



Evaluation of using ultra-high performance fiber reinforced concrete in I-section RC beam

Kaan Türker^{1*}, Altuğ Yavaş¹, Tamer Birol¹, Cengiz Gültekin²

¹Department of Civil Engineering, Balıkesir University, Balıkesir, 10145, Turkey

²FAB Engineering Software Company 10100, Balıkesir, Turkey

Highlights:

- Use of ultra-high performance fiber reinforced concrete in I-section beams
- Experimental investigation of flexural/shear behavior of beams
- Comparison of UHPFRC and conventional concrete

Keywords:

- Ultra-high performance fiber reinforced concrete
- RC beam
- I-section
- Flexural behavior

Graphical/Tabular Abstract

Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) has a potential to provide more economic, aesthetic and long-life structures than the Conventional Concrete (CC), thanks to its superior mechanical properties. In this context, one of most prominent structural element is RC beam.

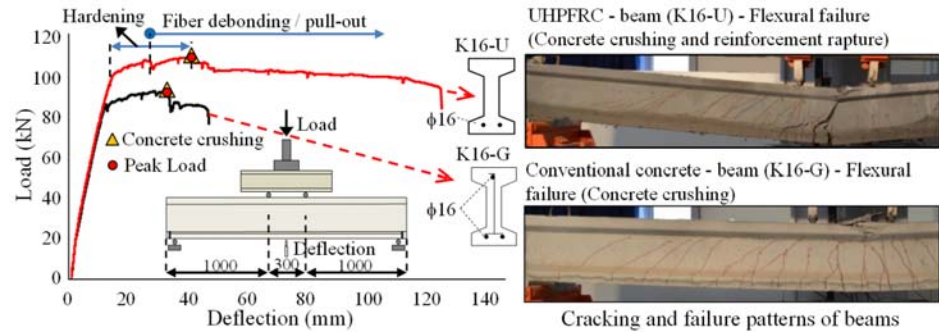


Figure A. Comparison of load-deflection behaviours and failure patterns of UHPFRC beam and CC beam

Article Info:

Research Article
Received: 01.10.2020
Accepted: 09.02.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.803936

Acknowledgement:

The authors gratefully acknowledge the financial support of TUBITAK under grant 116M517.

Correspondence:

Author: Kaan Türker
e-mail:
kturker@balikesir.edu.tr
phone: +90 266 612 11 94 /
124205

Purpose: In the study, it was aimed to experimentally evaluate the effects of using UHPFRC in I-section RC beams on bending / shear behavior. In addition, based on the experimental results, it was aimed to numerically evaluate the usability of UHPFRC beam design procedure in AFGC 2013 Recommendations.

Theory and Methods:

In the experimental program, a parametric study was carried out on UHPFRC beams and CC beams according to the tensile reinforcement ratio. The beams were tested under four-point loading and load deflection behaviors, failure modes, deflection ductilities, first cracking and peak loads, flexural stiffness, cracking response and concrete/reinforcement strain response were investigated on the test beams. In the numerical evaluation, the ultimate limit states, related strains and flexural capacities obtained from AFGC 2013 flexural design procedure were compared with the experimental results.

Results:

The use of UHPFRC increased the first cracking loads and peak loads of the beams by approximately 20-57% and the flexural stiffness by 1.22-2.22 times compared to the use of CC. While the use of UHPFRC caused a small decrease in the beam ductility at low tensile reinforcement ratios, it increased the ductility up to 3.13 times at the beams with high reinforcement. At the elastic response region of beams, maximum flexural crack widths in the UHPFRC beams decreased by an average of 2.22 times and maximum shear crack widths decreased by 1.62 times compared to the CC beams. The use of UHPFRC with 1.0% steel fiber increased the shear capacity of the beams without stirrup more than 3.5 times and prevented shear failure by limiting the shear cracks.

Conclusion: The use of UHPFRC in I-section beams has provided significant advantages in terms of the beam flexural and shear capacity, the stiffness and the crack limiting in comparison to the use of CC for all the reinforcement ratios considered in the study. However, the use of UHPFRC has caused a disadvantage for the beam ductility and the cracking behavior after peak-load, especially at the low reinforcement ratios. This negative effect of UHPFRC turned into an advantage at the beam with highest reinforcement ratio. With the numerical procedure proposed in AFGC 2013, UHPFRC beam flexural capacities could be determined with sufficient accuracy.



I-enkesitli betonarme kirişlerde ultra-yüksek performanslı lifli beton kullanımının değerlendirilmesi

Kaan Türker^{1*}, Altuğ Yavaş¹, Tamer Birol¹, Cengiz Gültekin²

¹Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 10145, Altıeylül Balıkesir, Türkiye

²FAB Teknik Mühendislik Yazılım Tic. A.Ş. 10100, Karesi, Balıkesir, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- I-enkesitli betonarme kirişlerde ultra yüksek performanslı lifli beton kullanımı
- Kirişlerin eğilme/kesme davranışının incelenmesi
- Ultra yüksek performanslı lifli beton ve geleneksel betonun karşılaştırılması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 01.10.2020
Kabul: 09.02.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.803936

Anahtar Kelimeler:

Ultra Yüksek Performanslı
Lifli Beton,
betonarme kiriş,
I-enkesit,
eğilme davranışı,
deneysel inceleme,
sayısal inceleme

ÖZ

Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) üstün mekanik özellikleri sayesinde, Geleneksel Betona (GB) göre daha ekonomik, estetik ve uzun ömürlü yapılara imkan verebilecek potansiyele sahiptir. UYPLB kullanımının, dikdörtgen enkesitli kirişlerde çeşitli avantajları ortaya konmuş olmakla birlikte, I-enkesitli kirişler için deneysel ve nümerik incelemelere ihtiyaç bulunmaktadır. Çalışmada, I-enkesitli kirişlerde UYPLB kullanımının eğilme/kesme davranışına etkileri deneysel olarak incelenmiş, avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar referans alınarak, UYPLB kirişlerin tasarımına yönelik Association Française De Génie (AFGC) 2013 sayısal prosedürünün kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Farklı donatı oranına sahip kirişlere eğilme testi uygulanmış ve yük-deplasman davranışları, kırılma şekilleri, taşıma kapasiteleri, deplasman sınırları, çatlak davranışları, eğilme rijitlikleri ve beton/donatı şekil değiştirme davranışları belirlenmiştir. I-enkesitli kirişlerde UYPLB kullanımı, çalışmada incelenen tüm donatı oranları için eğilme ve kesme kapasitesi, rijitlik ve çatlak sınırlama bakımından GB'ye göre önemli avantajlar sağlamıştır. UYPLB'nin etkisi kullanılan donatı oranına göre farklılık göstermiştir. UYPLB kullanımı kiriş sınırları ve maksimum yük sonrası çatlak davranışı bakımından özellikle düşük donatı oranlarında bir dezavantaja neden olmuştur. UYPLB'nin bu olumsuz etkisi en yüksek donatı oranına sahip kirişte avantaja dönüşmüştür. AFGC 2013 kılavuzundaki sayısal prosedür ile kiriş eğilme kapasiteleri yeterli doğrulukla belirlenebilmiştir. Ancak, UYPLB kirişlerde yüksek donatı oranlarına çıkıldığında, AFGC 2013'deki taşıma gücü limit durumuna ait şekil değiştirmelerde deneysel sonuçlarla uyumsuzluklar oluşabildiği görülmüştür.

Evaluation of using ultra-high performance fiber reinforced concrete in I-section RC beam

H I G H L I G H T S

- Use of ultra-high performance fiber reinforced concrete in I-section beams
- Experimental investigation of flexural /shear behavior of beams
- Comparison of ultra-high performance fiber reinforced concrete and conventional concrete

Article Info

Research Article
Received: 01.10.2020
Accepted: 09.02.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.803936

Keywords:

Ultra-High Performance
Fiber Reinforced Concrete,
RC beam,
I-section, flexural behaviour,
experimental investigation,
numerical investigation

ABSTRACT

Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) has a potential to provide more economic, aesthetic and long-life structures than Conventional Concrete (CC), thanks to its superior mechanical properties. Although various advantages of using UHPFRC in rectangular section beams have been demonstrated, there is a need for experimental and numerical studies on I-section beams. In the study, pros and cons of using UHPFRC for I-section RC beams was experimentally evaluated in context of flexural /shear behavior. Based on the experimental results, usability of the UHPFRC beam design procedure in Association Française De Génie (AFGC) 2013 recommendations was evaluated. The beams with different reinforcement ratio were tested under flexural loading and load deflection behaviors, failure modes, deflection ductilities, capacities, flexural stiffness, cracking response and strain response of concrete/reinforcement were investigated on the test beams. The use of UHPFRC in I-section beams has provided significant advantages in terms of the beam flexural and shear capacity, the stiffness and the crack limiting in comparison to CC for all the reinforcement ratios considered in the study. The effect of UHPFRC on these parameters varied according to the ratio of reinforcement used in the beam. The use of UHPFRC has caused a disadvantage for the beam ductility and the cracking behavior after peak-load, especially at the low reinforcement ratios. This negative effect of UHPFRC turned into an advantage at the beam with highest reinforcement ratio. With the numerical procedure in AFGC 2013 manual, UHPFRC beam flexural capacities could be determined with sufficient accuracy. However, when the high reinforcement ratios are reached in the UHPFRC beams, it has been observed that the ultimate limit strains obtained from AFGC procedure may be inconsistent with the experimental results.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Beton teknolojisinde, 1970'lerde başlayan lifli kompozit beton çalışmaları yüksek performanslı yeni nesil bir beton türünün ortaya çıkmasını sağlamıştır [1]. Günümüzde, kimyasal katkıların yanısıra liflerin gelişimi ve bileşen optimizasyonundaki gelişmeler ile bu beton türünde üstün mekanik özelliklere ulaşılmakta ve bunlar yüksek performanslı lif takviyeli çimento kompozitleri veya daha yaygın şekliyle *Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB)* olarak isimlendirilmektedir [1, 2]. Bu tür betonların yapısal elemanlarda kullanımı geleneksel betonarmeye göre ekonomik, estetik ve uzun ömürlü yapılara imkan verecek potansiyeli taşımaktadır. UYPLB'yi geleneksel lifli ve lifsiz betondan ayıran en önemli özelliği çekme altındaki dayanımı ve pekleşmeli uzama davranışdır [3, 4]. Yoo vd. [5], Hasgül vd. [6] ve Kodur vd. [7] kirişler üzerinde yaptıkları çalışmalarda, UYPLB'nin bu özelliğinin ilk çatlama yükünü arttırdığını ve işletme yükleri altındaki sehimi ve çatlakları önemli ölçüde azalttığını göstermiştir. UYPLB'de lifler tarafından sağlanan çekme dayanımının, özellikle düşük çekme donatısı içeren kirişlerde eğilme kapasitesine önemli katkı sağladığı Yoo and Yoon [8], Türker vd. [9] ve Yoo vd. [10] tarafından deneysel çalışmalarla ortaya konulmuştur. Yoğun iç yapısı ve çok düşük su/bağlayıcı oranı sayesinde çok yüksek (150 MPa'ya aşan) basınç dayanımına sahip olan UYPLB'nin bir diğer üstünlüğü basınç altındaki şekil değiştirme kapasitesidir. Bu özelliği ile UYPLB, geleneksel yüksek dayanımlı betondan ayrılmaktadır. Yüksek dayanımlı betonda basınç altında çok gevrek ve ani bir kırılma gözlenirken, UYPLB'de liflerin sargı etkisi sayesinde sünek bir kırılma gerçekleşmektedir [11, 12]. Yapılan deneysel çalışmalarda, UYPLB'nin yüksek dayanım ve şekil değiştirme kapasitesi sayesinde kirişlerde geleneksel betonarmeye göre çok daha yüksek çekme donatısı oranlarında dahi süneklığın sağlanabildiği gösterilmiştir [13, 14]. UYPLB, kiriş eğilme davranışı üzerindeki bu etkilerinin yanı sıra kesme davranışı üzerinde de önemli etkiye sahiptir. Baby vd. [15] ve Yavaş vd. [16] tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda lifler tarafından sağlanan çekme dayanımının lif tipine ve oranına bağlı olarak kiriş kesme kapasitesinde önemli ölçüde artış sağlayabildiği gösterilmiştir. Voo vd. [17]'de, önerilmeli I-enkesitli kirişlerde UYPLB'nin farklı kesme kırılması türleri için kesme kapasitesine katkısını deneysel olarak ortaya koymuş ve bu katkı için geleneksel betonarmeden farklı sayısal bir model geliştirmiştir.

