

## DONATI VE ÇELİK LİF MİKTARININ UYPLB KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞINA ETKİSİ

### IMPACT OF REINFORCEMENT AND STEEL FIBER AMOUNTS TO FLEXURAL BEHAVIOR OF UHPFRC BEAMS

Tamer BİROL<sup>1</sup>, Umut HASGÜL<sup>2</sup>, Altuğ YAVAŞ<sup>3</sup>, Kaan TÜRKER<sup>4</sup>, Halit YAZICI<sup>5</sup>

#### ÖZET

*Bu çalışmada, Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB)'dan üretilmiş betonarme kirişlerin eğilme davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Bu çerçevede, düşük ve yüksek çekme donatısı oranlarını temsil eden iki donatı oranı için "I" enkesitli ve kesme donatısız toplam 4 adet UYPLB kiriş üretilmiştir. Ayrıca, UYPLB'un etkinliğini göstermek ve karşılaştırmalar yapmak amacıyla, UYPLB karışımı içeren ancak çelik lif içermeyen kesme donatılı / donatısız 4 adet referans kiriş daha üretilmiştir. Test kirişlerinde %1.5 ve %2.5'lük hacimsel lif oranı için 13mm boyunda düz kısa çelik lifler kullanılmıştır. Kirişlerin dört noktalı eğilme testleri yapılarak yük-yerdeğiştirme davranışları, yerdeğiştirme süneklikleri ve yük taşıma kapasiteleri değerlendirilmiştir. Test sonuçları, UYPLB'un yüksek basınç dayanımı ve şekildeğiştirme kapasitesi nedeniyle yüksek donatı oranlarında daha etkin olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, beton karışımında orta düzeyde çelik lif eklenmesi kirişte sadece kesme donatısı kullanımından daha iyi performans göstermiştir.*

Anahtar Kelimeler: Ultra yüksek performanslı lifli beton, Betonarme kiriş, Çelik lif, Süneklik

#### ABSTRACT

*In the presented study, the flexural behavior of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) beams were investigated experimentally. In this framework, the total of four singly reinforced and "I" shaped UHPFRC beams were produced by two tensile reinforcement ratios representing low and high ratios. The evaluations with respect to the UHPFRC use were made by comparing the non-fiber reference beams with/without shear reinforcement containing the UHPFRC matrix. The short straight steel fibers of 13mm were considered for two volumetric ratios of 1.5% and 2.5%. The four-point loadings were conducted for all beams, and the results were discussed in terms of the load-deflection curves, deflection ductilities and load carrying capacities. The test results indicated that high reinforcement ratios can be effectively used to take advantage of the excellent compressive strength and deformation capacity of UHPFRC. However, the moderate level of fiber use in the concrete matrix showed better performance than only shear reinforcement usage.*

Keywords: Ultra high performance fiber reinforced concrete, Reinforced concrete beam, Steel fiber, ductility

#### GİRİŞ

Beton teknolojisinin son yıllardaki en önemli gelişmelerinden biri haline *Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton* (UYPLB) kullanımı, dayanım, süneklik ve rijitlik gibi parametreler açısından kazandırdığı pek çok avantaj sayesinde, daha ekonomik, estetik ve uzun ömürlü yapıların üretimine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, bu betonun çok yüksek basınç dayanımı ve ilk çatlak sonrasındaki gelişmiş çekme davranışı sayesinde geleneksel betonarme elemanların bilinen dezavantajlarını giderme potansiyeline sahiptir. UYPLB köprülerin kolon ve kirişlerinde, bunların onarım &

<sup>1</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, tbirol@balikesir.edu.tr

<sup>2</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, hasgul@balikesir.edu.tr

<sup>3</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, ayavas@balikesir.edu.tr

<sup>4</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, kturker@balikesir.edu.tr

