

Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton ile Üretilmiş Betonarme Kirişlerin Eğilme Davranışı

Kaan TÜRKER¹
Tamer BİROL²
Altuğ YAVAŞ³
Umut HASGÜL⁴
Halit YAZICI⁵

ÖZ

Çalışmada, Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) kullanımının betonarme kirişlerin sünekliği, taşıma kapasitesi, eğilme rijitliği, kırılma şekli ve çatlak davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bunun için dikdörtgen enkesitli 150x250x2500mm boyutlarında test kirişleri kullanılmıştır. Beton içeriğinde düz mikro ve kancalı makro boyutta çelik lifler karma olarak kullanılmış ve ortalama 163 MPa'lık basınç dayanımı elde edilmiştir. Dört farklı çekme donatısı oranına sahip lifli ve lifsiz toplam dokuz adet betonarme test kirişi üzerinde dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiş ve salt eğilme davranışları incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, kirişlerde UYPLB kullanımının incelenen parametreler bakımından önemli avantajlar sağladığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Ultra yüksek performanslı lifli beton, betonarme kiriş, eğilme davranışı, karma çelik lif.

ABSTRACT

Flexural Behavior of Beams with Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete

In this study, the effects of using Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) on ductility, load bearing capacity, flexural stiffness, failure mode and cracking behavior of reinforced concrete (RC) beams were experimentally investigated. 150x250x2500 mm test beams with rectangular cross sections were used. Straight micro and hooked macro steel fibers were used together in the concrete and average compressive

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 24 Ocak 2017 günü ulaşmıştır. 16 Mart 2018 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Mart 2019 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• DOI: 10.18400/tekderg.287116

1 Balıkesir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balıkesir - kturker@balikesir.edu.tr

2 Balıkesir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balıkesir - tbirol@balikesir.edu.tr

3 Balıkesir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balıkesir - ayavas@balikesir.edu.tr

4 Balıkesir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balıkesir - hasgul@balikesir.edu.tr

5 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - halit.yazici@deu.edu.tr

strength of 163 MPa was achieved. A total of nine RC test beams, with and without fibers, consisting of four different tensile reinforcement ratios were tested under four point bending and their flexural behaviors were investigated. The results of the study showed that the use of UHPFRC in the beams provided significant advantages in terms of investigated parameters.

Keywords: Ultra high performance fiber reinforced concrete, reinforced concrete beam, flexural behavior, hybrid steel fiber.

1. GİRİŞ

Günümüzde yüksek binalara, büyük açıklıklı ve özel yapı türlerine olan gereksinimlerin artması beraberinde çok yüksek dayanımlı betonlara olan talebi de arttırmaktadır. Bu bağlamda, beton teknolojisinin son yıllarda ortaya koyduğu önemli ürünlerden birisi de ultra yüksek dayanımlı ve çelik lif takviyeli betonlardır. Bir tür kompozit yapı malzemesi olan bu betonlar, maksimum sıklıkta içyapı, ince ve yüksek mukavemetli agrega ve çok düşük su/bağlayıcı oranı ile üretilerek 100-150 MPa basınç dayanımlarına sahip olabilmektedir [1-4]. Yüksek enerjili karıştırıcılar ve özel kür koşulları (ısı, basınç vb.) uygulanarak çok daha yüksek dayanımlara (200 MPa ve üzeri) ulaşılabilir [5-8]. Bu betonlar içeriğindeki çelik, karbon, sentetik vb. lifler sayesinde basınç, çekme ve eğilme etkisi altında oldukça sünek bir davranış göstermektedir. Üstün mekanik özellikleri ile beraber, sıkı iç yapı ve liflerin çatlakları sınırlaması sayesinde çevre koşullarına karşı durabilitesi de çok yüksek olan bu betonlar için *Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB)*, *Yüksek Performanslı Lif Takviyeli Çimento Kompoziti* gibi tanımlar kullanılmaktadır [9-15].

