PE) gibi sentetik lifler ile karbon ve bazalt gibi farklı lif tiplerinin UYPB'da kullanımı araştırma konusu olmuştur. Sentetik liflerin çelik liflere oranla çok daha düşük rijitliğe sahip olmalarına karşın betonun çekme dayanımını, kırılma enerjisini ve tokluğunu arttırdığı görülmüştür [3, 9]. Zhu ve diğ. [10] ultra yüksek moleküler ağırlıklı PE lifin UYPB'un mekanik özelliklerine etkisini basınç dayanımı, elastisite modülü ve eğilme davranışı parametreleri açısından değerlendirmiştir. Çalışmada aksenal çekme altında deformasyon sertleşmesi (*strain hardening*) ve çoklu çatlak davranışı elde edilirken 17.42 MPa çekme ve 112.69 MPa basınç dayanımı değerlerine ulaşılmıştır. Yan ve diğ. [11] UYPB'un süneklik davranışını geliştirmeyi hedefledikleri çalışmalarında farklı dozajlarda bazalt, polipropilen ve cam gibi mikro boyutta lifler kullanmışlardır. Hacimce %0.5'in üzerinde lif kullanımı sonucu, lifsiz referans karışıma göre basınç dayanımında azalma trendi gözlenirken, %2.5 sentetik lif kullanımı sonucu %20'nin üzerinde eğilme dayanımı artışları elde edilmiştir. En belirgin etki ise süneklik parametresi için gözlenirken lifsiz karışıma oranla 4.5 katı aşan enerji yutma kapasitesi artışları görülmüştür. Neira Medina ve diğ. [12] düşük maliyetli ve çevre dostu UYPB tasarımının amaçlandığı çalışmalarında geri dönüştürülmüş malzemeler ile yerel olarak bulunabilir mikro ve makro boyutta sentetik lifleri tek başına ve karma olarak kullanarak farklı karışımlar hazırlamıştır. Karışımların eğilme davranışları prizmatik kiriş numunelerinin üç noktalı eğilme testleri ile incelenmiştir. Çalışma sonucunda %2 hacimsel lif oranı için polipropilen, polipropilen/polietilen ve karma sentetik lif kullanımının maliyet-fayda analizi bakımından çelik liflere oranla daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Mostofinejad ve diğ. [13] UYPB'da farklı oranlarda mikro PVA ve modifiye edilmiş makro PP lifleri birlikte kullandıkları çalışmalarında lifsiz duruma oranla %128'e varan eğilme dayanımı artışı elde etmişlerdir. Sentetik liflerin karma olarak kullanılmasının UYPB'nin eğilme dayanımını, tokluğunu ve enerji yutma kapasitesini önemli oranda iyileştirebildiği belirlenmiştir. Dehghanpour ve diğ. [14] UYPB'da PVA, cam elyaf ve çelik lif kullanımını inceledikleri çalışmalarında çelik liflerin incelenen tüm mekanik özellikleri pozitif olarak etkilediğini belirlerken, PVA lif kullanımının cam elyafa göre iki katı aşan oranda daha etkin olduğunu görmüşlerdir.

Bu çalışmada sentetik lifin Ultra Yüksek Performanslı Beton'un (UYPB) kırılma davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, lifsiz ve iki farklı hacimsel oranda sentetik lif içeren UYPB karışımları kullanılarak çentikli prizma numuneler üretilmiş ve üç noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Sentetik liflerin performansı eğilmede çekme dayanımı, kırılma enerjisi ve çatlak davranışı parametreleri açısından değerlendirilmiştir.