<sup>5</sup> Prof. Dr., Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, halit.yazici@deu.edu.tr

güçlendirme amaçlı takviyesinde, prefabrik birleşim noktalarında ve büyük açıklıklı prefabrike elemanlarda kullanım alanı bulmaktadır (Parra-Montesinos vd. 2005; Shannag vd. 2005; SAMARIS 2005; Graybeal 2006b; Lee ve Wang 2007; Graybeal 2008; Hegger ve Bertram 2008; Voo vd. 2011; Zohrevand ve Mirmiran 2012; Moreillon ve Menétrey 2013; Massicotte vd. 2013; Perry ve Seibert 2013). Bu betonlar maksimum sıklık oranına sahip iç-yapı, ince ve yüksek mukavemetli agrega, çok düşük su / bağlayıcı oranı ve yüksek performanslı beton kimyasalları ile üretilerek çok yüksek basınç dayanımlarına (150 MPa ve üzeri) ulaşabilmektedir (Richard ve Cheyreyz 1995; Graybeal 2006a; Yazıcı vd. 2009; Voo ve Foster 2010; Wille vd. 2011; Wang vd. 2012). Farklı boyut ve geometrilerde üretilen çelik liflerin de karışıma eklenmesiyle elemanların dayanım ve sünekliklerinde önemli artışlar sağlanabilmektedir. Son yıllarda, UYPLB ile ilgili bazı tasarım standartları geliştirilmesine karşın (JSCE 2008; AFGC 2013; Fehling vd. 2014), ülkemizde henüz yapısal eleman üretiminde yer bulmamakta ve herhangi bir tasarım standardı geliştirilmemiştir. Yapısal davranışta, UYPLB kullanımını geleneksel betona göre önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu bağlamda;

UYPLB'un çok yüksek basınç dayanımı sayesinde, yüksek çekme donatısı oranlarında dahi sünek çekme kırılması sağlanabilmektedir. Basınç bölgesindeki çelik lifler, betonda sargı etkisi yaparak yüksek şekildeğiştirme kapasitesi de sağlamaktadır. Çekme bölgesindeki lifler ise, betonun çekme dayanımını önemli ölçüde arttırarak elemanın yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır. Ayrıca, lifler çatlak genişliklerini de sınırlayarak sehimi azaltıcı yönde etki yapmaktadır. Bu tür betonların elastisite modülünün de yüksek olması eğilme rijitliğini önemli ölçüde arttırmaktadır. Çelik lifler betonun asal çekme dayanımını önemli ölçüde arttırarak elemanın kesmeye karşı dayanımını da arttırmaktadır. Liflerin çatlakları sınırlaması sayesinde betonun durabilitesi yüksek olmakta, bu da yapısal elemanların çok daha uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır.

UYPLB'un bu özellikleri, kirişlerde enine donatıya ve basınç donatısına olan gereksinimi azaltacak ve bunun sonucunda, daha narin enkesitlerin kullanılmasına olanak sağlayabilecektir. Bu potansiyel avantajlar, prefabrike betonarme yapılarda yaygın olarak kullanılan "I" enkesitli kirişler için büyük önem taşımaktadır. Genellikle basit kiriş olarak teşkil edilen bu elemanlarda yüksek dayanıma sahip beton kullanılarak ekonomik enkesitler elde edilmeye çalışılmakta, ancak donatı detaylarının yoğunluğu nedeniyle beton yerleştirilmesinde önemli zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu durum, çoğu kez betonun yerleşebilirliğini sağlamak amacıyla başlık ve gövde boyutlarının büyümesine sebep olmaktadır. "I" enkesitli kirişlerde UYPLB kullanımının, yüksek basınç dayanımı sayesinde daha narin enkesitler elde edilmesine ve içeriğindeki liflerin katkısıyla kesme donatılarının kaldırılmasına veya azaltılmasına olanak vermesi beklenmektedir.