UYPLB'un üstün mekanik özellikleri, yapı elemanlarında dayanım, rijitlik ve süneklik bakımından önemli avantajlar sağlayarak geleneksel betonlara göre daha ekonomik, estetik ve uzun ömürlü yapılara imkan verecek potansiyele sahiptir. Günümüzde UYPLB, özel üretim koşullarına gereksinim duyması nedeniyle daha çok prefabrik sektöründe büyük açıklıklı köprü kirişlerinde, plaklarda, özel geometriye sahip narin enkesitli yapısal elemanlarda ve dış cephe kaplama malzemesi kullanılmaktadır (Şekil 1). Yüksek süneklik ve durabilite özellikleri, prefabrik elemanların ıslak birleşimlerinde ve çevre koşullarına maruz betonarme köprü, viyadük, iskele, liman, baraj vb. yapıların onarım ve takviyesinde UYPLB'un tercih edilmesini sağlamaktadır (Şekil 1) [10,12,16-19]. Ülkemizde ise UYPLB'nun pratikteki kullanımı henüz rögar kapağı, mazgal gibi yapısal olmayan elemanlarla ve durabilite amaçlı bazı uygulamalarla sınırlıdır. Bununla birlikte UYPLB'un yapısal eleman güçlendirmesinde kullanımına yönelik çalışmalar yapılmaktadır [20-22].

UYPLB'un içeriğindeki lifler, betona üstün mekanik özellikler kazandırmakta ve betonarme elemanların yapısal davranışını önemli ölçüde değiştirebilmektedir. Kullanılan liflerin geometrik özellikleri, miktarı (hacimsel oranı), beton içindeki doğrultusu, kullanıldığı yapısal elemanın enkesit geometrisi/boyutları vb. parametreler yapısal davranışta farklılıklara yol açabilmektedir. Mevcut betonarme standartları bu betonu içeren yapı elemanlarının tasarımı için yetersiz kaldığından, farklı ülkelerdeki araştırma grupları ve kuruluşlar tarafından UYPLB için tasarım önerileri niteliğinde çeşitli dokümanlar yayınlanmıştır [9-13]. UYPLB ile ilgili mevcut dokümanlar, genellikle ait oldukları ülkenin köprü şartnamelerine bağlı olarak hazırlanmıştır. Bu dokümanlarda bazı tasarım esasları ortaya koyulmasına karşın lif içeriği, kesit özellikleri vb. bakımından kısıtlamalar

bulunmakta ve özel malzeme testleri gerekmektedir. Bu nedenle, UYPLB daha çok özel projelerde ve bu projelere özgün yapısal testler ile birlikte kullanılabilir. UYPLB'un yapısal elemanlarda kullanımının yaygınlaşması için mevcut dokümanlara ait kapsamın genişletilmesi ve ayrıca, üretim prosedürlerini, test metodlarını ve tasarım esaslarını içeren yöntemlerin standartlaşması gerekmektedir. Bunun için de farklı yapısal elemanlar üzerinde lif içeriği etkisinin araştırıldığı deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 1 - UYPLB'un Bazı Kullanım Alanlarına Örnekler

Önemli avantajlar sağlaması nedeniyle UYPLB çalışmalarının yoğunlaştığı yapısal elemanlardan birisi kirişlerdir. Kirişlerde UYPLB'un kullanılması durumunda, çok yüksek beton basınç dayanımı nedeniyle dengeli kırılma donatı oranları da yükselmekte ve buna bağlı olarak yüksek çekme donatısı oranlarında dahi sünek kırılmalar (denge altı kırılma) elde edilebilmektedir [23-24]. Ayrıca, çelik liflerin sağladığı şekildeğiştirme kapasitesi sayesinde basınç bölgesinde yüksek dayanımlı betonlarda gözlenen gevrek davranış da

önlenmektedir. Çekme bölgesindeki lifler ise, çatlak genişliklerini sınırlayarak sehimi azaltıcı yönde etki yapmakta ve betonun çekme dayanımını önemli ölçüde arttırarak kirişin yük taşıma kapasitesini arttırmaktadır [25-28]. Bu tür betonlarda basınç dayanımlarına bağlı olarak elastisite modülleri yüksek olmakta bu da kirişin eğilme rijitliğini arttırmaktadır [29-30]. Bununla birlikte çelik lifler betondaki asal çekme çatlaklarını sınırlayarak kesmeye karşı dayanımı da arttırmaktadır [31-33]. Bu bağlamda, ABD tasarım şartnamesinde (ACI 318-14) belirli düzeydeki kesme kuvvetlerinin sadece çelik lifler ile karşılanmasına izin verilmektedir [34].

Betonarme kirişler üzerinde yapılan çalışmalarda, çelik lifin taşıma kapasitesi, rijitlik ve çatlak davranışı üzerindeki katkılarının lif miktarı ile orantılı değiştiği, süneklik üzerindeki etkisinin ise büyük ölçüde donatı oranına bağlı olduğu görülmektedir. Geleneksel betonarme kirişlerden farklı olarak, düşük donatı oranları için lifler çatlak davranışını değiştirerek kiriş sünekliklerini azaltabilmekte, yüksek donatı oranlarında ise arttırabilmektedir. Ayrıca, sünekliğin değişiminde lif oranı da etkili olmaktadır. Kirişlerin eğilme davranışında maksimum performans elde edebilmek için lif içeriğinin (tipi, oranı) ve kirişteki çekme donatısı oranının uyumlu olması gerekmektedir. Bunun için de farklı lif içerikleri ve farklı donatı oranlarına sahip kirişlerde süneklik, taşıma kapasitesi ve rijitlik parametrelerinin birlikte değerlendirildiği çalışmalara ihtiyaç bulunmaktadır.