UYPLB'nin kullanımında daha çok çatlakları azaltıcı ve dolayısıyla betonun durabilitesini artırıcı etkisi öne çıkmaktadır. Bu nedenle UYPLB'nin önemli kullanım alanlarından birini çevre koşullarına maruz prefabrik köprüler oluşturmaktadır [18, 19]. Benzer sebeple, açık ortamda bulunan mevcut geleneksel betonarme yapıların onarım, güçlendirme ve korumasında da UYPLB kullanılmaktadır [20, 21]. Bunların yanı sıra salt UYPLB içeren ince kesitli balkon, merdiven gibi yapısal eleman ve mazgal, rögar kapağı gibi yapısal olmayan eleman

uygulamaları da bulunmaktadır [22, 23]. Salt UYPLB veya UYPLB'li betonarme elemanların davranışı geleneksel betonarmeye göre önemli farklılıklar gösterdiği için bunların tasarımında mevcut tasarım standartları yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, UYPLB kullanımı yaygınlaşan Fransa [24, 25], Japonya [26], İsviçre [27] gibi ülkelerde UYPLB için özel standartlar geliştirilmeye başlanmıştır. Günümüzde UYPLB'nin üretim prosedürleri, test metodları, tasarım esasları vb. konularda uluslararası düzeyde kabul görmüş standart bir yaklaşım bulunmamasına karşın, bu konular tartışılmakta ve geliştirilmektedir [28]. UYPLB'de betonun basınç dayanımının yanısıra çekme dayanımının ve şekil değiştirme kapasitesinin davranışta etkili olması ve bunun da kullanılan lif içeriği (malzemesi/tipi/boyutu/oranı), beton içindeki doğrultusu, beton matrisinin yapısı, donatılar ile etkileşimi vb. birçok etkene bağlı olması genel bir standart oluşturulmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle daha çok beton firmaları (Ductal, BCV, Dura gibi) tarafından hazırlanan belirli özelliklere sahip özel UYPLB karışımları ve bunlara ait tasarım kılavuzları kullanılmaktadır [29, 30]. Lif içeriği ve üretim prosedürleri bakımından büyük çeşitlilik gösteren UYPLB ile ilgili mevcut tasarım standartlarının gelişmesi ve buna bağlı olarak UYPLB'nin kullanımının yaygınlaşabilmesi için çok sayıda deneysel ve nümerik çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, prefabrikasyon sektöründe yaygın kullanılan I-enkesitli kirişlerde geleneksel beton yerine UYPLB kullanımının eğilme/kesme davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, incelenen UYPLB test kirişleri üzerinde, UYPLB kılavuzu olan AFGC 2013 [24]'deki tasarım prosedürünün uygulaması yapılarak standardın kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Böylelikle, çoğu kez donatı detaylarının yoğunluğu nedeniyle başlık ve gövde boyutlarının büyütülmesine gerek duyulan I-enkesitli kirişlerde UYPLB'nin uygulanabilirliği ve potansiyel avantajların/dezavantajların ortaya konulması amaçlanmıştır. Çalışmada, geleneksel betonarme kirişleri temsil eden farklı çekme donatısı oranları incelenmiştir. UYPLB'li kirişlerde kesme donatısı ve basınç donatısı kullanılmayarak, salt çekme donatılı I-enkesitli UYPLB kirişlerin kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Deneysel çalışma programında, Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB), lifsiz Ultra Yüksek Dayanımlı Beton (UYDB) ve Geleneksel Beton (GB) kullanılarak I-enkesitli betonarme kirişler üretilmiş ve bunlar dört noktalı eğilme testlerine tabi tutularak eğilme/kesme davranışları karşılaştırılmıştır. Testler yoluyla kirişlerin yük-sehim (düşey yer değiştirme) davranışları, kırılma şekilleri, yer değiştirme süneklikleri, ilk çatlama yükleri, moment taşıma kapasiteleri, eğilme rijitlikleri, çatlak davranışları, betonun ve donatı çeliğinin şekil değiştirme davranışları incelenmiştir. Ayrıca, malzeme ölçeğindeki numuneler üzerinde yapılan beton basınç ve eğilme testleri ile UYPLB'nin mekanik özellikleri belirlenmiştir.

2.1. Kiriş Özellikleri (Beam Properties)

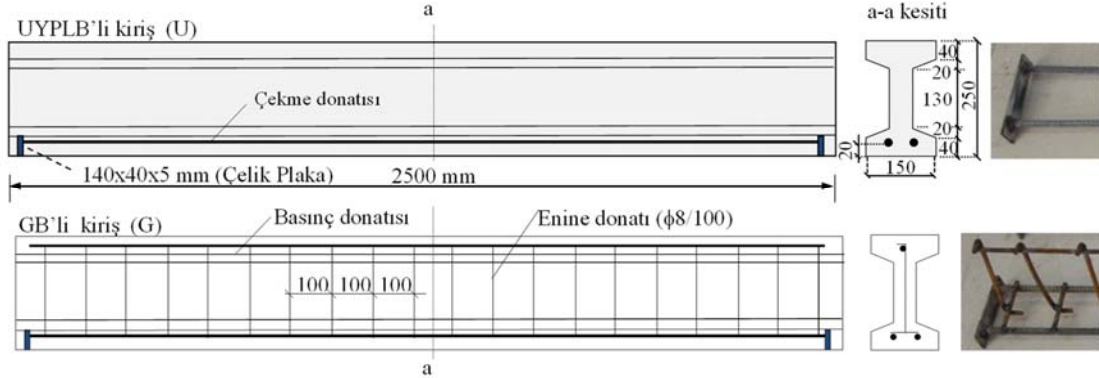
Çalışmada 2500 mm boyunda, Şekil 1’de gösterilen geometrik enkesitte kirişler kullanılmıştır. Geleneksel betonarme kirişlerdeki çekme donatısı oranlarını temsilen $\rho=0,008-0,0220$ arasında değişen 4 farklı donatıya sahip kiriş incelenmiştir [31]. Her bir donatı oranı için UYPLB ve GB’den oluşan ikişer kiriş üretilmiştir. Ayrıca, en düşük donatı oranı ($\rho=0,008$) için UYPLB ile aynı iç yapıya sahip lifsiz UYDB’li bir kiriş üretilmiştir. Enine donatısı da bulunmayan bu kiriş, kesme kapasitesini belirlemede Referans kirişi olarak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan kiriş kodları ve donatı /lif içerikleri Tablo 1’de verilmiştir. GB’li kirişlerde çekme donatısı oranının yarısı kadar basınç donatısı ve I-enkesitin gövdesinde 100mm aralıklarla $\Phi 8$ ’lik tek kollu enine donatı kullanılmıştır. Buna karşılık, UYPLB kirişlerde enine donatı ve basınç donatısı bulunmamaktadır. Böylece UYPLB’de liflerin sağladığı basınç sünekliği ve çekme kapasitesi sayesinde enine ve basınç donatısız kirişlerin üretilebilirliği değerlendirilmiştir.

Çekme donatılarında I-enkesit nedeniyle kanca uygulaması yapılamadığından, kenetlenme için donatı uçlarına çelik

plakalar kaynaklanmıştır. Tek kollu enine donatıları sabitleyebilmek amacıyla çekme donatıları üzerine aynı aralıklarla enine doğrultuda kullanılmış ve tüm donatılar nokta kaynağı ile bağlanmıştır (Şekil 1).

2.2. Beton Üretimi ve Numunelerin Hazırlanması (Concrete Production and Preparation of Specimens)

Çalışmada, test kirişleri için 28 günlük ortalama basınç dayanımı 150 MPa’yı sağlayan UYPLB’nin kullanılması planlanmıştır. Bunun için bağlayıcı olarak CEM I 42.5 R sınıfı portland çimentosu, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu, agrega olarak yüksek dayanımlı kuvars agregası, su ve süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. I-enkesitli betonarme elemanlarda betonun yerleşebilirliğini sağlamak amacıyla yüksek işlenebilirliğe sahip 13/0,16 mm’lik düz mikro liflerden hacimsel olarak %1 oranında kullanılmıştır. Çelik lifin çekme dayanımı 2500 MPa, elastisite modülü 210000 MPa’dır. UYPLB’yi oluşturan bileşenlerin yoğunlukları ve kullanım miktarları Tablo 2’de verilmiştir. UYPLB için hazırlanan karışımda lif dışındaki malzemeler kullanılarak K1-R kirişine ait UYDB elde edilmiştir. Geleneksel Beton (GB) olarak ise 40-50 MPa basınç dayanımına sahip beton kullanılması planlanmış ve bunun



Şekil 1. Kirişin geometrik ve donatı özellikleri (Geometrical and Rebar properties of beams)

Tablo 1. Kirişlerin donatı ve lif içerikleri (Rebar and fiber content of beams)

Kiriş kodu	Çekme Donatısı (Oran)	Basınç Donatısı	Enine Donatı	Lif içeriği	Çekme Donatısı f_y (MPa)	Çekme Donatısı f_u (MPa)
K10-R	-	-	-	-	471	593
K10-G	2 ϕ 10 (0,008)	1 ϕ 10	ϕ 8/10	-	470	585
K10-U	-	-	-	%1,0	472	593
K12-G	2 ϕ 12 (0,012)	1 ϕ 12	ϕ 8/10	-	469	586
K12-U	-	-	-	%1,0	472	593
K14-G	2 ϕ 14 (0,017)	1 ϕ 14	ϕ 8/10	-	469	587
K14-U	-	-	-	%1,0	468	588
K16-G	2 ϕ 16 (0,022)	1 ϕ 16	ϕ 8/10	-	467	587
K16-U	-	-	-	%1,0	467	587

R: Kesme için referans kirişi, G: Geleneksel beton, U: UYPLB f_y : Donatı akma dayanımı, f_u : Donatı kopma dayanımı

Tablo 2. UYPLB’yi oluşturan bileşenlerin yoğunlukları ve kullanım miktarları (Densities and amounts of UHPFRC components)

	Çimento	Silis dumanı	Yüksek fırın cürufu	Süper akışkanlaştırıcı	0-0.8 mm Kuvars	Su	Çelik lif
Yoğunluk (g/cm ³)	3,10-3,15	2,20	2,75	1,08-1,14	2,68	1,0	7,8
Miktar (kg/m ³)	720	240	240	23,64	865	204	78

için geleneksel bileşenler kullanılmıştır. UYPLB üretiminde hedef dayanımlara ulaşabilmek için düşük su/bağlayıcı oranı içeren karışımda etkin karıştırmanın sağlanması gerekmektedir. Burada yüksek devirli betoniyer (panmikser) kullanımı ve bileşenlerin karıştırma sıraları ve süreleri önemli olmaktadır. Üretilen UYPLB için öncelikle bağlayıcı maddeler (çimento, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu) ve agrega (kuvars) panmikserde kuru olarak 50 devir/dk. hızla 3 dakika karıştırılmakta, daha sonra akışkanlaştırıcı ile karıştırılmış olan su, kuru karışıma ilave edilerek aynı hızla 3 dakika daha karıştırılmaktadır. Topaklanma kıvamına gelen karışım, 3 dakika boyunca 100 devir/dk. hızla karıştırılmakta, akıcı kıvama getirildikten sonra çelik lifler ilave edilerek 50 devir/dk. 3 dakika daha karıştırma işlemi uygulanmaktadır (Şekil 2a, Şekil 2b). Hazırlanan lifli beton, özel bir beton arabası yardımıyla kiriş kalıplarına dökülmüştür (Şekil 2c). Beton akıcı kıvamda (kendiliğinden yerleşen) olduğu için ayrıca bir yerleştirme işlemi uygulanmasına gerek kalmamıştır. Geleneksel beton da aynı betoniyerde üretilmiş ancak betonun I-enkesitli kalıp içerisindeki yerleşimini sağlamak amacıyla vibratör uygulanmıştır (Şekil 2d). T500 testi [32] ve maksimum yayılma çapı ölçümleri ile üretilen UYPLB'nin vizkositesi ve yerleşebilirliği belirlenmiştir (Şekil 2f). T500 testinde betonun 500 mm'lik çaptaki alana yayılması için geçen süre 3 s, maksimum yayılma çapı 70 cm olarak elde edilmiştir. Buna göre üretilen UYPLB'nin kendinden yerleşebilir özellikte olduğu söylenebilmektedir.

Hazırlanan UYPLB'nin basınç ve eğilme/çekme dayanımlarını belirlemek amacıyla test kirişleri ile birlikte her bir kiriş için 3 adet 100x100x100 mm'lik küp numune ve 100x100x400 mm boyutlarında prizma numuneleri alınmıştır (Şekil 2e, Şekil 2g). Ayrıca GB'nin basınç dayanımı için 150x150x150 mm'lik küp numuneler hazırlanmıştır (Şekil 2h). Hazırlanan test kirişleri ve numuneler döküm sonrası plastik bir örtü ile sarılarak bir gün kalıpta bekletilmiştir. Daha sonra, kirişler ve numuneler kür kabineye yerleştirilerek 90°C buharda bir gün kürlenmiş, böylece betonun nihai dayanımına yaklaşması sağlanmıştır. Kür kabinden çıkarılan numuneler test gününe kadar (28-50 gün) laboratuvar ortamında bekletilmiştir.