Literatürdeki deneysel çalışmalarda, düşük donatı oranlarına sahip betonarme kirişlerde UYPLB kullanımının yerdeğiştirme ve eğrilik süneklikleri üzerindeki olumsuz etkileri belirtilmiştir (Yuguang vd. 2009; Yoo ve Yoon 2015; Dancygier ve Berkover 2016; Yoo vd. 2017; Hasgül vd. 2018). Sünek davranış gösteren geleneksel betonarme elemanların çatlak davranışından farklı olarak, düşük donatılı UYPLB kirişlerde eğilme çatlağı çoğunlukla tek noktada yoğunlaşarak genişlemekte ve bunun sonucunda, daha küçük yerdeğiştirme düzeylerinde donatı kopması meydana gelmektedir. UYPLB'un yüksek basınç dayanımı ve şekildeğiştirme kapasitesinden yararlanarak, daha yüksek donatı oranlarına çıkıldığında, bu tür betonların avantajları daha ön plana çıkmaktadır. Bununla birlikte, kirişlerin sünekliğini etkileyen bir diğer parametre de çelik liflerin hacimsel oranıdır. Yeterli sünekliği sağlamak amacıyla lif içeriğinin çekme donatısı oranı ile uyumlu olması gerekmektedir (Hasgül vd. 2018; Türker vd. 2019). Bu nedenle, UYPLB'dan üretilmiş ve farklı donatı oranlarına sahip kiriş elemanların eğilme davranışında lif kullanımının araştırılması önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, UYPLB kirişlerin eğilme davranışına çelik lif oranının etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu çerçevede, tasarım yönetmeliklerinde verilen alt ve üst sınırlara yakın oranlarda seçilen iki çekme donatısı oranı (0.008 ve 0.022) ve iki hacimsel lif oranı (%1.5 ve %2.5) için kesme donatısız UYPLB kirişler ile çelik lif içermeyen kesme donatılı/donatısız referans kirişler Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda üretilmiştir. Başlık genişlikleri 150<sup>mm</sup>, yüksekliği 250<sup>mm</sup>, gövde kalınlığı 50<sup>mm</sup> ve boyu 2500<sup>mm</sup> olan toplam 8 adet "I" enkesitli kirişin dört noktalı eğilme testleri yapılarak, yük-yerdeğiştirme davranışları, yerdeğiştirme süneklikleri ve taşıma kapasiteleri açısından sonuçlar değerlendirilmiştir.

## DENEYSEL PROGRAM

### Malzeme ve Test Numunelerinin Özellikleri

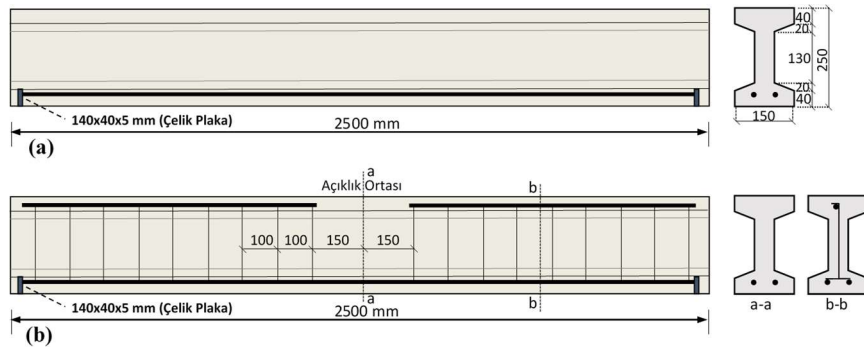
Betonun bağlayıcı kısmı CEM I 42.5 R sınıfı Portland çimentosu, silis dumanı ve yüksek fırın cürufundan oluşmaktadır. Agrega olarak yüksek dayanımlı kuvars kullanılmıştır. UYPLB çok düşük su/bağlayıcı oranına ( $w/b = 0.17$ ) sahip olduğundan, betonun işlenebilirliğinin sağlanması amacıyla polikarboksilat eter esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Karışımda, 13/0.16<sup>mm</sup> (boy/çap) boyutlarında çekme dayanımı yüksek (2500 MPa) çelik lifler kullanılmıştır. İki farklı lif oranı ve lifsiz durumu içeren beton karışımları ve 28 günlük ortalama basınç dayanımları Tablo 1’de verilmiştir. Test kirişleri 2φ10 ve 2φ16 olmak üzere iki çekme donatısı oranı için hazırlanmış ve donatıların mekanik özellikleri Tablo 1’de sunulmuştur.