Bu çalışmada, UYPLB kullanımının kiriş taşıma kapasitesi, yerdeğiştirme ve eğrilik sünekliği, eğilme rijitliği, kırılma şekilleri ve çatlak davranışı üzerindeki etkilerinin düşük ve yüksek çekme donatısı oranlarına sahip betonarme kirişler için incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada üretilen UYPLB'da mikro ve makro boyutta iki farklı lif tipi birlikte (karma) kullanılmıştır. Böylece, beton özelliklerine çalışmalarda daha iyi performans gösterdiği rapor edilen karma lif uygulamasının betonarme kirişlerdeki performansı değerlendirilmiştir. İncelenen bazı test numunelerinde, geleneksel betonarmedeki maksimum donatı sınırının üzerine çıkılarak UYPLB'un yüksek basınç kapasitesinin ve sünekliğinin kirişlerde kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Bunun yanı sıra, çelik lifli betonun ve bu beton içerisindeki çelik donatının şekildeğiştirme davranışı da değerlendirilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA PROGRAMI

Kirişlerde Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) kullanımının eğilme davranışına olan etkilerini incelemek amacıyla, çelik lifli ve lifsiz beton kullanılarak betonarme kirişler üretilmiş ve eğilme davranışları deneysel verilere dayanarak değerlendirilmiştir. Bunun için, düşük ve yüksek çekme donatısı oranlarını temsilen dört farklı donatı oranına sahip sekiz adet kiriş ve ayrıca salt UYPLB'un eğilme davranışını karşılaştırmak amacıyla aynı geometrik özelliklerde donatısız bir kiriş test edilmiştir. Kirişlerde salt eğilme davranışının elde edilebilmesi için dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiş ve bunun sonucunda yük-sehim (düşey yerdeğiştirme) davranışları, kırılma şekilleri, yerdeğiştirme süneklikleri, eğrilik süneklikleri, yük/moment taşıma kapasiteleri, eğilme rijitlikleri, belirli sehim değerlerinde maksimum çatlak genişlikleri ve çatlak dağılımları incelenmiştir. Ayrıca betonun ve donatı çeliğinin şekildeğiştirme davranışları incelenmiştir.

2.1. Üretilen Ultra Yüksek Performanslı Lifli Betonun Özellikleri

İncelenen test kirişlerinde kullanılmak üzere 28 günlük basınç dayanımı en az 120 MPa olan UYPLB üretilmesi hedeflenmiştir. Betonun bağlayıcı kısmı CEM I 42.5 R sınıf portland çimentosu, silis dumanı ve yüksek fırın cürufundan oluşmaktadır. Çimentonun yoğunluğu 3.10-3.15 g/cm³, özgül yüzeyi 3500-3700 cm²/g ve tane çapı 3-100 µm arasındadır. Kullanılan sili dumanı ve yüksek fırın cürufunun yoğunlukları sırasıyla 2.20 ve 2.75 g/cm³ tür. Agregata olarak iki farklı boyutta yüksek dayanımlı kuvars kullanılmıştır. Tane çapı 0 ile 0.8 mm arasında olan agreganın özgül ağırlığı 2.68 g/cm³, 1 ile 3 mm arasında olanın ise 2.66 g/cm³ olarak belirlenmiştir. UYPLB çok düşük su/bağlayıcı oranına sahip olduğundan, betonun işlenebilirliğinin sağlanması amacıyla polikarboksilat eter esaslı yeni nesil süperakışkanlaştırıcı (özgül ağırlığı 1.08-1.14 kg/litre) katkı kullanılmıştır.