2.3. Kiriş Test Düzenegi ve Ölçümler (Beam Test Set-up and Measurements)

Kirişlerin testleri 500 kN kapasiteli ve deplasman kontrollü bir hidrolik yük veren içeren test çerçevesi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 3). Kirişin sehimini (düşey deplasmanını) ölçmek üzere açıklık ortasına bir adet potansiyometrik cetvel ve yükü ölçmek üzere yük verenin altına bir adet yük hücresi yerleştirilmiştir. Yük, rijit bir çelik profil vasıtasıyla aralarında 300 mm olan iki tekil yüke dönüştürülerek kirişe uygulanmıştır (Şekil 3). Kiriş orta bölgesindeki eğriliği (birim dönmeyi) ve bundan yararlanarak kiriş eğilme rijitliğini belirlemek amacıyla dört adet potansiyometrik cetvel Şekil 3'de gösterildiği gibi



Şekil 2. Betonların hazırlanması (a) UYPLB karışımının topaklanma aşaması (b) UYPLB üretiminde lif ilavesi aşaması (c) ULPLB döküm aşaması (d) GB döküm aşaması (e) UYPLB prizma numuneleri (f) ULPLB kıvam testi (g) UYPLB küp numuneleri (h) GB küp numuneleri

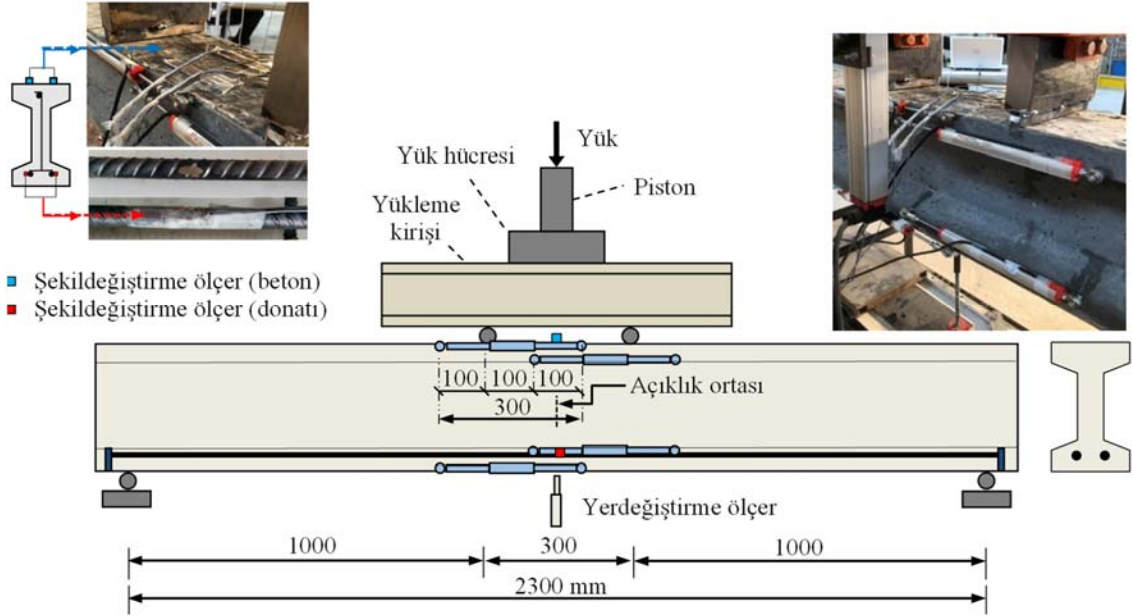
((a) Clumping phase of UHPFRC mixture (b) Fiber addition stage in UHPFRC production (c) Casting phase in UHPFRC (d) Casting stage in conventional concrete (e) Prism specimens for UHPFRC (f) Consistency test of UHPFRC (g) Cube specimens for UHPFRC (h) Cube specimens for conventional concrete)

kirişin alt ve üst başlıklarına yerleştirilmiştir. Potansiyometrik cetvellerin ikisi kirişin sol yarısında, diğer ikisi sağ yarısında 300 mm'lik bölgeyi ölçecek şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3). Böylece kiriş ortasında veya yüklem noktalarının altında oluşması muhtemel büyük lokal çatlakların eğriliğe etkisinin gözönüne alınması amaçlanmıştır. Çekme donatılarında orta bölgede oluşacak akma durumlarını belirlemek amacıyla konumları Şekil 3'de gösterilen şekildeğiştirme ölçerler (strain gauge) yerleştirilmiştir. Betonun basınç bölgesindeki (üst liflerindeki) birim şekildeğiştirmesini ölçmek amacıyla her bir kirişte üst başlığın üst yüzeyine 2 adet şekildeğiştirme ölçer yerleştirilmiştir. Test süresince yük-deplasman ($P-\delta$) davranışı izlenmiş ve bazı karakteristik düşey deplasman değerlerinde (L kiriş açıklığı olmak üzere; $L/500$, $L/100$ deplasmanlarında) yüklem durdurularak, kiriş üzerinde oluşan gözle görülebilir çatlaklar işaretlenmiş ve çatlak mikroskobu yardımıyla maksimum çatlak genişlikleri belirlenmiştir.

2.4. Beton Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi (Determination of Concrete Mechanical Properties)

Test kirişlerinde kullanılan betonların basınç dayanımı için her bir kirişten alınan numunelere (3 adet) 28. gününde eksenel basınç testleri uygulanmış ve elde edilen basınç dayanımları Tablo 3'de verilmiştir. GB'de kullanılan numunelerin küp olması nedeniyle basınç dayanımı için dönüşüm katsayısı uygulanmış, UYPLB için $100 \times 100 \times 100$ mm'lik küp numune dayanımları doğrudan standart basınç dayanımı olarak kullanılmıştır [33]. Buna göre çalışmada hedeflenen GB (40-50 MPa) ve UYPLB (en az 150 MPa) dayanımlarının sağlandığı görülmektedir.

UYPLB'nin eksenel çekme testi ve sonuçların değerlendirilmesi ile ilgili bir standart bulunmaması nedeniyle, literatürde yaygın olarak prizma eğilme testlerinden geri analizler ile çekme davranışının sayısal belirlenmesi yaklaşımı uygulanmaktadır [34, 35]. Bu



Şekil 3. Eğilme testi ve ölçüm düzeneği (Flexural testing and measurement equipment)

Tablo 3. Test kirişlerinin beton basınç dayanımları (MPa). (Concrete compressive strengths of the test beams)

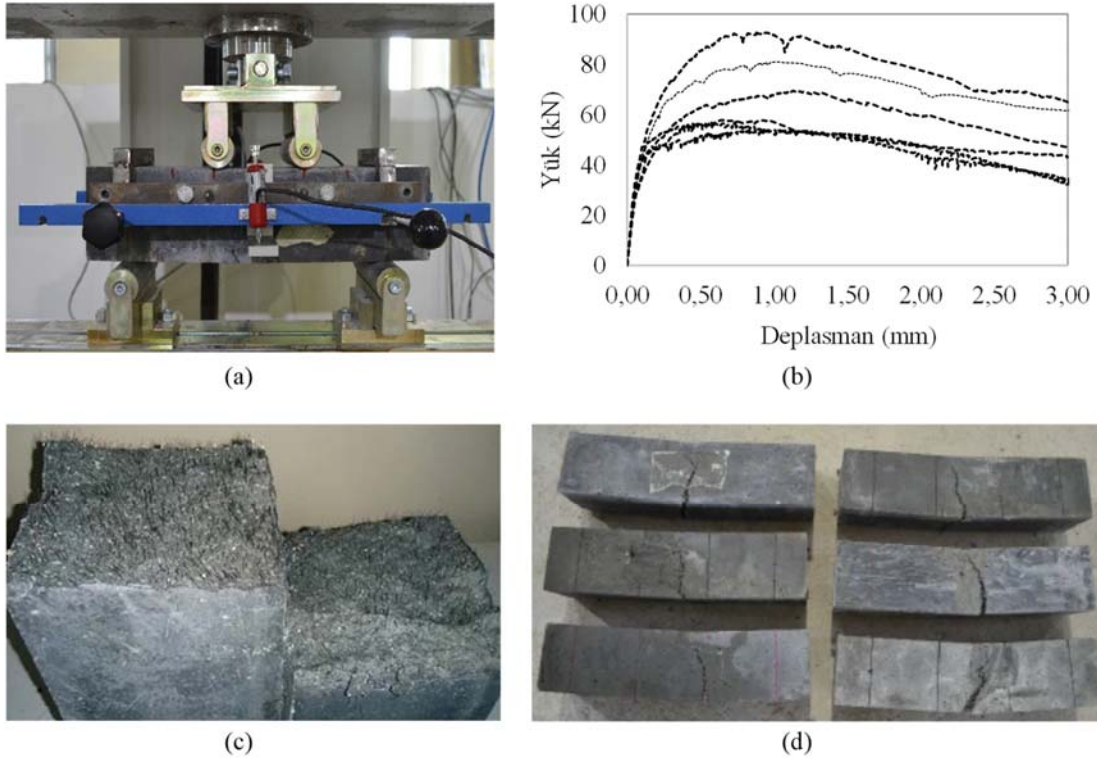
Kiriş	GB (G)	UYDB (R)	UYPLB (U)	Kırılma şekilleri
K10	47,71	144,2	153,6	
	45,73	147,1	153,3	
	47,43	143,9	152,4	
K12	55,3	147,4	161,3	
	56,2	149,3	159,4	
K14	54,3	146,4	159,7	
	53,72	153,4	180,8	
	51,48	155,9	183,5	
K16	53,57	156,4	177,1	
	48,4	146,6	159,5	
Ortalama	49,5	145,5	159,8	
	52,4	143,9	156,1	
St. Sapma	51,3	148,3	163,0	
	3,46	4,50	10,99	

çalışmada üretilen UYPLB'nin aksenal çekme davranışının belirlenmesi için eğilme testlerinden yararlanılmıştır. AFGC 2013 [24]'de önerilen test ve analiz prosedürleri esas alınarak, test kirişleri ile birlikte hazırlanan prizma numunelerinden (100x100x400 mm) 6 adedine dört noktali eğilme testi uygulanmıştır. Kullanılan test düzeneği, prizma numunelerinin kırılma şekilleri ve elde edilen yük-deplasman ilişkileri Şekil 4'de verilmiştir. Prizma yük-deplasman ilişkilerinden UYPLB'nin aksenal çekme davranışına geçiş Bölüm 3'de verilmiştir.

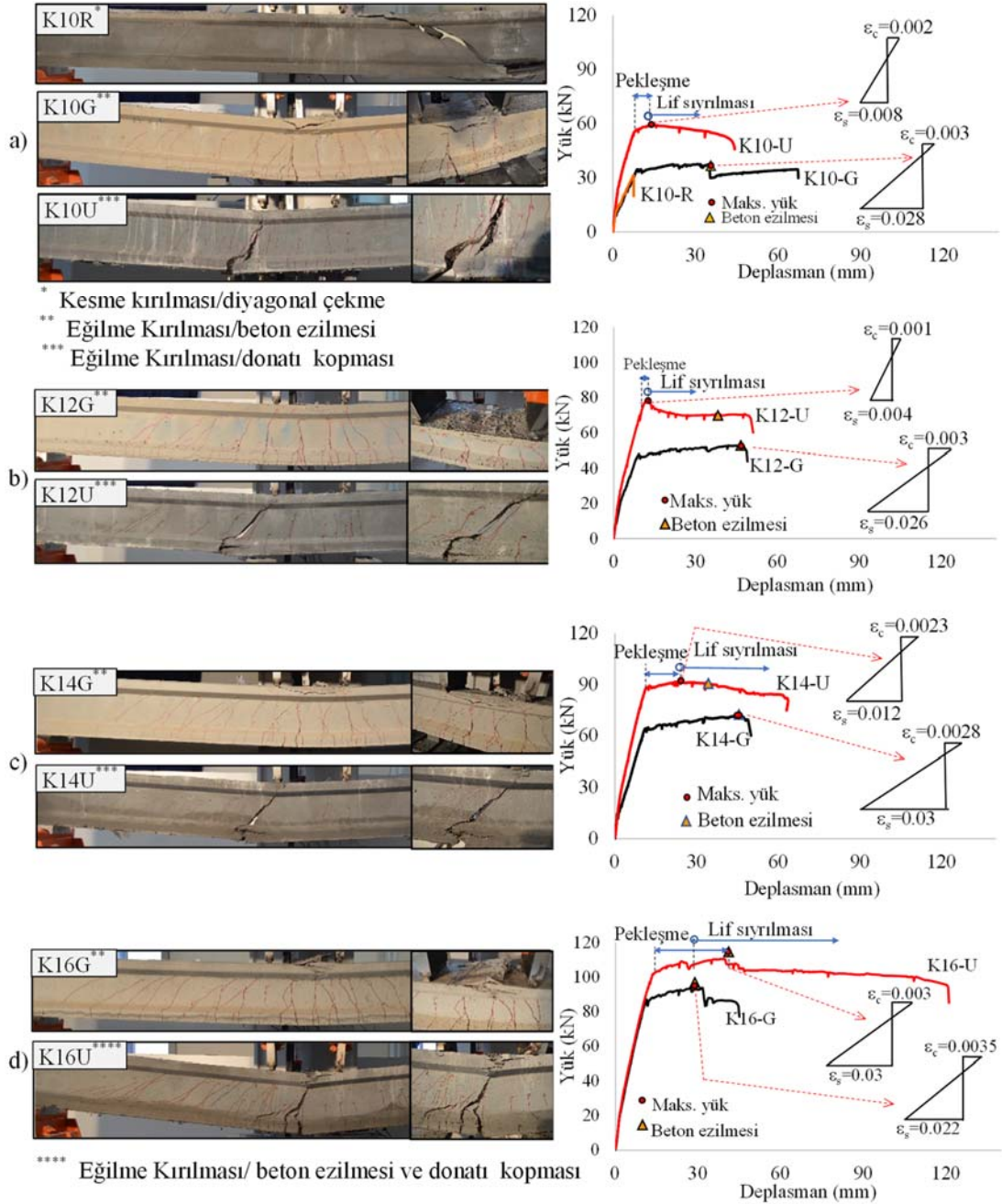
2.4.1. Kirişlerin test sonuçları (Test results of beams)