## 2. Deneysel çalışma

### 2.1. Malzeme içeriği ve test numunelerinin özellikleri

Çalışmada, Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) üretimi için hacimce %0.5 ve %1.0 oranlarında sentetik lif kullanılmıştır. Hammaddesi saf kopolimer (Polipropilen/Polietilen) olan sentetik lifler 54 mm uzunluğunda olup katalog verisi çekme dayanımı 550-750 MPa arasında, elastisite modülü 5.75 GPa'dır (Şekil 1). UYPB için Hasgül ve diğ. [15] tarafından geliştirilen karışım revize edilerek kullanılmıştır. UYPB karışımı, CEM I 42.5 Portland çimentosu, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve kuvars kumundan oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan UYPB karışımları Tablo 1'de sunulmuştur. Referans olarak kullanılan lifsiz UYPB karışımı R olarak kodlanmıştır. Sentetik lifli karışımlar L olarak kodlanmış ve parantez içerisinde hacimsel lif oranı yüzde olarak belirtilmiştir. Referans karışımında su/bağlayıcı oranı 0.17'dir. UYPB karışımlarının işlenebilirliğini arttırmak amacıyla polikarboksilat eter esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Tüm karışımlarda benzer viskoziteyi sağlayabilmek amacıyla sentetik lifli karışımlarda akışkanlaştırıcı katkı miktarı arttırılmıştır (Tablo 1). Karışımların yayılma testleri sonucunda lifsiz karışımında 22 cm yayılma çapı elde edilirken, hacimce %0.5 ve %1.0 lifli karışımlar için sırasıyla 19 cm ve 17 cm yayılma çapları elde edilmiştir [16].



Şekil 1. Çalışmada kullanılan sentetik lifler

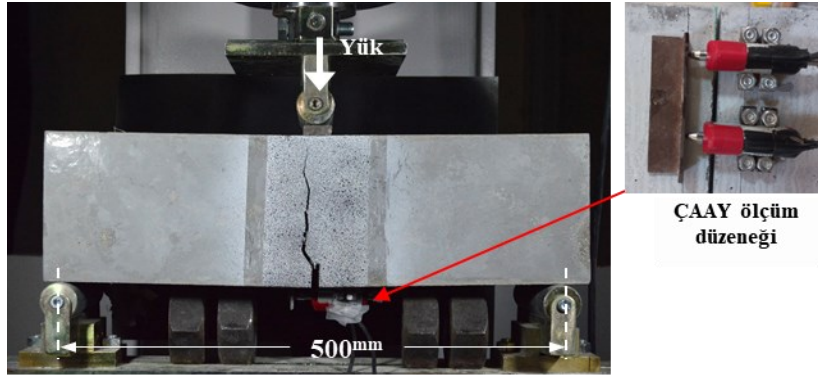
Tablo 1. UYPB içeriği ve karışım miktarları (kg/m<sup>3</sup>)

Karışım kodu	Çimento	Silis dumanı	Fırın cürufu	Agrega	Su	Katkı	Lif	Hacimsel lif oranı
R	700	170	300	1030	200	17	0	%0
L(0.5)	700	170	300	1015	200	18	4.5	%0.5
L(1.0)	700	170	300	1004	200	18	9	%1.0

Karışımların basınç dayanımlarının belirlenmesinde kullanılmak üzere her karışımdan 6 adet 100×100×100 mm boyutlarında küp numuneler alınmıştır. Karışımların kırılma davranışlarının incelenmesi amacıyla her bir karışım için 150×150×550 mm boyutlarında prizma test numuneleri hazırlanmıştır. Çatlak oluşumunun ve ilerlemesinin incelenmesi için prizma numunelerin açıklık ortasına 25 mm derinliğinde 2.5 mm kalınlığında bir çentik açılmıştır [17].

## 2.2. Test ve ölçüm düzeneklerinin özellikleri

Küp numunelerin aksel basınç testleri 2500 kN yükleme kapasiteli bir pres ile gerçekleştirilmiştir. Çentikli prizmaların eğilme testleri için yük ve yerdeğiştirme kontrolü sağlayabilen bir test düzeneğinden yararlanılmıştır (Şekil 2). Prizmalar iki adet mesnet üzerine basit mesnetli olarak sabitlenmiş ve açıklık ortasından tekil yük uygulanmıştır (Şekil 2). Test düzeneğinin yükleme kapasitesi 500 kN olup eğilme testleri 0.2 mm/dk sabit yerdeğiştirme hızı ile gerçekleştirilmiştir. Test düzeneğinde yük ölçümü için bir yük hücresi ve ölçüm kapasitesi 20 mm olan bir adet potansiyometrik lineer cetvel bulunmaktadır. Böylece hem test hızı kontrol edilmiş hem de kirişlerin yük ve açıklık ortası sehim ölçülmüştür. Eğilme testlerinde çatlak ağzı açıklığı yerdeğiştirmesi (ÇAAY) ölçümü için iki adet potansiyometrik lineer cetvel (ölçüm kapasitesi 10 mm) çentik bölgesine yerleştirilmiştir. Bu şekilde çentik bölgesini içeren 40 mm'lik bir bölümden ölçüm alınabilmektedir (Şekil 2).