Çalışma kapsamında üretilen tek donatılı ve “I” enkesitli betonarme test kirişlerinin geometrik özellikleri ve tipik donatı yerleşimleri Şekil 1’de verilmiştir. Kirişlerin başlık genişlikleri 150<sup>mm</sup>, yüksekliği 250<sup>mm</sup>, gövde kalınlığı 50<sup>mm</sup> ve boyu 2500<sup>mm</sup>’dir. R1 kodlu lifsiz referans kirişlerinde ve UYPLB ile üretilen kirişlerde kesme donatısı bulunmamaktadır (Şekil 1a). Çelik liflerin kesme donatısı yerine kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla, kesme açıklığında 100<sup>mm</sup> aralıklarla φ8’lik tek kollu donatının kullanıldığı R2 kodlu lifsiz referans kirişler de hazırlanmıştır (Şekil 1b). “I” enkesit nedeniyle çekme donatılarında kanca uygulaması yapılamadığından, kenetlenme için donatı uçlarına çelik plakalar kaynaklanmıştır (Şekil 1).

Tablo 1. Beton ve Donatıya ait Mekanik Özellikler ile Karışım İçerikleri

Numune kodu	Donatı				Beton						$f'_c$ (MPa)
	$\rho$	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$V_f$ (%)	C	SD	YFC	A	S	SA	
B10-R1	0.008	471	593	0.0	720	240	240	890	204	23.0	139
B10-R2		469	593								144
B16-R1		469	590								145
B16-R2	0.022	470	591	1.5	720	240	240	852	204	23.6	142
B10-1.5		471	593								155
B16-1.5	470	591	154								
B10-2.5	0.008	469	591	2.5	720	240	240	825	204	24.3	174
B16-2.5	0.022	473	593								159

$\rho$ : Çekme donatısı oranı,  $f_y$ : Akma dayanımı,  $f_u$ : Kopma dayanımı,  $V_f$ : Hacimsel lif oranı, C: Çimento, SD: Silis dumanı, YFC: Yüksek fırın cürufu, A: Agrega, S: Su, SA: Süper akışkanlaştırıcı,  $f'_c$ : Basınç dayanımı

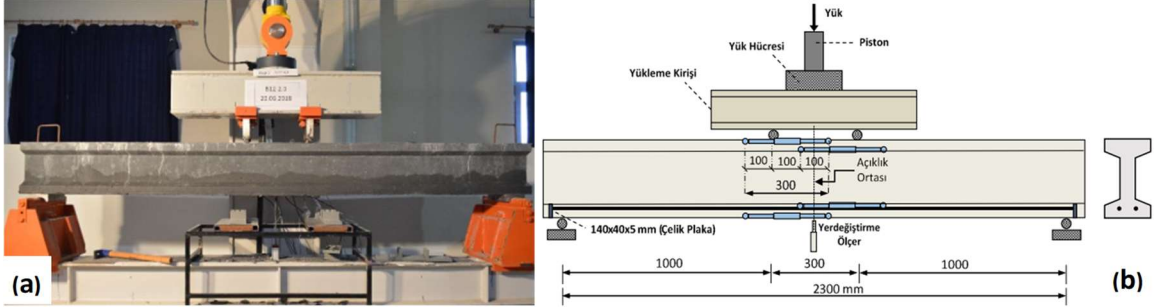


Şekil 1. Test kirişlerine ait donatı detayları; a) Kesme donatısız, b) Kesme donatılı