Çizelge 1 - Betonun Oluşturan Bileşenlerin Oranları (kg/m³)

Karışım	Çimento	Silis Dumanı	Yüksek Fırın Cürufu	Süper Akışk.	0-0.8 mm Kuvars	1-3 mm Kuvars	Su/ Bağlayıcı	Çelik Lif
Lifsiz	690	138	276	17.25	542	542	0.18	--
Lifli	690	138	276	17.25	525	525	0.18	117

Çizelge 2 - Çelik Liflerin Boyutları ve Mekanik Özellikleri

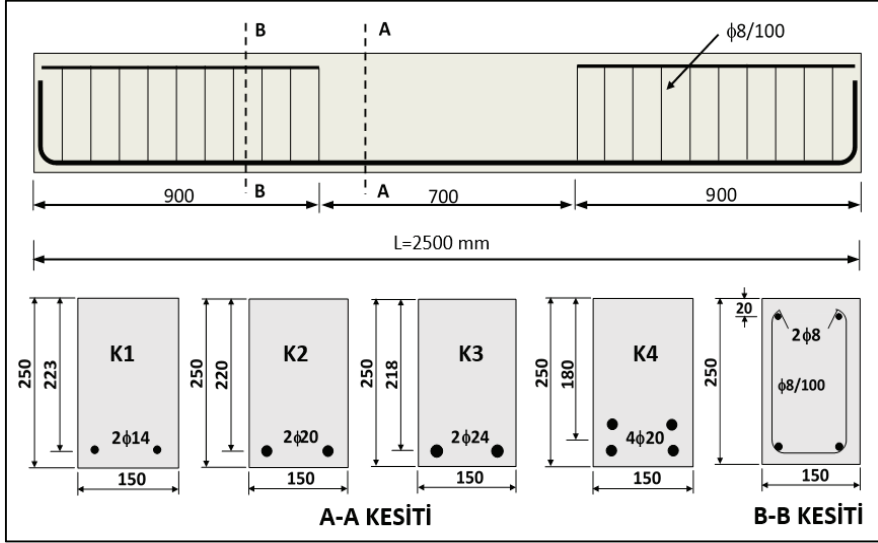
Çelik lif tipi	Çap (mm)	Boy (mm)	Narinlik (Boy/En)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Düz Mikro Lif	0.16	13	81	7.8	2500	210000
Kancalı Makro Lif	0.75	60	80	7.8	1225	210000

UYPLB'da kullanılan lif miktarı (hacimsel oranı) ve tipi betonun mekanik özelliklerini ve işlenebilirliğini etkileyen en önemli parametrelerdir. Hem mekanik özellikler hem de işlenebilirlik bakımından iyi performans elde edilebilmek için genellikle hacimsel olarak % 1.0-%2.5 oranında lif kullanılmaktadır. Daha yüksek oranlara çıkıldığında işlenebilirlik azalmakta, daha düşük oranlarda lif kullanılması halinde ise mekanik özelliklerdeki katkılar düşük düzeyde kalmaktadır [35,36]. Yapısal elemanlarda işlenebilirliğin yüksek olması nedeniyle daha çok mikro boyutta düz lifler tercih edilmektedir. Beton özelliklerine yönelik çalışmalarda mikro düz liflerin çatlakları sınırlama bakımından elastik bölgede etkili olduğu, ileri şekildeğiştirmelerin olduğu plastik bölgede ise kancalı makro liflerin daha etkili olarak betonun sünekliğini artırdığı belirlenmiştir. Bu nedenle, eğilme davranışı genelinde daha iyi bir performans elde etmek için karma lif kullanımı önerilmektedir [37-39]. Buna bağlı olarak çalışmada, işlenebilirlik parametresi de gözönünde bulundurularak %1.0 oranında düz mikro lif ve %0.5 oranında kancalı makro lif içeren karma lif uygulaması gerçekleştirilmiştir. UYPLB'ü oluşturan bileşenlerin karışım oranları Çizelge 1'de, çelik liflerin geometrik ve mekanik özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir. Üretilen beton ile ilgili daha detaylı bilgi [40]'da bulunabilir.