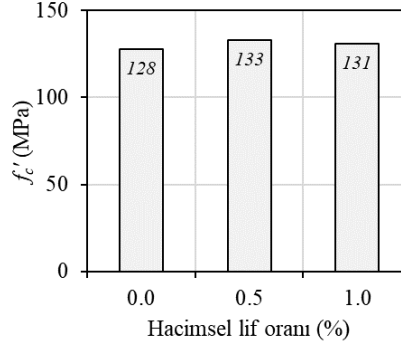


Şekil 2. Üç noktalı eğilme test düzeneği ve ölçerler

## 3. Bulgular

### 3.1. Basınç Dayanımı

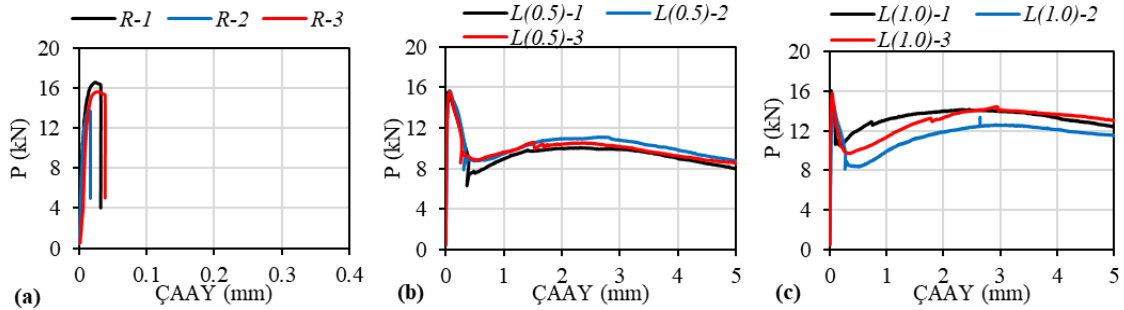
Küp numunelerin aksel basınç testleri sonucunda lifsiz ve sentetik lifli karışımlar için elde edilen ortalama basınç dayanımları ( $f'_c$ ) Şekil 3'te sunulmuştur. Görüldüğü gibi sentetik lif kullanımının UYPB'un basınç dayanımı üzerinde belirgin bir etkisi olmadığı görülmüştür. En büyük kapasite artışı hacimce %0.5 lif kullanımı sonucu elde edilmiştir. Farklı oranlarda sentetik liflerin incelendiği çalışmalarda da lif kullanımının basınç dayanımına etkisinin sınırlı olduğu, hatta yüksek oranlarda sentetik lif kullanıldığında (hacimce %1.0'dan fazla) dayanımda önemli düşüşler olduğu belirlenmiştir [11, 18-21].



Şekil 3. Hacimsel lif oranının basınç dayanımına etkisi

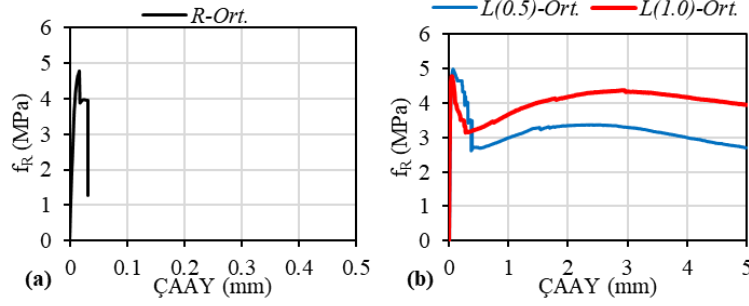
### 3.2. Yük-Çatlak Ağız Açıklığı Yerdeğiştirmesi Davranışı