Testlerde beton ezilmesi, donatı kopması vb. ile önemli dayanım azalması oluşuncaya kadar yüklemeye yapılarak kirişlerin kırılma (göçme) şekilleri belirlenmiştir (Şekil 5). Enine donatısı bulunmayan ve çelik lif içermeyen K10-R referans kirişinde beklediği gibi, asal çekme gerilmelerinin sebep olduğu gevrek kesme kırılması gözlenmiştir (Şekil 5a), diğer tüm kirişlerde sünek eğilme kırılması meydana gelmiştir (Şekil 5a- Şekil 5d). GB'li kirişlerde kırılma (göçme) beton ezilmesi ile oluşurken, UYPLB içeren kirişlerin çoğunda ise kırılma çekme donatısının kopması veya boyun verme bölgesine geçmesi ile meydana gelmiştir. Sadece en yüksek donatı oranına sahip K16-U kirişinde beton ezilmesi ve donatı boyun verme bölgesine geçiş birlikte oluşmuştur (Şekil 5d). Kırılma yüküne ulaşıldığında GB'li kirişlerde çok sayıda benzer genişlikte çatlaklar gözlenirken, UYPLB'li kirişlerde liflerin kılcal çatlakları sınırlaması nedeniyle maksimum yüke ulaşıldıktan sonra

büyük bir lokal çatlak oluşumu gözlenmiştir (Şekil 5). Bu büyük lokal çatlak, donatının kopma uzamasına erken ulaşmasına sebep olarak kırılma davranışını değiştirmiştir. Büyük çatlak lokalleşmesi K10-U, K12-U, K14-U kirişlerinde kesme çatlaklarıyla birleşerek kesmeli-eğilme çatlakları formunda oluşmuş (Şekil 5a- Şekil 5c), K16-U kirişinde ise salt eğilme çatlakları formunda gözlenmiştir (Şekil 5d). Kesmeli-eğilme çatlaklarının lokalleşmesi, maksimum yük sonrasında başladığı için tüm UYPLB'li kirişlerde eğilme kapasitesine ulaşılmıştır. Test kirişlerinden elde edilen *yük-deplasman* ($P-\delta$) ilişkileri incelendiğinde (Şekil 5); GB'li kirişlerde beklediği gibi, donatıdaki akma sonrası rijitlik azalmış ve pekleşme etkisi ile yük taşıma kapasitesi bir miktar arttıktan sonra beton ezilmesi ile kırılma gerçekleşmiştir. UYPLB'li kirişlerin tümünde çekme donatılarının akmasından sonraki aşamada çelik liflerin sebep olduğu bir pekleşme davranışı gözlenmiştir (Şekil 5). Pekleşme davranışı çekme bölgesindeki liflerin sıyrılması ile sonlanmış ve bu noktadan sonra yumuşama (dayanım azalması) oluşmuştur. Ancak dayanım azalmalarına rağmen tüm lifli kirişlerde liffsiz kirişlerin yük taşıma kapasitelerinden daha yüksek değerler elde edilmiştir (Şekil 5). Kiriş testleri sırasında beton için şekildeğiştirme ölçerlerden, donatı için eğrilik ölçer düzeneğinden elde edilen ölçümler kullanılarak kiriş orta bölgesindeki 300 mm'lik kısmın ortalama beton (ϵ_c) ve donatı (ϵ_s) birim şekildeğiştirme değerleri belirlenmiştir. $P-\delta$ davranışında maksimum yüke karşılık gelen beton ve donatı birim şekildeğiştirmeleri Şekil 5'de gösterilmiştir. GB'li kirişlerde eğilme kapasitesine (dayanımına) ulaşıldığında beton birim



Şekil 4. UYPLB Prizma testleri (a) Test düzeneği (b) Yük-deplasman grafikleri (c) Prizma içindeki lif dağılımı (d) Kırılma şekilleri. (UHPFRC prism tests (a) Test setup (b) Load-deflection graphics (c) Fiber distribution (d) Failure patterns)



Şekil 5. Kiriş kırılma şekilleri ve (P-δ) ilişkileri. (Failure modes and (P-δ) relationships of beams)

kısalmaları $\epsilon_c = 0,0028-0,0030$ arasında, donatı birim uzamaları $\epsilon_s = 0,022-0,030$ arasında elde edilmiştir (Şekil 5). UYPLB içeren kirişlerde ise K16-U kirişi dışında $\epsilon_c = 0,0023$ 'ün, $\epsilon_s = 0,012$ 'nin altında kalmıştır (Şekil 5). En yüksek donatılı K16-U kirişinde $\epsilon_c = 0,003$, $\epsilon_s = 0,031$ olarak elde edilmiştir (Şekil 5d).

Bu sonuçlar, K10-U, K12-U ve K14-U kirişlerinde maksimum yük sonrası dayanım azalmalarının beton ezilmesinden değil, lif sıyrılmasından kaynaklandığını göstermektedir. Buna bağlı olarak, özellikle düşük donatılı UYPLB'li kirişlerde eğilme kapasitelerinin belirlenmesi için

geleneksel betonarmedeki şekil değiştirme sınır durumlarının ($\epsilon_c = 0,003$ gibi) kullanılmayacağı anlaşılmaktadır.

2.4.2. İlk çatlama yükleri, yük kapasiteleri ve deplasman süneklikleri (First cracking loads, load capacities and deflection ductilities)

Kirişlerde UYPLB kullanımının ilk çatlama yükü (P_i), yük taşıma kapasitesi (P_{maks}) ve deplasman sünekliği (μ) üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla, GB'li ve UYPLB'li kirişlerin test sonuçları karşılaştırılmıştır. Yük deplasman ($P-\delta$) ilişkisinde başlangıç rijitliğinin gözle

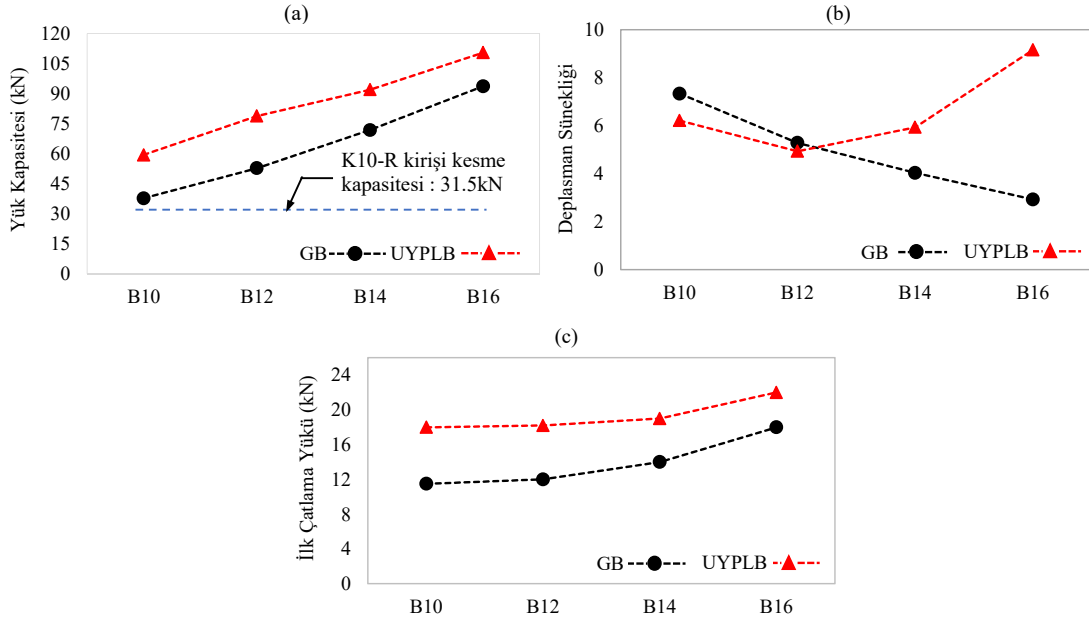
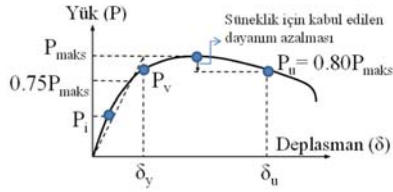
görülebilen şekilde değiştiği nokta ilk çatlama yükü olarak esas alınmıştır. Deplasman sünekliği için öncelikle ($P-\delta$) ilişkileri idealleştirilerek akma yükü (P_y), akma deplasmanı (δ_y), maksimum deplasman (δ_u) ve buna karşılık gelen yük (P_u) elde edilmiştir. Akma deplasmanı Tablo 4’de şematik olarak gösterilen azaltılmış rijitlik yaklaşımı ile belirlenmiştir [36]. Bu yaklaşımda maksimum deplasman (δ_u) için deneysel betonarme kiriş çalışmalarında yaygın olarak kabul edilen %20’lik dayanım azalması esas alınmıştır [37, 38]. Kirişlerin deplasman süneklikleri ve ilgili diğer karakteristik değerler Tablo 4’de verilmiştir.

UYPLB’de bulunan lifler ilk çatlama yüklerini, GB’li kirişlere göre 1,22-1,56 kat arasında arttırmıştır (Şekil 6a). UYPLB ile sağlanan artış, donatı oranı arttıkça kiriş kapasiteleri arttığı için azalım eğilimi göstermiştir. Yük taşıma kapasiteleri de benzer eğilim ile UYPLB kirişlerde 1,18-1,58 kat artmıştır.

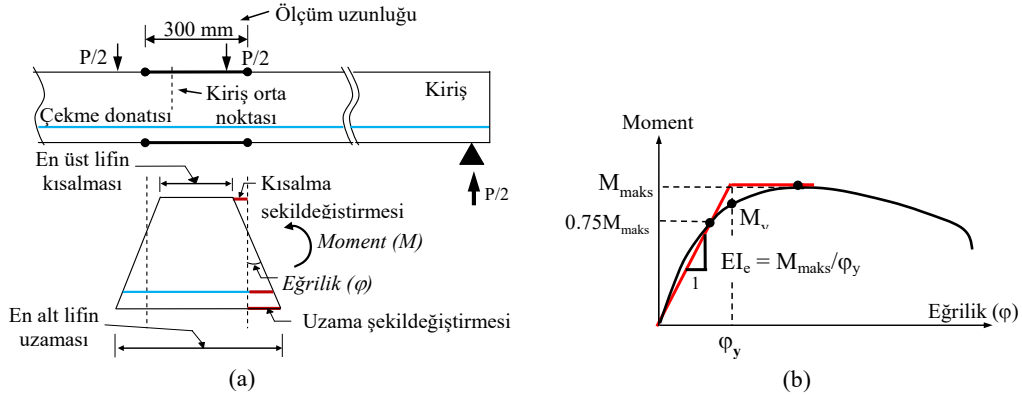
Etriyesiz ve lifsiz K10-R kirişinde 31,5 kN’luk yükte kesme kırılması gerçekleşirken, etriyesiz UYPLB’li kirişlerin tümünde çelik lifler sayesinde kesme kırılması engellenebilmiştir. K16-U kirişinin taşıma kapasitesinin 110,5 kN olduğu gözönünde bulundurulduğunda, % 1,0 oranında lif kullanımının kiriş kesme kapasitesinde lifsiz ve etriyesiz duruma göre 3,5 kattan daha fazla artış sağladığı söylenebilmektedir (Şekil 6b). GB’li kirişlerde beklenildiği gibi, donatı artışına bağlı olarak süneklik azalma eğilimi gösterirken, UYPLB’li kirişlerde yüksek donatı oranlarında süneklik artışı gözlenmiştir. Düşük donatı oranlı K10 ve K12 kirişlerinde UYPLB kullanımı süneklikleri bir miktar azaltmış, K14 ve K15 kirişlerinde ise UYPLB kullanımı sünekliği sırasıyla 1,47 ve 3,13 kat arttırmıştır. Düşük donatı oranlarında liflerin sebep olduğu çatlak lokalleşmesi nedeniyle donatı lokal bir bölgede büyük uzama şekil değiştirmesine maruz kalarak kopmuştur. Bu durum kirişin sünekliğini azaltmıştır. Donatı oranı arttıkça çekme