2.2. Test Kirişlerinin Özellikleri

Çalışmada, düşük ve yüksek donatı oranlarını temsil eden dört farklı çekme donatısı için dikdörtgen enkesitli 150x250x2500mm boyutlarında test kirişleri üretilmiştir. Her bir donatı oranı için UYPLB ve lifsiz beton kullanılarak iki ayrı grup kiriş hazırlanmıştır. Lifsiz beton içeren test kirişleri çelik lifin etkisini belirlemek amacıyla yapılan karşılaştırmalarda referans olarak kullanılmıştır. Ayrıca, salt çelik lifli kirişin eğilme davranışını karşılaştırmak amacıyla UYPLB içeren donatısız bir kiriş (K0-F) üretilmiştir. Kirişlerin geometrik özellikleri ve donatı yerleşimleri Şekil 2’de verilmiştir. Test kirişlerinde basınç donatısı bulunmamaktadır. Kesme kırılmasını önlemek amacıyla salt eğilme bölgesi dışında $\phi 8/100$ etriye kullanılmıştır. Test kirişlerinin çekme donatıları ve mekanik özellikleri Çizelge 3’de verilmiştir. K1 kirişi düşük çekme donatısı oranını ($\rho=0.009$) temsil etmektedir. K2 kirişi yaklaşık olarak TS 500’de [41] verilen maksimum çekme donatısı oranına sahiptir. K3 ve K4 kirişlerinde ise, TS 500’deki maksimum oran aşılarak yüksek donatı oranlı kirişler elde edilmiştir. Kirişlerdeki çekme donatısı oranları çekme kırılması oluşması amaçlanarak dengeli donatı oranının (ρ_b) altında tutulmuştur. Dengeli donatı oranı ρ_b hesabında geleneksel betonarmedeki kabuller kullanılmış, çekme bölgesindeki liflerin etkisi gözönüne alınmamıştır. Dengeli donatı oranları, ortalama beton ve donatı dayanımları kullanılarak lifsiz kirişler için $\rho_b=0.10$, lifli kirişler için ise $\rho_b=0.12$ olarak hesaplanmıştır. Test kirişlerindeki çekme donatılarının dengeli donatıya oranları Çizelge 3’de verilmiştir. Çizelge 3’den görüldüğü gibi, beton basınç dayanımları çok yüksek olduğu için kirişlerdeki dengeli donatı oranları da geleneksel betonarme kirişlere göre çok daha yüksek elde edilmiş ve en yüksek donatı oranına sahip K4 kirişinde dahi $\rho/\rho_b = 0.43$ ’ü aşmamıştır.

Çalışmada kullanılan UYPLB, 125 dm³ kapasiteli standart bir panmikserde üretilmiştir. (Şekil 3). Öncelikle çimento, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve agregalar kuru olarak 3 dakika karıştırılmıştır. Kuru karışıma önce su ve akışkanlaştırıcı katkının yarısı katılarak 5 dakika karıştırılmış ardından akışkanlaştırıcının geri kalan kısmı da eklenerek 5 dakika daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Lifli karışımlarda bu aşamadan sonra çelik lifler eklenmiş ve homojen bir dağılım sağlanana kadar karıştırma işlemi devam etmiştir. Hem lifsiz karışım hem de lifli karışım için kendiliğinden yerleşebilir bir kıvam elde edilmiştir. Beton içindeki çelik liflerin kiriş boyuna doğrultusunda yönlendirilmesini sağlamak amacıyla döküm, kalıbın bir ucundan diğer ucuna doğru hareket ettirilerek birkaç aşamada gerçekleştirilmiştir. Bunun için özel olarak tasarlanmış bir beton arabası kullanılmıştır (Şekil 3). Lifli ve lifsiz üretilen test kirişlerine ait 100x100x100 mm’lik küp numunelerin 28 günlük basınç dayanımları belirlenmiş ve bunlara ait ortalama değerler Çizelge 4’te verilmiştir. Beton dökümü tamamlanan kirişler plastik bir örtü ile kaplanarak yaklaşık 20°C sıcaklıkta bir hafta kürlenmiş, daha sonra kalıptan çıkarılarak laboratuvar ortamında test gününe kadar bekletilmiştir.



Şekil 2 - Kirişlerin Geometrik Özellikleri ve Donatı Yerleşimleri

Çizelge 3 - Test Kirişlerinin Çekme Donatısı Özellikleri ve Lif İçeriği

Kiriş Adı	Çekme Donatısı		f_y (MPa)	f_u (MPa)	ρ/ρ_b	Çelik Lif
	Miktarı	Oranı (ρ)				
K1-R	2φ14	0.009	469	590	0.090	Yok
K2-R	2φ20	0.019	462	654	0.190	
K3-R	2φ24	0.028	491	606	0.280	
K4-R	4φ20	0.043	468	661	0.430	
K0-F	--	--	--	--	--	%1.0 Mikro + %0.5 Makro
K1-F	2φ14	0.009	445	564	0.075	
K2-F	2φ20	0.019	471	651	0.158	
K3-F	2φ24	0.028	460	586	0.233	
K4-F	4φ20	0.043	471	651	0.358	

ρ : Çekme donatısı oranı, ρ_b : Dengeli donatı oranı, f_y : Akma dayanımı, f_u : Çekme dayanımı