Çentikli prizma numuneleri üzerinde gerçekleştirilen üç noktalı eğilme testleri, liflerin betonun dayanımı ve deformasyon kapasitesi üzerindeki etkilerini araştırmak için en yaygın kullanılan test metotlarından biridir. Lifsiz test kirişlerinin yük-çatlak ağız açıklığı yerdeğiştirmesi (P-ÇAAAY) grafikleri Şekil 4a'da, lifli kirişlerin ise Şekil 4b ve 4c'de sunulmuştur. ÇAAAY değerleri, çentik bölgesine yerleştirilen iki adet ölçerden alınan verilerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Eğilmeye çekme dayanımı ( $f_R$ ) değerleri, liflerin yük kapasitesine katkısını değerlendirmek için kullanılırken betonun süneklik davranışı üzerindeki lif etkisinin belirlenmesinde çatlak sonrası davranışın incelenmesi gerekmektedir. Kırılma davranışının incelenmesinde EN 14651+A1'e [17] göre P-ÇAAAY ilişkisi için belirli karakteristik noktalar bulunmaktadır. Bu noktalardaki eğilmeye çekme dayanımları ( $f_R$ ), EN 14651+A1 [17] standardına göre (1) bağıntısı ile hesaplanmış ve Tablo 2'de sunulmuştur. (1) bağıntısında  $P$  yük,  $L$  mesnetler arası açıklık,  $b$  kiriş en kesit genişliği ve  $h_{sp}$  çentik yüksekliği çıkarılmış kiriş en kesit yüksekliğini ifade etmektedir. Her bir karışım için test edilen 3 adet prizma numunenin ortalama P-ÇAAAY davranışları kullanılarak elde edilen ortalama  $f_R$ -ÇAAAY grafikleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Orantılılık sınırına karşılık gelen çatlama dayanımı  $f_{RL}$  ile ifade edilirken, 0.5, 1.5, 2.5 ve 3.5 mm ÇAAAY değerleri için eğilmeye çekme dayanımları sırasıyla  $f_{R1}$ ,  $f_{R2}$ ,  $f_{R3}$  ve  $f_{R4}$  ile tanımlanmaktadır. Bu çalışmada ayrıca kırılma davranışını tanımlayan iki önemli karakteristik nokta olarak çatlak sonrası minimum ( $f_{Rmin}$ ) ve maksimum dayanım ( $f_{Rmaks}$ ) değerleri de dikkate alınmıştır [22].



Şekil 4. Hacimsel lif oranına göre prizmaların P-ÇAAAY grafikleri, a)%0, b)%0.5, c)%1.0

$$f_R = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2b \cdot h_{sp}^2} \quad (1)$$



Şekil 5. Hacimsel lif oranına göre karışımlara ait ortalama  $f_R$ -ÇAAY grafikleri, a) %0, b) %0.5 ve %1.0

Tablo 2. UYPB karışımlarının ortalama eğilmede çekme dayanımları

Karışım	$f_{Rmin}$ (MPa)	$f_{Rmaks}$ (MPa)	$f_{RL}$ (MPa)	$f_{R1}$ (MPa)	$f_{R2}$ (MPa)	$f_{R3}$ (MPa)	$f_{R4}$ (MPa)
R	-	-	4.77	-	-	-	-
L(0.5)	2.61	3.37	4.98	2.69	3.28	3.36	3.16
L(1.0)	3.18	4.38	4.79	3.26	4.02	4.32	4.28