Tablo 4. ($P-\delta$) ilişkisine ait karakteristik değerler ve deplasman süneklikleri
(Characteristics of ($P-\delta$) relationship and deflection ductilities)

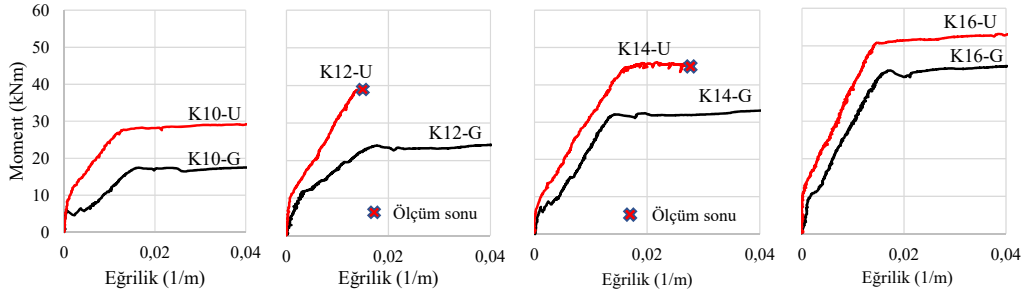
Yük-deplasman ilişkisi karakteristikleri	Kiriş kodu	P_i (kN)	δ_y (mm)	P_{maks} (kN)	δ_u (mm)	P_u (kN)	$\mu=\delta_u/\delta_y$
	K10-R	11,6	-	31,5	-	-	-
	K10-G	11,5	9,18	37,68	67,29	37,68	7,33
	K12-G	12,0	9,21	52,70	48,61	52,70	5,28
	K14-G	14,0	11,91	71,80	48,02	71,80	4,03
	K16-G	18,0	11,13	93,71	32,46	93,71	2,92
	K10-U	18,0	7,08	59,38	43,97	47,48	6,21
	K12-U	18,2	10,15	78,79	50,13	68,10	4,94
	K14-U	19,0	10,70	91,96	63,46	78,19	5,93
	K16-U	22,0	13,14	110,51	120,25	88,39	9,15



Şekil 6. (a) İlk çatlama yüklerinin (b) Taşıma kapasitelerinin (c) Deplasman sünekliklerinin karşılaştırılması
(Comparison of (a) First cracking loads (b) Load capacities (c) Deflection ductilities)



Şekil 7. (a) Kiriş eğriliğinin belirlenmesi (b) Efektif eğilme rijitliğinin belirlenmesi
(a) Determination of beam curvature (b) Determination of effective flexural stiffness)



Şekil 8. Kirişlerin deneysel ($M-\phi$) ilişkileri (Experimental ($M-\phi$) relationships of beams)

gerilmelerinin sebep olduğu lokalleşme azalmakta, betondaki basınç gerilmelerinin etkinliği artmaktadır. Bu durumda UYPLB'nin basınç altındaki yüksek dayanım ve şekil değiştirme kapasitesi etkili olarak kiriş sünekliğini arttırmıştır.

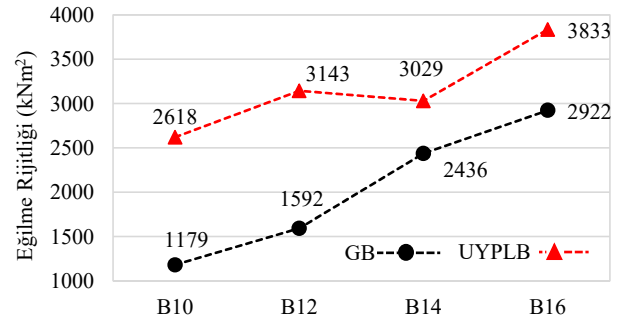
2.4.3. Moment-Eğrilik ilişkileri ve eğilme rijitlikleri (Moment-Curvature relationships and flexural stiffness)

Kirişlerin orta bölgesinde basınç ve çekme bölgelerinde alınan yer değiştirme ölçümleri kullanılarak, Şekil 7'de gösterildiği gibi 300 mm'lik bölgenin ortalama eğrilikleri (birim dönme) hesaplanmış ve moment (M)-eğrilik (ϕ) ilişkileri belirlenmiştir (Şekil 7,8). K12-U ve K14-U kirişlerinde, oluşan büyük lokal çatlağın ölçüm düzeneğinin dışına çıkması sebebiyle belirli bir aşamadan sonra ölçüm alınamamıştır (Şekil 8). Kirişlere ait deneysel ($M-\phi$) ilişkileri ($P-\delta$) ilişkisinde olduğu gibi idealleştirilmiş ve maksimum momentin (M_{maks}) / akma eğrilğine (ϕ_y) oranı etkin eğilme rijitliği (EI_c) olarak esas alınmıştır (Şekil 7b). UYPLB ve GB'li kirişler için elde edilen etkin eğilme rijitlikleri Şekil 9'da karşılaştırılmıştır. UYPLB kullanımı ile rijitliklerde GB'li kirişlere göre 1,24-2,22 kat artış gerçekleşmiştir. Düşük donatı oranlarında sağlanan rijitlik artışı belirgin şekilde daha yüksek olmuştur.

2.4.4. Çatlak dağılımları (Cracking patterns)

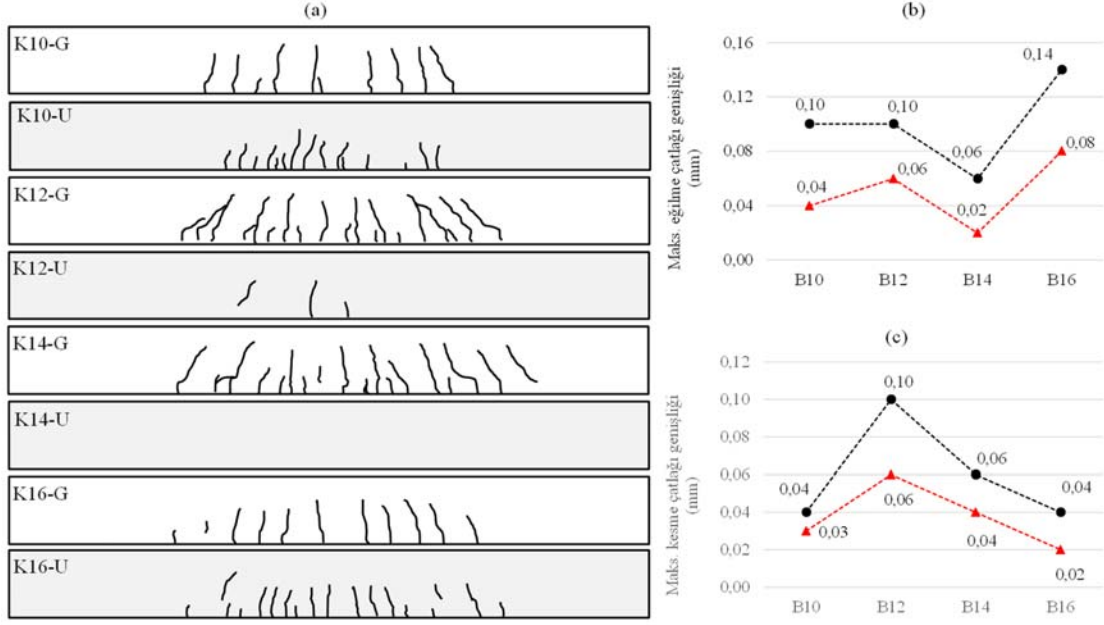
L kiriş açıklığı olmak üzere, tüm kirişlerde elastik davranış bölgesine karşılık gelen $L/500$ 'lük deplasmanda ($\delta=4,6mm$)

ve önemli şekil değiştirmelerin olduğu plastik bölgeye karşılık gelen $L/100$ 'lük deplasmanda ($\delta=23mm$), gözlenebilen eğilme ve kesme çatlakları işaretlenmiş ve genişlikleri belirlenmiştir. UYPLB'li ve GB'li kirişlerin çatlak dağılımları ve kiriş üzerinde ölçülen maksimum çatlak genişlikleri Şekil 10 ve Şekil 11'de karşılaştırılmıştır.

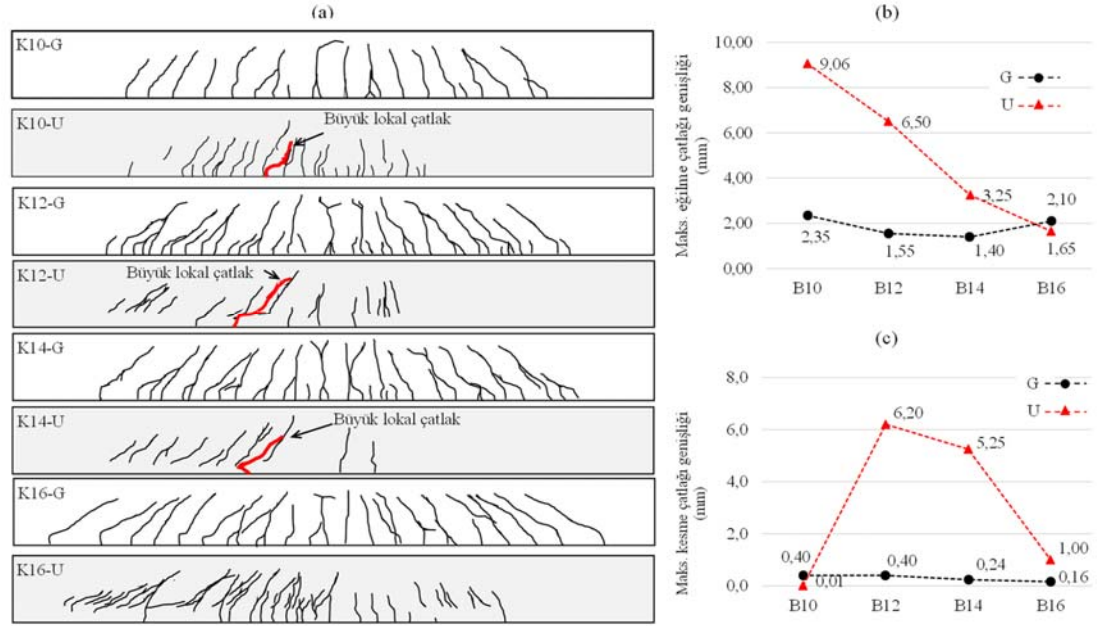


Şekil 9. Etkin eğilme rijitliklerinin karşılaştırılması
(Comparison of effective flexural stiffness)

Elastik bölgede ($L/500$ 'lük deplasmanda), UYPLB kullanımı beklendiği gibi kirişlerdeki çatlak davranışını olumlu yönde etkilemiştir. Bu deplasman değerinde UYPLB'li kirişler, rijitlikleri nedeniyle daha büyük yüke maruz kalmalarına rağmen, çatlak sayılarında ve genişliklerinde GB'li kirişlere göre önemli ölçüde azalmalar gözlenmiştir. K12-U ve K14-U kirişlerinde hemen hemen gözle görülebilir çatlak oluşmamıştır. UYPLB'li kirişlerde



Şekil 10. L/500'lük deplasman için (a) Çatlak dağılımları (b) Maksimum eğilme çatlak genişlikleri (c) Maksimum kesme çatlak genişlikleri (For the deflection of L/500 (a) Cracking patterns (b) Maximum flexural crack widths (c) Maximum shear crack widths)



Şekil 11. L/100'lük deplasman için (a) Çatlak dağılımları (b) Maksimum eğilme çatlak genişlikleri (c) Maksimum kesme çatlak genişlikleri (For the deflection of L/100 (a) Cracking patterns (b) Maximum flexural crack widths (c) Maximum shear crack widths)

maksimum eğilme çatlak genişlikleri ortalama 2,22 kat, maksimum kesme çatlak genişlikleri 1,62 kat azalmıştır (Şekil 10). UYPLB kirişlerde enine donatı bulunmamasına rağmen çelik lifler sayesinde asal çekme çatlakları etriyeli GB'li kirişlere göre daha iyi sınırlandırılmıştır. Plastik bölgede (L/100'lük deplasmanda), UYPLB kirişlerde liflerin sıyrılmaya başlaması ve büyük bir lokal çatlak oluşması nedeniyle çatlak genişlikleri büyük artış göstermiştir (Şekil 11). GB'li kirişlerde ise çok sayıda benzer genişlikte çatlak

oluşturduğundan çatlak genişlikleri çok daha düşük boyutta kalmıştır. Donatı oranı arttıkça bu deplasman değerindeki çatlak lokalleşmesi etkisi azalmış ve K16-U kirişinde çatlak genişlikleri GB'li kirişteki mertebeye inmiştir. Eğilme çatlak genişliklerindeki artış 2,32-4,19 kat arasında değişmiştir. Eğilme çatlakındaki lokalleşmenin kesme çatlak ile birleştiği K12-U ve K14-U kirişlerinde ise çatlak genişlikleri enine donatılı GB'li kirişlere göre 15,5-21,8 kat büyük elde edilmiştir.