Çizelge 4 - Test Kirişlerine Ait Beton Basınç Dayanımları

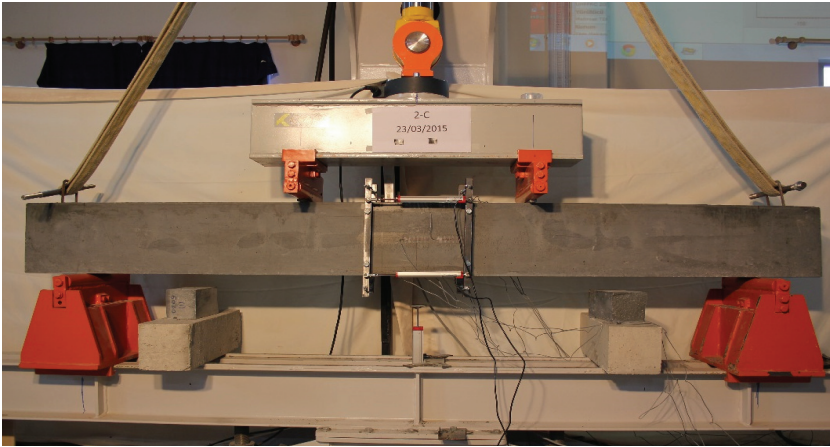
Kiriş Adı	K1-R	K2-R	K3-R	K4-R	K0-F	K1-F	K2-F	K3-F	K4-F
28 günlük Basınç Dayanımı (MPa)	137	133	135	146	154	169	150	164	167
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)		138					163		



Şekil 3 - UYDB'nun Hazırlanması ve Kalıplara Yerleştirilmesi Aşamaları

2.3. Test Düzeneği ve Yapılan Ölçümler

Kirişlerin eğilme testleri Balıkesir Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan dört noktalı test düzeneği ile yapılmıştır (Şekil 4). Düzenekte 500kN kapasiteli ve yerdeğiştirme kontrollü bir düşey hidrolik yük veren bulunmaktadır. Numunenin sehimini (Δ) ölçmek üzere açıklık ortasına bir potansiyometrik cetvel ve yükü (P) ölçmek üzere yük verenin altına bir yük hücresi yerleştirilmiştir (Şekil 4, 5).

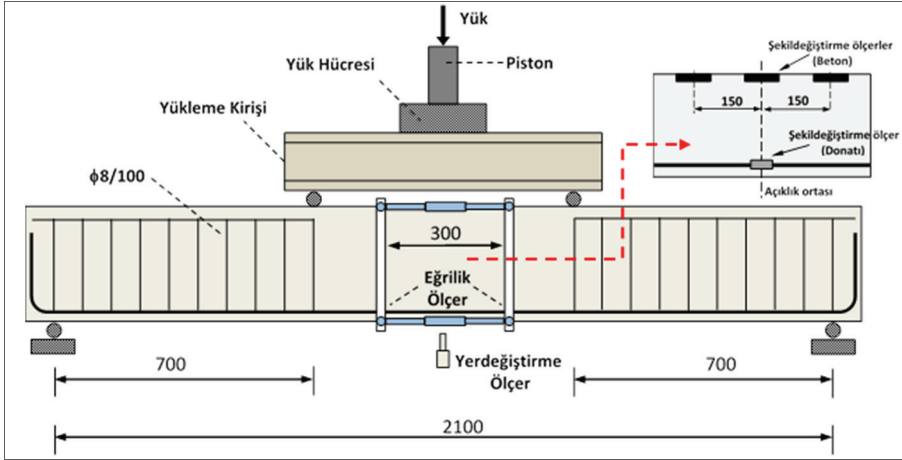


Şekil 4 - Dört Noktalı Eğilme Testi Düzeneği

Yük rijit bir çelik profil vasıtasıyla aralarında 700 mm olan iki tekil yüke dönüştürülerek kirişe uygulanmaktadır. Kiriş orta bölgesindeki eğriliği (birim dönmeyi) belirlemek amacıyla basınç ve çekme bölgesine iki adet potansiyometrik cetvel yerleştirilmiştir. Bunlar en üst ve

en alt beton liflerindeki yerdeğiştirmeleri ölçecek şekilde ve 300 mm'lik aralıkla yerleştirilmiştir. Bu düzenek ile elde edilen kısalma ve uzamalardan yararlanarak salt eğilme bölgesindeki 300 mm'lik bölümün ortalama eğriliği belirlenmiştir (Şekil 4, 5).

Salt eğilme bölgesindeki betonun basınç altındaki şekildeğiştirme davranışını gözlemek amacıyla en dış beton yüzeyine şekildeğiştirme ölçerler yerleştirilmiştir (Şekil 5). Çelik lifli betonun içindeki donatı davranışını gözlemek amacıyla kirişin salt eğilme bölgesinde donatılara da şekildeğiştirme ölçerler yerleştirilmiştir (Şekil 5). Test süresince belirli sehim değerlerinde yüklemeyi durdurularak, oluşan çatlaklar işaretlenmiş ve çatlak mikroskobu ile maksimum çatlak genişlikleri ölçülmüştür.