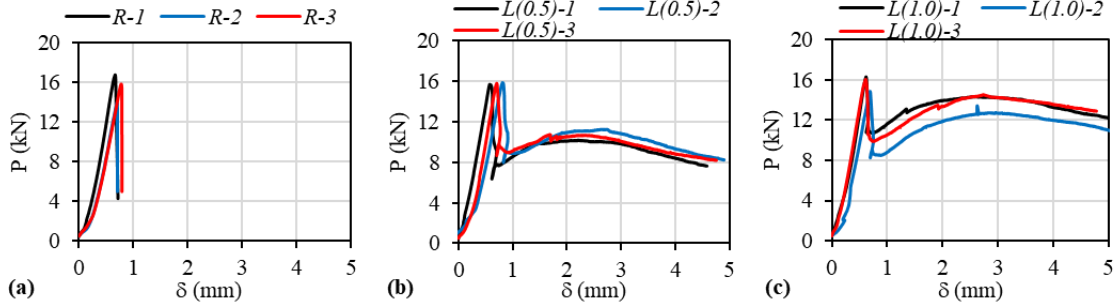
Sentetik lif kullanımının çatlama dayanımına ( $f_{RL}$ ) katkısı sınırlı olmuştur (Tablo 2). Çatlama sonrası tüm davranış eğrilerinde gözlenen yumuşama davranışı, beton matrisin çatlama sonucu rijitlikte meydana gelen önemli bir kayba karşılık gelmektedir (Şekil 4). Lifsiz prizma numunelerinde çatlak oluşumu sonrası yükte ani bir düşüş meydana gelirken, sentetik liflerin sağladığı artık dayanım (*residual strength*) sayesinde lifli numunelerde çatlak sonrası çok sünek bir davranış elde edilmiştir (Şekil 4b-4c). Bu sünek davranış, sentetik lifli UYPB’da lifler ile matris arasındaki yüksek aderansın sonucu liflerin matristen sıyrılmasıyla oluşan enerji tüketimi nedeniyle meydana gelmektedir [5]. Çatlama dayanımı ( $f_{RL}$ ) ile çatlak sonrası yükteki düşüşünün durduğu ve dayanım geri kazanımının başladığı  $f_{Rmin}$  değerleri karşılaştırıldığında L(0.5) ve L(1.0) numuneleri için ortalama dayanım kaybı sırasıyla %48 ve %34 olarak elde edilmiştir. Buradan görüldüğü gibi lif miktarı arttığında çatlama sonrası dayanım kaybı da azalmaktadır. Şekil 5b’den görüleceği gibi çatlak sonrası maksimum dayanım ( $f_{Rmaks}$ ), lif miktarının yükselmesiyle birlikte artış göstermiştir. Çatlama dayanımı ( $f_{RL}$ ) ile  $f_{Rmaks}$  arasındaki oran %0.5 lif miktarı için 1.48 iken %1.0 lif kullanıldığında 1.09’a düşmektedir (Tablo 2). Sonuç olarak hacimce %1.0 oranında lif kullanımının yumuşama bölgesinde artık dayanım sağlama bakımından %0.5 lif oranına göre oldukça etkili olduğu görülmektedir. Bununla birlikte her iki lif oranı içinde  $f_{Rmaks}$  değerlerinin çatlama dayanımını ( $f_{RL}$ ) aşmadığı görülmüştür. Bu davranış eğilme altında sehim yumuşaması (*deflection softening*) olarak adlandırılmaktadır [23].

### 3.3. Kırılma Enerjisi

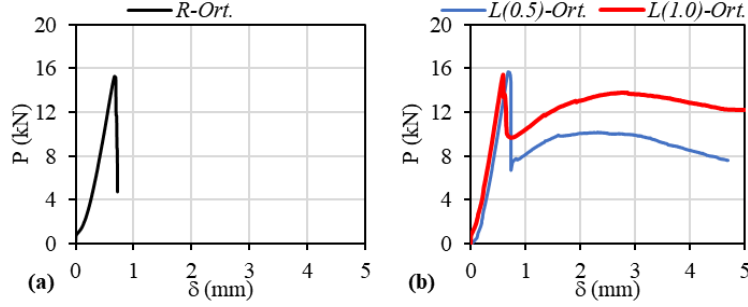
Şekil 6’da her bir lif oranı için prizma numunelerinin yük-açıklık ortası sehim (P- $\delta$ ) grafikleri sunulmuştur. Karışımlara ait ortalama P- $\delta$  grafikleri ise Şekil 7’de verilmiştir. Ortalama P- $\delta$  grafikleri kullanılarak  $f_{Rmaks}$  değerine kadarki kırılma enerjileri ( $G_f$ ) (2) bağıntısı yardımıyla hesaplanmıştır [24]. Burada  $w_o$  yük-sehim eğrisinin altında kalan alanı (Nm),  $m \times g$  prizma numunelerinin mesnetler arası açıklık için numune ağırlığını (N) ve  $\delta$  ise maksimum sehimi (m) ifade etmektedir. Hacimce %0.5 sentetik lif kullanımı sonucu 1087 N/m  $G_f$  değeri elde edilirken lif oranı %1.0’a çıktığında enerji değeri 1761

N/m'ye yükselmiştir. Sonuç olarak lif miktarının artmasıyla dayanıma benzer şekilde kırılma enerjisi değerinde de belirgin artış olduğu görülebilmektedir.