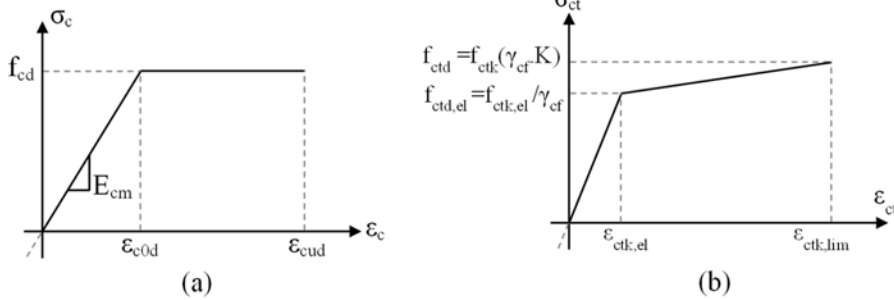
3. SAYISAL İNCELEME (NUMERICAL INVESTIGATION)

Çalışmada, UYPLB kirişlerin eğilme dayanımlarının sayısal hesabı için lif içeriği (malzemesi, tipi ve miktarı) bakımından diğer standart ve kılavuzlara göre çok daha geniş kapsamlı UYPLB uygulamalarına olanak veren AFGC 2013 [24] kılavuzu kullanılmıştır. AFGC (2013) UYPLB kılavuzu, Fransa İnşaat Müh. Topluluğu (AFGC) tarafından Eurocode-2 (EN 1992-1-1) [39] ile uyumlu olarak hazırlanmış daha sonra Fransa ulusal UYPLB standardı [25] olarak Eurocode-2'ye eklenmiştir. AFGC 2013 [24]'de UYPLB için malzeme ölçüğünde numuneler üzerinde yapılan testlere dayanan idealleştirilmiş basınç ve çekme hesap modelleri kullanılmaktadır. Basınç hesap modeli Şekil 12a'da gösterilmiştir. Çekme hesap modeli ise UYPLB'nin lif içeriğine ve iç yapı matrisine bağlı olarak çekme testi sonucuna göre belirlenmektedir. Çekme altındaki davranış, ilk çatlama sonrası yumuşama (dayanım azalması), düşük düzeyde pekleşme ve yüksek pekleşme davranışı olarak üç kategoriye ayrılarak hesap modelleri oluşturulmaktadır. Yapılan testler sonucunda, bu çalışmada üretilen UYPLB'nin yüksek pekleşme özelliği gösterdiği belirlenmiş ve AFGC'de buna karşılık gelen Şekil 12b'deki model kullanılmıştır. Şekil 12'deki modellerde, f_{cd} beton tasarım basınç dayanımını, ε_{cd} beton birim kısalması elastik sınır değerini, ε_{cud} beton birim kısalması sınır değerini, E_{cm} ortalama elastisite modülünü, $f_{ctd,el}$ tasarım beton elastik çekme dayanımını, f_{ctd} tasarım beton çekme dayanımını, $f_{ctk,el}$ karakteristik beton elastik çekme dayanımını, f_{ctk} beton karakteristik çekme dayanımını, $\varepsilon_{ctk,el}$ beton karakteristik birim uzaması elastik sınır değerini, $\varepsilon_{ctk,lim}$ karakteristik beton birim uzaması sınır değerini, K lif yönelme katsayısını göstermektedir. γ_{cf} UYPLB'nin eksenel çekme altındaki güvenlik katsayısını göstermektedir ve kalıcı etkiye maruz yüklemde 1,3, geçici etkiye maruz yüklemde 1,05 alınmaktadır [24]. f_{cd} , ε_{cd} ve ε_{cud} sırasıyla Eş. 1, Eş. 2 ve Eş. 3 ile belirlenmektedir.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c \quad (1)$$

$$\varepsilon_{cd} = f_{cd} / E_{cm} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{cud} = [1 + 14(f_{ctm} / f_{cm})] \varepsilon_{cd} \quad (3)$$



Şekil 12. UYPLB için AFGC 2013 [24]'de önerilen (a) basınç (b) çekme tasarım modeli (UHPFRC design models proposed in AFGC 2013 [24] for (a) compressive (b) tensile)

Burada; α_{cc} sünme, büzülme vb. etkileri dikkate alan katsayısı (0.85 olarak önerilmektedir), f_{ck} beton karakteristik basınç dayanımını, f_{ctm} beton ortalama çekme dayanımını, γ_c UYPLB'nin EN 1992-1.1 [39]'e göre belirlenen güvenlik katsayısını göstermektedir. Bu katsayı kalıcı ve geçici etkiler durumunda sırasıyla 1,5 ve 1.2 alınmaktadır. f_{ck} Eş. 4 ile belirlenmektedir [24].

$$f_{ck} = f_{cm} - \alpha_k \cdot s_s \quad (4)$$

Burada; f_{cm} beton ortalama basınç dayanımını, α_k testi yapılan numune sayısına göre belirlenen dayanım azaltma katsayısını, s_s numune dayanımlarına ait standart sapma değerini ifade etmektedir [24]. E_{cm} basınç dayanımı için yapılan testlerle belirlenebileceği gibi çekme testlerine ait gerilme-birim uzama ilişkisinden de elde edilebilmektedir [24]. Üretilen UYPLB elemanlardaki lif yönelmesinin çekme dayanımı üzerindeki etkisini ifade eden K katsayısı lokal ve genel olmak üzere iki farklı şekilde uygulanmaktadır. Bu katsayılar, tasarımı gerçekleştirilen elemanın belirli bölgelerinde kesimler yapılarak elde edilen numune (prizma veya çekme numunesi) testleri ile belirlenmektedir [24]. Ancak bu çalışmada, betonarme elemanları kesmek için gerekli laboratuvar olanakları bulunmadığı için K katsayısı (genel) 1,25 olarak kabul edilmiştir [24].

Çalışmada, AFGC'de önerilen tasarım modeli sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak, UYPLB kirişlerde AFGC'nin tasarım için kullanılabilirliği (öngörülen güvenlik düzeyi vb.) değerlendirilmiştir. Ayrıca, tüm mekanik özellikler için ortalama dayanımların kullanıldığı ve güvenlik katsayılarının göz önüne alınmadığı ikinci bir hesap modeli oluşturulmuştur. Bu model sonuçları da deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak farklı donatı oranları içeren UYPLB kirişler için AFGC temel ilkelerinin (taşıma gücü limit durumları, birim şekildeğiştirme sınırları vb.), geçerliliği değerlendirilmiştir.

Bölüm 2'de verilen beton basınç test sonuçları kullanılarak UYPLB için basınç hesap modellerine ait karakteristik değerler belirlenmiş ve Tablo 5'de verilmiştir. Basınç modeline ait elastisite modülü değeri E_{cm} çekme davranışından elde edilmiştir [24, 40].

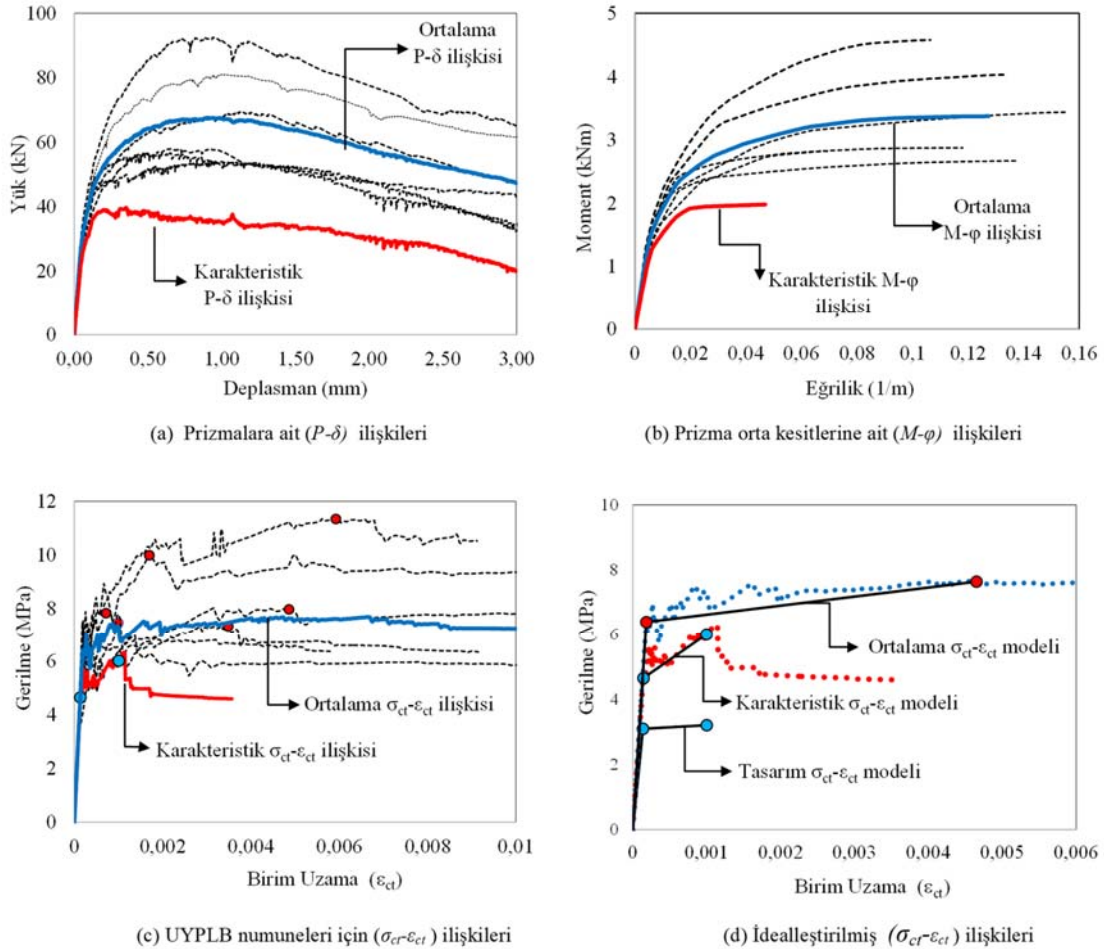
Ortalama basınç modeli olarak literatürdeki aksel basınç testleri ile uyumlu tek doğru parçalı lineer model esas alınmıştır [22, 30]. Buna göre birim kısalma limit değeri ϵ_{cum} , ortalama dayanımın ortalama elastisite modülüne oranı olarak alınmıştır (Tablo 5). AFGC 2013 [24]'e göre çekme modelindeki parametrelerin belirlenmesi için direkt aksel çekme testleri yapılabileceği gibi, prizma eğilme testlerinden dolayı olarak elde edilen sonuçlar da kullanılabilir. Aksel çekme testlerinin uygulanması ve değerlendirilmesinde karşılaşılan zorluklar nedeniyle AFGC'de eğilme testlerinden elde edilen çekme modellerinin kullanılması önerilmektedir [24]. Buna göre çekme/eğilme altında yüksek pekleşme özelliği gösteren UYPLB için öncelikle prizma numuneler üzerinde dört noktalı eğilme testleri yapılması ve testlerden *yük-deplasman* veya *yük-beton birim uzaması* ilişkilerinin elde edilmesi öngörülmektedir. Daha sonra elde edilen verilere (deplasman, beton birim uzaması) bağlı olarak bir veya iki

kez, geri analiz olarak isimlendirilen prosedürler uygulanarak beton için *eksel çekme gerilmesi-birim uzama* ilişkisine geçilmektedir [24, 35]. Bunun için çalışmada, 6 adet prizma numunesi için elde edilen *yük-deplasman* ($P-\delta$) ilişkileri kullanılmıştır (Şekil 4). Bu ilişkilerde her bir deplasmana karşılık gelen yük değerleri için, ortalama alınarak ortalama ($P-\delta$) ilişkisi ve (3.4) bağıntısı kullanılarak da karakteristik ($P-\delta$) ilişkisi elde edilmiştir (Şekil 13a).