### Test Düzenegi ve Yapılan Ölçümler

Kirişlerin eğilme testleri, Balıkesir Üniversitesi Prof. Dr. Şerif SAYLAN Yapı Mekaniği Laboratuvarı’nda bulunan dört noktalı eğilme test düzenegi ile yapılmıştır (Şekil 2). Düzenekte 500 kN kapasiteli ve yerdeğiştirme kontrollü bir hidrolik yük veren bulunmaktadır. Kirişin düşey yerdeğiştirmesini ölçmek için açıklık ortasına bir adet potansiyometrik cetvel ile yükü ölçmek üzere yük verenin altına bir adet yük hücresi yerleştirilmiştir. Yük, rijit bir çelik profil vasıtasıyla aralarında 300<sup>mm</sup> olan iki tekil yüke dönüştürülerek kirişe uygulanmaktadır (Şekil 2 a-b).

Kiriş orta bölgesindeki eğriliği belirlemek amacıyla dört adet potansiyometrik cetvel Şekil 2’de gösterildiği gibi kirişin alt ve üst başlıklarına yerleştirilmiştir. Potansiyometrik cetvellerin ikisi kirişin sol yarısında, diğer ikisi sağ yarısındaki 300<sup>mm</sup>’lik bölgeyi ölçecek şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2b). Ölçerler, test sırasında oluşan çatlakların işaretlenmesi ve genişliklerinin ölçülebilmesi amacıyla kirişlerin arka yüzlerine yerleştirilmiştir. Test kirişleri yük-yerdeğiştirme davranışındaki tepe yüküne kadar 0.2 mm/sn’lik yerdeğiştirme hızı ile yüklenmiş, test süresini azaltmak amacıyla tepe yükü sonrasında 0.5 mm/sn’ye yükseltilmiştir. Testler süresince kirişlerdeki yük ve yerdeğiştirmeler 24 kanallı veri toplama sistemi ile kaydedilmiştir. Kiriş üzerinde oluşan çatlaklar belirli yerdeğiştirme düzeylerinde işaretlenmiş ve genişlikleri çatlak mikroskobu ile ölçülmüştür.

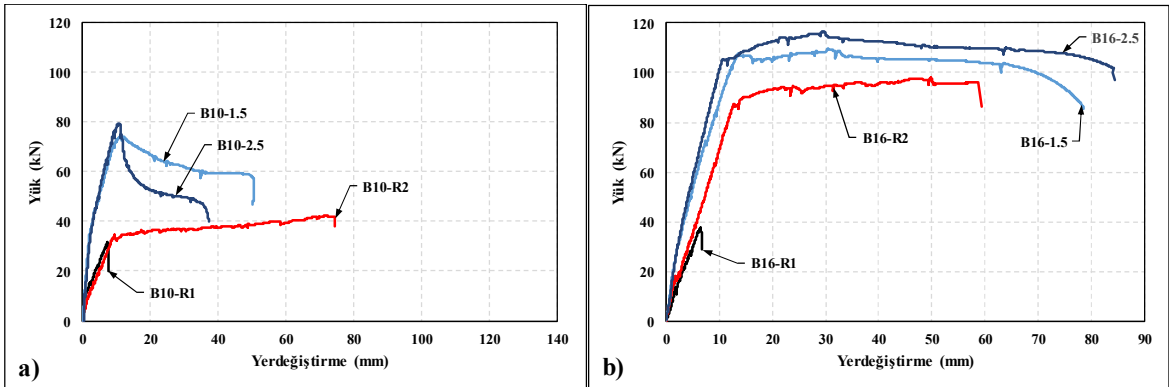


Şekil 2. a) Dört noktalı eğilme testi düzeneği (ön yüz) b) Şematik ölçüm düzeneği (arka yüz)