$$G_f = \frac{w_0 + m \times g \times \delta}{b \times h_{sp}} \quad (2)$$



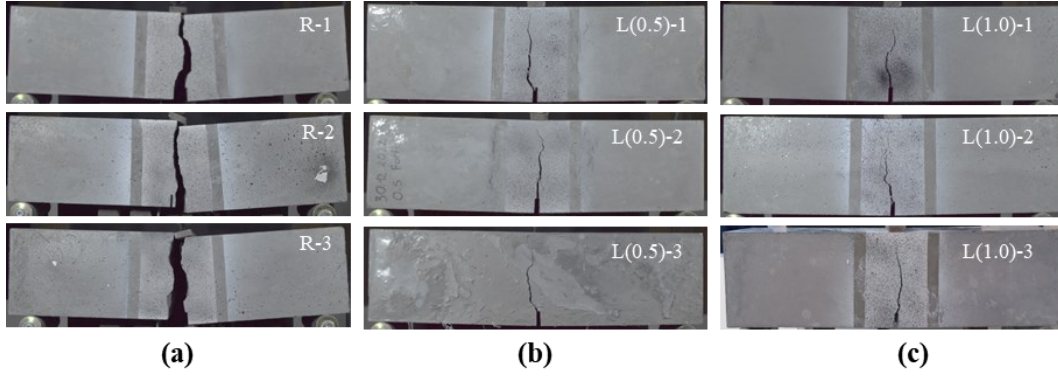
Şekil 6. Hacimsel lif oranına göre prizmaların P-δ grafikleri, a)%0, b)%0.5, c)%1.0



Şekil 7. Hacimsel lif oranına göre karışımların ortalama P-δ grafikleri, a)%0, b)%0.5 ve %1.0

### 3.4. Kırılma Modu ve Çatlak Davranışı

Prizma numunelerin kırılma modları karşılaştırmalı olarak Şekil 8'de sunulmuştur. Lifsiz Referans karışıma ait prizmalarda çentik bölgesinde meydana gelen çatlak sonrasında ani bir kırılma sonucu numuneler iki parçaya ayrılmıştır (Şekil 8a). Lifli numunelerde ise ölçerlerin kapasiteleri nedeniyle testler 5 mm ÇAAV değerine ulaşıldığında sonlandırıldığı için bu aşamadaki çatlak durumları sunulmuştur (Şekil 8b-8c). Beklendiği gibi sentetik liflerin çatlak köprüleme özelliği sayesinde çatlama sonrası lifler devreye girerek ani kırılma önlenmiştir. Çatlak genişliğinin artmasıyla birlikte liflerde sıyrılma meydana gelmiş ve çentik bölgesinde oluşan tek bir çatlak numunenin üst bölgesine doğru ilerlemiştir. Lif oranları açısından çatlak davranışında belirgin bir fark gözlenmemiştir (Şekil 8b-8c).



Şekil 8. Hacimsel lif oranına göre prizmaların kırılma modları, a)%0, b)%0.5, c)%1.0

### 3. Sonuçlar ve tartışma

Çalışmada sentetik lifin Ultra Yüksek Performanslı Beton'un (UYPB) kırılma davranışına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Sentetik lif kullanımının UYPB'un basınç dayanımına belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Çentikli prizma numuneler üzerinde gerçekleştirilen üç noktalı eğilme testleri sonucunda sentetik lifin gevrek kırılmayı önlediği ve lifli numunelerin lifsiz duruma göre oldukça sünek bir davranış sergileyebildiği belirlenmiştir. Çatlama yükü açısından lif kullanımının belirgin bir etkisi gözlemlenmezken, liflerin çatlak sonrası enerji sönümleme kapasitesini önemli şekilde arttırdığı görülmüştür. Çalışmada incelenen lif oranları kendi içerisinde değerlendirildiğinde hacimce %1.0 lif oranının %0.5 lif oranına göre hem çatlak sonrası dayanımda hem de süneklikte çok daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçları, UYPB'da sentetik lif kullanımının önemli avantajlar sağlayabileceğini göstermektedir. Bu nedenle mevcut çalışmalara ek olarak farklı sentetik lif tipleri için yeni araştırmalara gerek olduğu düşünülmektedir.