Prizmalarda açıklık ortası için elde edilen ($P-\delta$) ilişkileri, elemanın deplasman-dönme-eğrilik fonksiyonları arasındaki diferansiyel bağıntıların kullanıldığı iteratif bir geri analiz ile açıklık ortası kesitine ait ($M-\phi$) ilişkilerine dönüştürülmüştür (Şekil 13b). Daha sonra en kesitteki gerilme ve şekil değiştirme durumları ile denge denklemlerinin kullanıldığı iteratif bir geri analiz ile her bir prizmanın üretildiği UYPLB için *eksel gerilme birim uzama* ($\sigma_{ct}-\epsilon_{ct}$) ilişkileri elde edilmiştir. Her bir geri analiz prosedürü için

Tablo 5. UYPLB basınç modeli parametreleri (Compressive model parameters of UHPFRC)

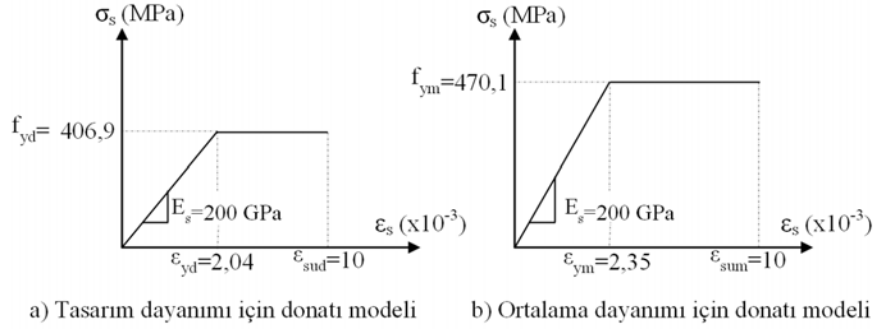
f_{ck} (MPa)	E_{cm} (MPa)	Tasarım Basınç Modeli için			Ortalama Basınç Modeli için	
		ϵ_{c0d}	ϵ_{cud}	f_{cd} (MPa)	ϵ_{cum}	f_{cm} (MPa)
143,3	34614	0,00235	1,00389	81,2	0,00471	163,1



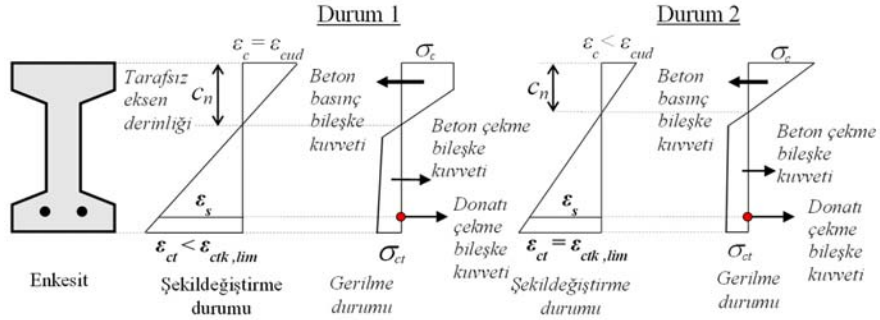
Şekil 13. UYPLB prizma numunelerinin ($P-\delta$), ($M-\phi$), ($\sigma_{ct}-\epsilon_{ct}$) ilişkileri
 ($P-\delta$), ($M-\phi$), ($\sigma_{ct}-\epsilon_{ct}$) relationships of UHPFRC prism specimens)

özel olarak hazırlanan Visual Basic tabanlı Excel arayüzlü bir yazılım kullanılmıştır. Uygulanan geri analiz prosedürlerinin esasları ve yazılım algoritmaları hakkında detaylı bilgi Gültekin [40]'de bulunmaktadır. AFGC'ye göre karakteristik ve ortalama ($\sigma_{ct}-\epsilon_{ct}$) ilişkileri, ($P-\delta$) ilişkilerinden geri analizler ile elde edilmiş, buna karşılık karakteristik ($\sigma_{ct}-\epsilon_{ct}$) ilişkisinin maksimum uzama değeri $\epsilon_{ct,lim}$, her bir numunenin maksimum gerilmelerine karşılık gelen uzama değerlerine bağlı olarak belirlenmiştir (Şekil 13c) [24, 40]. Karakteristik ($\sigma_{ct}-\epsilon_{ct}$) ilişkisi iki doğru parçası ile idealleştirilmiş ve ilgili katsayılar uygulanarak çekme için tasarım modeli elde edilmiştir (Şekil 13d). AFGC 2013 [24]'de donatı hesap modeli için geleneksel betonarmedeki ideal-elasto-plastik davranış esas alınmaktadır. Buna göre belirlenen donatı hesap modelleri Şekil 14'de gösterilmiştir. Donatı için de beton gibi tasarım dayanımları ve ortalama dayanımların kullanıldığı iki model oluşturulmuştur. Ortalama model, elastisite modülü sabit tutulup, Bölüm 2'de

verilen donatı ortalama dayanımı esas alınarak belirlenmiştir (Şekil 14). Yüksek pekleşme özelliğine sahip UYPLB içeren betonarme kirişlerde, geleneksel betonarmeden farklı olarak, çekme bölgesindeki donatı yerine en alt çekme lifindeki beton birim uzaması taşıma kapasitesinde belirleyici olabilmektedir. Betonun şekildeğiştirme kapasitesi genel olarak donatınınkinden çok düşük olduğundan öncelikle beton çekmede veya basınçta sınıra ulaşmaktadır. Bu nedenle UYPLB'li kirişlerde taşıma gücü limit durumu olarak, basınç bölgesindeki betonun sınır birim kısalmasına ulaşması ($\epsilon_c = \epsilon_{cud}$) veya çekme bölgesindeki betonun sınır birim uzamasına ulaşması ($\epsilon_{ct} = \epsilon_{ctk,lim}$) durumunun esas alınması gerekmektedir (Şekil 15). UYPLB'li kirişler için yukarıda tanımlanan limit durumlara göre moment taşıma kapasiteleri ve ilgili parametreler belirlenerek Tablo 6'da verilmiştir. Sayısal olarak elde edilen moment kapasiteleri ve buna karşılık gelen birim şekildeğiştirme değerleri, Şekil 16 ve Şekil 17'de deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. AFGC prosedüründe, ortalama dayanımların esas alındığı beton ve



Şekil 14. Çekme donatısı için hesap modelleri (Calculation models for tensile reinforcement)

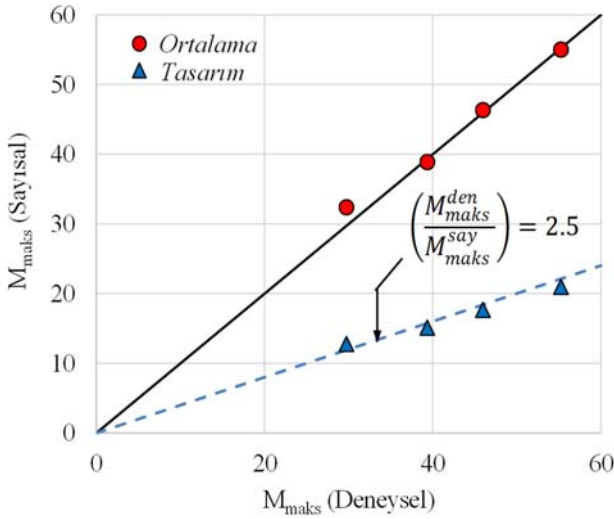


Şekil 15. UYPLB'li kiriş için taşıma gücü limit durumları (Capacity limit states for UHPFRC beams)

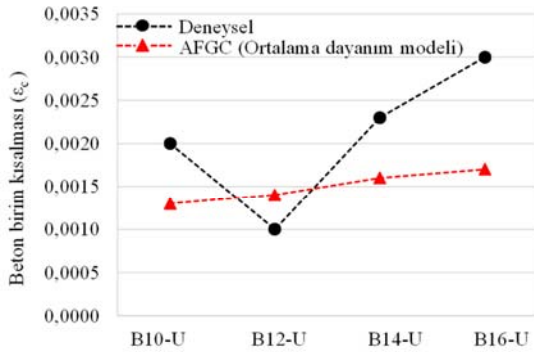
Tablo 6. UYPLB kirişlerin sayısal hesap sonuçları (Numerical calculation results of UHPFRC beams)

Hesap Modeli	Kiriş Kodu	c_n (mm)	ϵ_c	ϵ_s	ϵ_{ct}	M_{maks} (kNm)	$\frac{M_{maks}^{den}}{M_{maks}^{say}}$	$\left(\frac{M_{maks}^{den}}{M_{maks}^{say}}\right)_{ort}$
Tasarım	K10-U	72,50	0,0004	0,0009	0,001	12,76	2,33	2,55
	K12-U	77,50	0,0004	0,0009	0,001	15,08	2,61	
	K14-U	82,50	0,0005	0,0009	0,001	17,67	2,60	
	K16-U	90,00	0,0006	0,0008	0,001	20,94	2,64	
Ortalama	K10-U	53,75	0,0013	0,0041	0,0047	32,38	0,92	0,98
	K12-U	58,00	0,0014	0,004	0,0047	38,88	1,01	
	K14-U	62,50	0,0016	0,004	0,0047	46,33	0,99	
	K16-U	67,50	0,0017	0,004	0,0047	55,01	1,00	

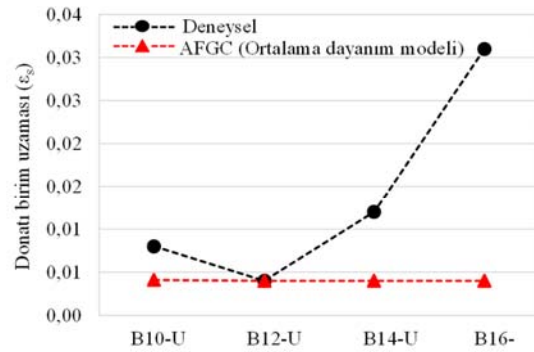
donatı modelleri kullanılması durumunda; kiriş eğilme kapasiteleri için deneysel sonuçlarla ortalama %2'lik fark elde edilmiştir (Tablo 6). Bu sonuç, incelenen kirişler kapsamında AFGC'de önerilen prosedürün UYPLB'li kiriş eğilme kapasitelerinin belirlenmesi için uygun olduğunu göstermiştir. Malzeme katsayılarının esas alındığı tasarım modelinde ise deneysel kapasitelere göre ortalama 2,55 kat güvenlik sağlandığı belirlenmiştir. Geleneksel betonarmeye göre oldukça yüksek olan bu güvenlik düzeyinin, UYPLB'nin çekme davranışında gözlenen büyük değişkenliğin (sapmaların) sebep olduğu söylenebilmektedir. Prizma numunelerden elde edilen ($P-\delta$) ve ($\sigma_{cr}-\epsilon_{cr}$) ilişkilerinden görüleceği gibi, aynı karışım oranlarına sahip UYPLB'nin çekme dayanımı ve uzama kapasitesi çok büyük değişkenlik gösterebilmektedir. AFGC prosedüründe yer alan istatistiksel değerlendirme yaklaşımı da bu sapmaları gözönüne aldığından, ortalama çekme davranışına göre çok daha düşük kapasitelerle tasarım yapılmasını öngörmektedir.



Şekil 16. Deneysel ve sayısal moment kapasitelerinin karşılaştırılması
(Comparison of the experimental and numerical moment capacities)



(b) Beton birim kısalmaları



(a) Donatı birim uzamaları

Şekil 17. Sayısal ve deneysel birim şekil değiştirmelerin karşılaştırılması.
(Comparison of the numerical and experimental strain values)

Sayısal hesap sonuçlarına göre; tüm kirişlerde taşıma gücü limit durumu betonun çekme birim uzama sınırına ulaşması ile oluşmuştur (Şekil 15, Durum 2). Bu aşamada beton birim kısalma değerleri 0,0017'yi ve donatı birim uzama değerleri 0,0041'i aşmamıştır. K12-U kirişi dışında, deneysel birim şekil değiştirmeler genel olarak sayısal sonuçlara göre daha yüksek elde edilmiştir. En yüksek donatılı K16-U dışındaki kirişlerde, basınçta beton ezilme değerine ulaşılmamış ve donatıda büyük ölçüde akma sahanlığında kalınmış olması nedeniyle sayısal sonuçların, deneysel birim şekil değiştirme ölçümleri ve hasar gözlemleri ile genel olarak uyumlu olduğu söylenebilmektedir. K16-U kirişinde ise AFGC prosedüründen elde edilen birim şekil değiştirmelerin deneysel sonuçlara göre çok düşük kaldığı görülmektedir. Bunun nedeni Şekil 5'deki ($P-\delta$) ilişkisinden görüleceği gibi; deneysel maksimum moment değerinin AFGC'de öngörülen limit durumun ($\epsilon_{ct} = \epsilon_{ctk,lim}$) ilerisindeki bir noktaya karşılık gelmesidir. Bu kirişte donatı oranı yüksek olduğu için çekme bölgesindeki liflerin kapasiteye etkisi düşük kalmış, bu nedenle lif sıyrılmaları önemli bir azalmaya sebep olmadan donatı pekleşmenin katkısıyla limit durum ($\epsilon_{ct} = \epsilon_{ctk,lim}$) sonrası kapasite artışı devam etmiştir. Bu kapasite artışı basınç betonu ezilmesi ile son bulmuştur. Bu durum eğilme kapasitelerinde önemli bir farka yol açmamakla birlikte birim şekil değiştirmelerde büyük uyumsuzluğa sebep olmuştur. Bu nedenle yüksek donatı oranına sahip kirişlerde AFGC prosedürü ile daha sağlıklı sonuçlar elde edebilmek için taşıma gücü limit durumlarının ve buna bağlı olarak beton çekme modelinin incelenmesi gerektiği söylenebilmektedir.