## TEST SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

### Yük-Yerdeğiştirme Davranışları

Test kirişlerinin dört noktalı eğilme testlerinden elde edilen yük-düşey yerdeğiştirme (sehim) davranışları iki donatı oranı için Şekil 3’te sunulmuştur. UYPLB içeren kirişlerde, çekme bölgesindeki çelik lifler ilave donatı etkisi yaparak başlangıç rijitliğini ve yük taşıma kapasitesini kesme donatılı ve donatısız lifsiz kirişlere göre belirgin şekilde artırmıştır. Bununla birlikte, UYPLB’lu kirişlerin tümünde çekme donatılarının akmasından sonraki aşamada çelik liflerin sebep olduğu bir pekleşme davranışı gözlenmektedir. Bu davranış, çekme bölgesindeki liflerin sıyrılması ile sonlanmakta ve bu noktadan sonra dayanım azalmaları gözlenmektedir. Dayanım azalmalarına rağmen tüm lifli kirişlerde lifsiz kirişlerin yük taşıma kapasitelerinden daha yüksek değerler elde edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. Test kirişlerinin yük-düşey yerdeğiştirme davranışları; a)  $\rho = 0.008$  b)  $\rho = 0.022$

Kesme donatısı ve çelik lif içermeyen B10-R1 ve B16-R1 kirişinde, asal çekme gerilmelerinin sebep olduğu gevrek kesme kırılması gözlenmiştir. Bu kirişlere kesme donatısı eklenmesi sonucunda (B10-R2 ve B16-R2) kesme çatlaklarının sınırlanması sonucu basınç bölgesindeki betonun ezilmesi ile sonuçlanan sünek çekme kırılması meydana gelmiştir. Lifsiz kirişlerde benzer genişlikte çok sayıda eğilme çatlakları gözlenirken, farklı lif oranlarının gözönüne alındığı UYPLB kirişlerde liflerin

çatlakları sınırlama özelliği nedeniyle çatlak genişlikleri sınırlı kalmıştır. Burada, tepe yükünün aşılması sonrasında belirli bir bölgede liflerin sıyrılması sonucunda çatlaklar tek noktada yoğunlaşarak genişlemiş (çatlak lokalleşmesi) ve donatıda şekil değiştirmelerin aşırı ve hızlı artışına bağlı olarak donatı kopması meydana gelmiştir. Bu kırışlarda kesme donatısı bulunmamasına rağmen kesme kırılması gözlenmemesi çelik liflerin kesme donatısı yerine kullanılabilceğini göstermiştir.

### Yük Taşıma Kapasiteleri ve Yerdeğiştirme Süneklikleri

Daha düşük donatı oranına sahip kırışlarda ( $\rho = 0.008$ ), kesme donatısı bulunan liffsiz referans kırışe (B10-R2) göre yük taşıma kapasitesi lif içeriğine bağlı olarak yaklaşık 1.9 kat artış gösterirken, yüksek donatı oranına sahip kırışlarda ( $\rho = 0.022$ ) bu artışın sınırlı kaldığı belirlenmiştir. UYPLB karışımındaki lif oranı arttıkça yük taşıma kapasitesi artmaktadır.

Düşük donatı oranı için kırış yerdeğiştirme süneklikleri incelendiğinde, çelik lif kullanımının yerdeğiştirme sünekliği üzerindeki olumsuz etkileri ve lif oranı arttıkça sünekliğin hızla azalan bir eğilimde olduğu görülmektedir (Şekil 3a ve Tablo 2). Pek çok tasarım yönetmeliğindeki üst sınırı temsil eden donatı oranına ( $\rho = 0.022$ ) çıkıldığında ise, kesme donatısı bulunan ancak lif içermeyen referans kırışe (B16-R2) göre daha yüksek süneklik değerleri elde edilmiştir. Burada, UYPLB'un yüksek basınç dayanımı ve şekil değiştirme kapasitesinin sağladığı katkılar ön plana çıkmaktadır. UYPLB kullanımının kesme donatılı / donatısız referans kırışlara kıyasla daha çok yerdeğiştirme yapabilmesine imkan verdiği ve ayrıca, çelik lif oranındaki değişimlerin süneklik üzerindeki pozitif etkileri görülmektedir (Şekil 3b ve Tablo 2).