Şekil 5 - Şematik Yükleme ve Ölçüm Düzenekleri

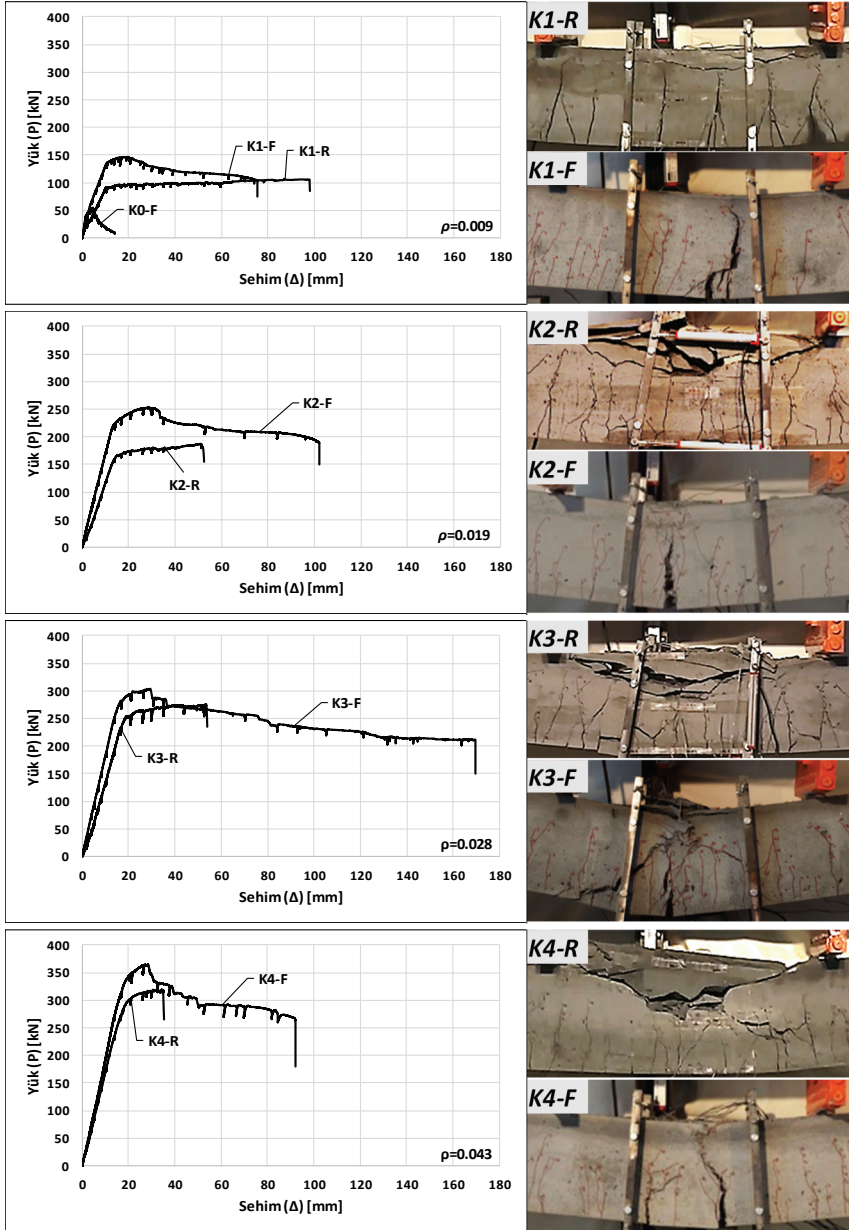
2.4. Deneysel Çalışmanın Sonuçları

Çalışma kapsamında hazırlanan test kirişleri, göçme yüküne kadar yüklemeye yapılarak yük-sehim davranışları ve kırılma mekanizmaları belirlenmiştir (Şekil 6). Çekme donatısı oranları denge altı olduğu için beklendiği gibi lifli ve lifsiz tüm kirişlerde sünek kırılma gerçekteşmiştir.