### Kaynaklar

- [1] Wille, K., El-Tawil, S. ve Naaman, A. E., Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading, **Cement and Concrete Composites**, 48, 53-66, (2014).
- [2] Li, S., Jensen, O. M., Wang, Z. ve Yu, Q., Influence of micromechanical property on the rate-dependent flexural strength of ultra-high performance concrete containing coarse aggregates (UHPC-CA), **Composites Part B: Engineering**, 227, (2021).
- [3] Gong, J., Ma, Y., Fu, J., Hu, J., Ouyang, X., Zhang, Z. ve Wang H., Utilization of fibers in ultra-high performance concrete: A review, **Composites Part B: Engineering**, 241, (2022).
- [4] Shen, X. ve Brühwiler, E., Influence of local fiber distribution on tensile behavior of strain hardening UHPFRC using NDT and DIC, **Cement and Concrete Research**, 132, 106042, (2020).
- [5] Bhosale, A., Rasheed, M. A., Prakash, S. S. ve Raju, G., A study on the efficiency of steel vs. synthetic vs. hybrid fibers on fracture behavior of concrete in flexure using acoustic emission, **Construction and Building Materials**, 199, 256-268, (2019).



- [6] Du, J., Meng, W., Khayat, K. H., Bao, Y., Guo, P., Lyu, Z., Abu-obeidah, A., Nassif, H. ve Wang, H., New development of ultra-high-performance concrete (UHPC), **Composites Part B**, 224, (2021).
- [7] Yoo, D. -, Shin, W., Chun, B. ve Banthia, N., 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, (2020).
- [8] Kim, D. J., Naaman, A., ve El-Tawil, S. High tensile strength strain hardening FRC composites with less than 2% fiber content, **Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete**, 169–176, Germany, (2008).
- [9] Alberti, M. G., Enfedaque, A. ve Gálvez J. C., On the mechanical properties and fracture behavior of polyolefin fiber-reinforced self-compacting concrete, **Construction and Building Materials**, 55, 274-288, (2014).
- [10] Zhu, W., Yu, J., Dai, J., Lu, Z. ve Shah, S. P., Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers, **Construction and Building Materials**, 158, 217–227, (2018).
- [11] Yan, P., Chen, B., Afgan, S., Haque, M. A., Wu, M., ve Han, J.. 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, (2021).
- [12] Neira Medina, A. L., Abellán García, J., ve Torres Castellanos, N., 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, (2022).
- [13] Mostofinejad, D., Moosaie, I., Eftekhar, M., ve Hesami, E., 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, (2022).
- [14] Dehghanpour, H., Subasi, S., Guntepe, S., Emiroglu, M. ve Marasli, M., Investigation of fracture mechanics, physical and dynamic properties of UHPCs containing PVA, glass and steel fibers, **Construction and Building Materials**, 328, 127079, (2022).
- [15] Hasgul, U., Turker, K., Birol, T., & Yavas, A., Flexural behavior of ultra-high-performance fiber reinforced concrete beams with low and high reinforcement ratios, **Structural Concrete**, 19, 6, 1577-1590, (2018).
- [16] ASTM C1437-20. Standard test method for flow of hydraulic cement mortar. ASTM International, (2020).
- [17] EN 14651+A1. Test method for Metallic Fibre Concrete Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality (LOP), Residual), European Committee for Standardization, Brussels, (2007).
- [18] Ramezani pour, A. A., Esmaili, M., Ghahari, S. A., ve Najafi, M. H., Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers, **Construction and Building Materials**, 44, 411-418, (2013).
- [19] Islam, G. S., ve Gupta, S. D. Evaluating plastic shrinkage and permeability of polypropylene fiber reinforced concrete, **International Journal of Sustainable Built Environment**, 5, 2, 345-354, (2016).

- [20] Bolat, H., Şimşek, O., Çullu, M., Durmuş, G. ve Cani, Ö., The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete, **Composites Part B**, 61, 191-8, (2014).
- [21] Akça, K. R., Çakır, Ö., ve İpek, M. Properties of polypropylene fiber reinforced concrete using recycled aggregates, **Construction and Building Materials**, 98, 620-630, (2015).
- [22] Alberti, M., Enfedaque, A. ve Gálvez, J., Improving the reinforcement of polyolefin fiber reinforced concrete for infrastructure applications, **Fibers**, 3, 4, 504-522, (2015).
- [23] Naaman, A. E., ve Reinhardt, H. W., Setting the stage: Toward performance based classification of FRC composites. **In High Performance Fiber Reinforced Cement Composites**, 4, 1-4, June, (2003).
- [24] 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.