Tablo 2. Yük-Yerdeğiştirme Davranışı için Karakteristik Değerler

Numune kodu	$\Delta_y$ (mm)	$P_{maks}$ (kN)	$\Delta_u$ (mm)	$P_u$ (kN)	$\mu_d = \Delta_u / \Delta_y$	Kırılma şekli
B10-R1	-	31.50	-	-	-	Kesme
B10-R3	11.25	42.28	74.46	41.15	6.62	Eğilme ( <i>Beton Ezilmesi</i> )
B10-1.5	8.08	74.19	20.20	66.74	2.50	Eğilme ( <i>Donatı kopması</i> )
B10-2.5	8.27	79.44	11.90	71.50	1.44	Eğilme ( <i>Donatı kopması</i> )
B16-R1	-	37.82	-	-	-	Kesme
B16-R3	14.11	97.81	59.46	88.03	4.22	Eğilme ( <i>Beton ezilmesi</i> )
B16-1.5	12.09	109.53	71.4	98.56	5.89	Eğilme ( <i>Donatı kopması</i> )
B16-2.5	11.20	116.40	80.85	104.73	7.22	Eğilme ( <i>Donatı kopması</i> )

$\Delta_y$ : Akma yerdeğiştirmesi,  $\Delta_u$ : Nihai yerdeğiştirme,  $P_{maks}$ : Maksimum yük,  $P_u$ : Nihai yük,  $\mu_d$ : Yerdeğiştirme sünekliği

## SONUÇ

Bu çalışmada, UYPLB'dan üretilmiş betonarme kırışların eğilme davranışına çelik lif oranının etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu çerçevede, iki çekme donatısı oranı ve iki hacimsel lif oranına sahip kesme donatısız UYPLB kırışlar ile çelik lif içermeyen kesme donatılı/ donatısız referans kırışların dört noktalı eğilme testleri yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

UYPLB içeren kırışlarda kesme donatısı bulunmamasına karşın, çelik liflerin çatlakları sınırlaması sayesinde kesme donatısı yerine kullanılabilceği görülmüştür. Bununla birlikte, düşük donatı oranı için yük taşıma kapasitesinde liflerin önemli katkı sağladığı belirlenmiştir.

Düşük donatı oranı için lif kullanımının çatlak lokalleşmesi nedeniyle yerdeğiştirme sünekliğini olumsuz etkilediği ve lif oranı arttıkça sünekliğin azalan bir eğilimde olduğu görülmektedir. Pek çok tasarım yönetmeliğindeki üst sınırı temsil eden donatı oranına çıkıldığında ise, kesme donatılı referans kırışe göre UYPLB kırışların daha yüksek süneklik kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir. Burada, UYPLB'un yüksek basınç dayanımı ve şekil değiştirme kapasitesinin sağladığı katkılar gözönüne alınan parametreler açısından ön plana çıkmaktadır.

### Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton, 116M517 nolu TÜBİTAK projesi kapsamında geliştirilmiştir. Bu nedenle yazarlar TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunarlar.