4. SİMGELER (SYMBOLS)

- a_k : Testi yapılan numune sayısına göre belirlenen dayanım azaltma katsayısı
- c_n : Tarafsız eksen derinliği
- E_{cm} : Beton ortalama elastisite modülü
- E_s : Donatı elastisite modülü
- K : Lif yönelme katsayısı
- L : Kiriş net açıklığı
- M : Eğilme momenti

P	: Yük
f_{cd}	: Beton tasarım basınç dayanımı
f_{ck}	: Beton karakteristik basınç dayanımı
f_{cm}	: Beton ortalama basınç dayanımı
f_{ctd}	: Beton tasarım çekme dayanımı
f_{ctk}	: Beton karakteristik çekme dayanımı
f_{ctm}	: Beton ortalama çekme dayanımı
$f_{ctd,el}$: Beton tasarım elastik çekme dayanımını
$f_{ctk,el}$: Beton karakteristik elastik çekme dayanımını
f_{yd}	: Donatı tasarım çekme dayanımı
f_{ym}	: Donatı ortalama çekme dayanımı
S_s	: Numune dayanımlarına (basınç veya çekme) ait standart sapma değeri
ϵ_c	: Beton birim kısalması
ϵ_{c0d}	: Beton birim kısalması elastik sınır değeri
ϵ_{cud}	: Beton birim kısalması sınır değeri
ϵ_{ct}	: Beton birim uzaması
$\epsilon_{ctk,el}$: Beton karakteristik birim uzaması elastik sınır değeri
$\epsilon_{ctk,lim}$: Beton birim uzaması sınır değeri
ϵ_s	: Donatı birim uzaması
ϵ_{yd}	: Tasarım dayanımı için donatı akma birim uzaması
ϵ_{ym}	: Ortalama dayanım için donatı akma birim uzaması
ϵ_{su}	: Tasarım dayanımı için donatı birim uzama sınır değeri
ϵ_{um}	: Ortalama dayanım için donatı birim uzama sınır değeri
δ	: Düşey deplasman (sehim)
φ	: Eğrilik (birim dönme)
γ_c	: Betonun basınç altında malzeme güvenlik katsayısı
γ_{cf}	: Betonun çekme altında malzeme güvenlik katsayısı
σ_s	: Donatı çekme gerilmesi
σ_{ct}	: Beton çekme gerilmesi

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çalışmada, prefabrikasyon sektöründe yaygın kullanım alanı bulan I-enkesitli betonarme kirişlerde UYPLB kullanımının eğilme/kesme davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiş ve deneysel verilere dayanarak UYPLB kirişlerin tasarımına yönelik AFGC 2013 [24] sayısal prosedürünün kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan incelemelerden aşağıdaki bulgulara ulaşılmıştır.

- Kirişlerde UYPLB kullanımı, lifli betonun çekme kapasitesi, çekme bölgesindeki liflerin sıyrılması ve büyük çatlak lokalleşmesi etkileri nedeniyle geleneksel betonarmeye göre eğilme davranışını önemli ölçüde değiştirmektedir. GB'li kirişlerden farklı olarak; UYPLB'li kirişlerde akma sonrası pekleşme çok azalmakta, süneklik büyük ölçüde lif sıyrılmalarının sebep olduğu yumuşama davranışı ile sağlanmaktadır. Kirişteki çekme donatısı oranı arttıkça davranış geleneksel betonarmeye benzemektedir.

- UYPLB kullanımı maksimum yük öncesi elastik davranış bölgesinde oluşan çatlak sayıları ve genişliklerinde önemli azalmalar sağlamış, buna karşılık ileri plastikleşmelerin olduğu bölgede büyük bir lokal çatlak oluşumu ile çatlak genişliklerini önemli ölçüde arttırmıştır. Bu lokal çatlaklar kiriş kırılma davranışını beton ezilmesinden donatı kopmasına dönüştürecek mertebeğe ulaşabilmektedir. Çekme donatısı oranı arttıkça bu local çatlak etkisi azalmaktadır. Geleneksel betonarmeden çok farklı olan bu olumsuz çatlak etkisinin ve süneklikteki yumuşama davranışının tasarım hesaplarında gözönüne alınması gerekmektedir.
- UYPLB kullanımı kirişlerin ilk çatlama yüklerinde ve yük taşıma kapasitelerinde yaklaşık %20-57 oranında, eğilme rijitliklerinde ise 1,22-2,22 kat artış sağlamıştır. UYPLB düşük donatı oranlarında kiriş sünekliklerinde azalmaya sebep olurken, yüksek donatı oranlarında 3.13 kata kadar artış sağlamıştır. Basınç donatısız olarak elde edilen bu süneklikler, UYPLB'nin özellikle yüksek donatı oranlarında basınç donatısı yerine kullanılabilirliğini de göstermiştir. Ayrıca, düşük donatı oranlarında da basınç donatısı ile birlikte daha yüksek sünekliklerin elde edilebileceği öngörülmektedir.
- İncelenen tüm donatı oranları için, %1,0 lifli UYPLB kullanımı kirişlerin kesme kapasitesini arttırarak kesme kırılmasını önlemiş ve kesme çatlaklarını sınırlandırabilmiştir. Bu sonuç UYPLB'nin enine donatı yerine kullanılabilirliğini veya enine donatının büyük ölçüde azaltılabileceğini göstermiştir. Böylelikle I-enkesitli kirişlerde gövde etriyeleri ile ilgili imalat problemlerinin de UYPLB kullanımı ile giderilmesinin mümkün olabilecektir. Bununla birlikte, UYPLB'nin enine donatı yerine kullanılabilirliği konusunda genel bulgulara ulaşabilmek için farklı kesme kırılmalarının (asal basınç kırılması vb.) da incelenmesi gerekmektedir.
- UYPLB içeren elemanların tasarımı için hazırlanan AFGC 2013 [24] kılavuzundaki sayısal prosedür ile kiriş eğilme kapasiteleri yeterli yaklaşıklıkla belirlenebilmiştir. Ancak, çalışmada üretilen UYPLB'nin çekme davranışının çok büyük değişkenlik göstermesi, AFGC tasarımında güvenlik katsayısının beklenenden büyük çıkmasına sebep olmuştur. Bu durum tasarımda UYPLB'nin çekme kapasitesinin etkin olarak kullanılmasını engellemiştir. Bu bağlamda daha standart mekanik özelliklere sahip UYPLB üretiminin sağlanması gerekmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) 116M517 numaralı projesi ile desteklenmiştir. Yazarlar TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Naaman A. E., Wille K., The Path to Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHP-FRC): Five decades of progress, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for Construction Materials, Kassel-Germany, 3-15, March 7-9, 2012.

2. Naaman, A. E., High Performance Fiber Reinforced Cement Composites Classification and Applications, CBM-C1 International Workshop, 389-400, Karachi-Pakistan, December 10-11, 2007.
3. Benson S. D. P., Karihaloo B. L., CARDIFRC®-Development and mechanical properties. Part III: uniaxial tensile response and other mechanical properties, Mag. of Conc. Res., 57 (8), 433-443, 2005.
4. S. Pyo, S. El-Tawil, A. E. Naaman, Direct tensile behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) at high strain rates, Cem. and Conc. Res., 88, 144-156, 2016.
5. Yoo D. Y., Banthia N., Yoon Y. S., Flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars, Eng. Struct., 111, 246-262, 2016.
6. Hasgul U., Turker K., Birol T., Yavas A., Flexural behavior of ultra-high-performance fiber reinforced concrete beams with low and high reinforcement ratios, Struct. Concr., 19 (6), 1577-90, 2018.
7. Kodur V., Solhmirzaei R., Agrawal A., Aziz E. M., Soroushian P., Analysis of flexural and shear resistance of ultra high performance fiber reinforced concrete beams without stirrups, Eng. Struct., 174, 873-884, 2018.
8. Yoo D. Y., Yoon Y. S., Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers, Eng. Struct., 102, 409-423, 2015.
9. Türker K., Birol T., Yavaş A., Hasgül U., Ultra yüksek performanslı lifli beton içeren kirişlerde etkin çelik lif tipi incelemesi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16, 776-785, 2016.
10. Yoo D. Y., Banthia N., Yoon Y. S., Experimental and numerical study on flexural behavior of UHPFRC beams with low reinforcement ratios, Canadian Journal of Civil Engineering, 44 (1), 18-28, 2017.
11. Graybeal B, Material property characterization of ultra-high performance concrete, FHWA-HRT-06-103, McLean, Va, USA, 2006.
12. Liew J, Richard Y, Xiong DX., Ultra-high strength concrete filled composite columns for multi-storey building construction, Advan in Struct Eng, 15 (9), 1487-1503, 2012.
13. Chen S. H., Zhang R., Jia L. J., Wang J. Y., Flexural behaviour of rebar-reinforced ultra-high- performance concrete beams, Mag. of Conc. Res., 70 (19), 997-1015, 2018.
14. Turker, K., Hasgul, U., Birol, T., Yavas, A. and Yazici, H., Hybrid fiber use on flexural behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete beams, Composite Structures, 229, 111400, 2019.
15. Baby F., Marchand P., Toutlemonde F., Shear behavior of ultrahigh performance fiber-reinforced concrete beams. I: Experimental investigation, J. Struct. Eng., 140 (5), 04013111 1-10, 2014.
16. Yavaş A., Hasgul U., Turker K., Birol T., Effective fiber type investigation on the shear behavior of ultra high-performance fiber-reinforced concrete beams, Advances in Structural Engineering, 22 (7), 1591-1605, 2019.
17. Voo Y. L., Poon W. K., Foster S. J., Shear strength of steel fiber-reinforced Ultra High Performance Concrete beams without stirrups, J. Struct. Eng., 136, 1393-1400, 2010.
18. Resplendino J., Petitjean J., Ultra-high-performance concrete: First recommendations and examples of application, Proceedings of the 3rd International Symposium on High Performance Concrete / PCI National Bridge Conference, Orlando-USA, 77, October 19-22, 2003.
19. Tanaka Y., Maekawa K., Kameyama Y., Ohtake A., Musha H., Watanabe N., The innovation and application of UHPC bridges in Japan. Toutlemonde, F. and Resplendino, J. (Ed.), Designing and Building with UHPFRC: State of the Art Development, 149-187, London, England, 2011.
20. SAMARIS, 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: HPFRCC, 2005.
21. Moreillon L., Menétrey P., 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, 2013.
22. Fehling E., Schmidt M., Walraven J., Leutbecher T., Frönlich S., Betonkalendar: Ultra-high performance concrete UHPC, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2014.
23. Taşdemir M. A., Arslan G., Taftan K. S., Haberveren S. (2007, Aralık). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin tasarımı, mekanik davranışı ve uygulama alanları, 7. Ulusal Beton Kongresi, 199-214, İstanbul-Türkiye, Aralık, 2007.
24. AFGC, Recommendation: Ultra high performance fibre-reinforced concretes, Association Française de Génie, France, 2013.
25. NF P 18-710, National addition to Eurocode 2-Design of concrete structures: specific rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC), Association Francaise de Normalisation, Saint-Denis-France, 2016.
26. JSCE, Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC), Japanese Society of Civil Engineers, Tokyo-Japan, 2008.
27. SIA 20152, Ultra-high performance fibre reinforced cement-based composites (UHPFRC): Construction material, dimensioning and application, Swiss Federal Institute of Technology, Switzerland, 2016.
28. Perry V., Ultra – High – Performance - Concrete Advancements and Industrialization-The Need for Standard Testing, Advances in Civil Engineering Materials, 4 (2), 1-16, 2015.
29. Gowripalan N. and Gilbert I., Design guidelines for ductal prestressed concrete beams, VSL, Australia, 2000.

30. Graybeal B. A., Material property characterization of Ultra-high performance concrete (Report No: FHWA-HRT-06-103), U.S. Department of Transportation, Virginia-USA, 2006.
31. TS 500, Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
32. ASTM C1611M-14, Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete, Pensilvanya, 2014.
33. Graybeal B. A., Devis M., Cylinder or Cube: Strength testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete, ACI Mater. J., 105, 603-609, 2008.
34. Qian S., Li V. C., Simplified inverse method for determining the tensile properties of SHCCs, Journal of Advanced Concrete Technology, 6 (2), 353-363, 2008.
35. Baby F., Graybeal B., Marchand P., Toutlemonde F., A proposed flexural test method and associated inverse analysis for UHPFRC, ACI Mater. J., 109 (5), 545-555, 2012.
36. Park R., Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing, Bulletin of the New Zealand National Society for the Earthquake Engineering, 22 (3), 155-166, 1989.
37. Jang Y., Park H.G., Kim S.S., Kim J.H., Kim Y.G., On the ductility of high-strength concrete beams. Int. J. Concr. Struct. Mater., 2 (2), 115-122, 2008.
38. Yoo D.Y., Banthia N., Yoon Y.S., Flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars, Eng. Struct., 111, 246-262, 2016.
39. EN 1992-1-1., Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, London: BSi., 2005.
40. Gültekin C., Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) içeren I enkesitli kirişlerin eğilme davranışının deneysel ve nümerik incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Ü., Fen bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2020.