## KAYNAKLAR

- AFGC (2013) Recommendation: Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes. Revised ed. Association Française de Génie Civil, Service d'études techniques des routes et autoroutes.
- Dancygier AN and Berkover E (2016) "Cracking localization and reduced ductility in fiber-reinforced concrete beams with low reinforcement ratios", *Engineering Structures*, 111:411-424
- Fehling E, Schmidt M, Walraven J, Leutbecher T, Frönlich S (2014) Ultra-High Performance Concrete UHPC. Betonkalender, Wilhelm Ernst & Sohn
- Graybeal BA (2006a) "Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete", US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Publication No: FHWA-HRT-06-103
- Graybeal BA (2006b) "Structural Behavior of Ultra-High Performance Concrete Prestressed I-Girders", Rep. No. FHWA-HRT-06-115, Federal Highway Administration, Washington, D.C.
- Graybeal BA (2008) "Flexural behavior of an ultra high-performance concrete I-girder", *Journal of Bridge Engineering*, 13(6):602-610
- Hasgul U, Turker K, Birol T, Yavas A (2018) "Flexural behavior of ultra-high-performance fiber reinforced concrete beams with low and high reinforcement ratios", *Structural Concrete*, 19(6):1577-1590
- Hegger J and Bertram G (2008) "Shear carrying capacity of ultra-high performance concrete beams", Taylor Made Concrete Structures-Walraven & Stoelhorst (eds), Taylor & Francis Group, London, 341-347
- JSCE (2008) Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks. Concrete Engineering Series, 82, Japan Society of Civil Eng.
- Lee MG and Wang YC (2007) "A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material", *Construction and Building Materials*, 21:182-189
- Massicotte B, Dagenais MA, Lagier F (2013) "Performance of UHPFRC jackets for the seismic strengthening of bridge piers", *RILEM-Fib-AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC 2013*, Marseille, France, 1-3 October, 89-98
- Moreillon L and Menétrey P (2013) "Rehabilitation and strengthening of existing RC structures with UHPFRC: Various application" *RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, France: RILEM Publication S.A.R.L, 27-136
- Parra-Montesinos GJ, Peterfreund SW, Chao SH (2005) "Highly damage-tolerant beam-column joints through use of high performance fiber-reinforced cement composites", *ACI Structural Journal*, 102(3):487-495
- Perry VH and Seibert PJ (2013) "Fifteen years of UHPC construction experience in precast bridges in North America", *RILEM-Fib-AFGC International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC 2013*, Marseille, France, 1-3 October, 229-238
- Richard P and Cheyrezy M (1995) "Composition of reactive powder concretes", *Cement and Concrete Research*, 25(7):1501-1511
- SAMARIS (2005) "Full Scale Application of UHPFRC for the Rehabilitation of Bridges – from the Lab to the Field", European Project 5th FWP/SAMARIS – Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructures, Report D22, WP 14: HPRCC
- Shannag MJ, Abu-Dyya N, Abu-Farsakh G (2005) "Lateral load response of high performance fiber reinforced concrete beam-column joints", *Construction and Building Materials*, 19:500-508
- Türker K, Birol T, Yavaş A, Hasgöl U, Yazıcı H (2019) "Ultra yüksek performanslı lifli beton ile üretilmiş betonarme kirişlerin eğilme davranışı", *Teknik Dergi*, 30(1): 8777-8801
- Voo YL and Foster SJ (2010) "Characteristics of ultra-high performance 'ductile' concrete and its impact on sustainable construction", *The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering*, 3(3):168-187
- Voo YL, Augustin PC, Thamboe TAJ (2011) "Construction and design of a 50m single span UHP ductile concrete composite road bridge", *The Structural Engineer*, 89(15):24-31
- Wang C, Yang C, Liu F, Wan C, Pu X (2012) "Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials", *Cement and Concrete Composites*, 34:538-544
- Wille K, Naaman AE, Parra-Montesinos GJ (2011) "Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way", *ACI Materials Journal*, 108(1):46-54
- Yazıcı H, Yardımcı MY, Aydın S, Karabulut AS (2009) "Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes", *Construction and Building Materials*, 23:1223-31
- Yoo DY and Yoon YS (2015) "Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers", *Engineering Structures*, 102:409-423
- Yoo DY, Banthia N, Yoon YS (2017) "Experimental and numerical study on flexural behavior of UHPFRC beams with low reinforcement ratios", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44(1):18-28
- Yuguang Y, Walraven JC, Uijl JA. (2009) "Combined effect of fibers and steel rebars in high performance concrete", *Heron*, 54(2/3):205-224
- Zohrevand P and Mirmiran A (2012) "Cyclic behavior of hybrid columns made of ultra high performance concrete and fiber reinforced polymers", *Journal of Composites for Construction*, 16(1):91-99