Ultra yüksek dayanımlı beton içeren lifsiz referans kirişlerinde donatıda akma sonrası rijitlik azalmakta ve hafif düzeyde pekleşme etkisi ile maksimum yüke ulaşılmaktadır (Şekil 6a). Maksimum yük sonrası tüm lifsiz kirişlerde beton ezilmesi ile kırılma (göçme) gerçekteşmiştir (Şekil 6b). Beklendiği gibi lifsiz kirişlerin davranışı geleneksel betonarme elemanlara benzer olmuştur. Salt UYPLB içeren donatısız kirişte, çelik lifler sayesinde belirli bir yük taşıma kapasitesi elde edilmekle birlikte, çekme bölgesindeki liflerin sıyrılması sonucunda kiriş yük taşıma kapasitesini kaybettiğinden, süneklik oranları donatılı kirişlere göre çok daha düşük seviyede kalmıştır (Şekil 6a).

UYPLB içeren kirişlerde, çekme bölgesindeki lifler ilave donatı etkisi yaparak başlangıç yerdeğiştirme rijitliğini ve yük taşıma kapasitesini lifsiz duruma göre belirgin şekilde arttırmıştır. Bununla birlikte, çekme bölgesindeki lifler küçük çatlakları sınırlamakta ve uzama şekildeğiştirmelerinin en büyük olduğu bölgede çatlakların birleşerek bir veya birkaç

adet büyük çatlak oluşturmasına sebep olmaktadır. Bu da yüksek donatı oranlarına sahip kirişlerde dahi kırılmanın (göçmenin) donatı kopması ile gerçekleşmesine sebep olmuştur (Şekil 6b).



a)

b)

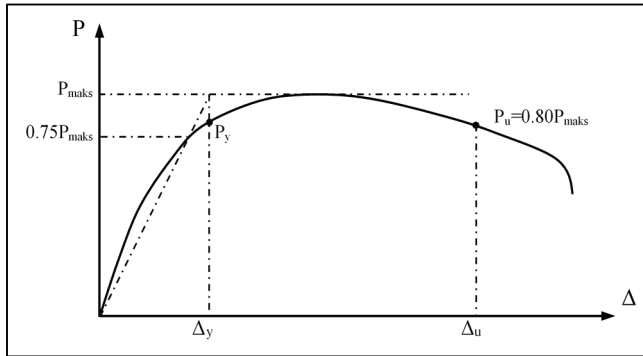
Şekil 6 - a) Kirişlerin Yük-Sehim Bağlılıları, b) Kirişlerin Kırılma Şekilleri

UYPLB'lu kirişlerin tümünde çekme donatılarının akmasından sonraki aşamada çelik liflerin sebep olduğu bir pekleşme davranışı gözlenmektedir. Kirişlerdeki donatı oranı arttıkça bu pekleşme bölgesi uzunluğu azalmıştır. Pekleşme davranışı çekme bölgesindeki liflerin sıyrılması veya basınç bölgesindeki betonun ezilmesi ile sonlanmakta ve bu noktadan sonra dayanım azalmaları gözlenmektedir. Ancak dayanım azalmalarına rağmen lifsiz kirişlerin yük taşıma kapasitelerinden daha yüksek değerler elde edilmektedir. UYPLB'un basınç altındaki sünekliği sayesinde kirişlerde oldukça sünek bir davranış elde edilmiştir. Ayrıca, lifsiz kirişlerde beton ezilmesi büyük bir bölgede ve ani olurken, lifli kirişlerde çok küçük bir bölgede ve hafif dayanım azalmaları şeklinde gerçekleşmektedir (Şekil 6).

2.4.1. Yerdeğiştirme Süneklikleri

Çelik lif içeriğinin yerdeğiştirme sünekliği üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla, lifli ve lifsiz referans kirişlerine ait yerdeğiştirme süneklikleri (μ_{Δ}) karşılaştırılmıştır. Bunun için öncelikle *Yük-sehim* bağıntıları kullanılarak akma yükü (P_y), maksimum yerdeğiştirmeye karşılık gelen yük taşıma kapasitesi (P_u), akma yerdeğiştirmesi (Δ_y) ve maksimum yerdeğiştirme (Δ_u) değerleri elde edilmiştir. Akma yerdeğiştirmesinin belirlenmesinde, azaltılmış rijitlik ile *ideal elasto-plastik* davranışı esas alan yaklaşım kullanılmıştır (Şekil 7) [42]. Bu yaklaşımda akma yerdeğiştirmesi (Δ_y), kirişin maksimum yük taşıma kapasitesinin (P_{maks}) %75'ine karşılık gelen nokta ile eğrinin başlangıcını birleştiren bir kiriş yardımıyla geometrik olarak belirlenmektedir (Şekil 7).

Lifsiz kirişlerden farklı olarak, lifli kirişlerde maksimum yük sonrası dayanım azalmaları oluşmasına rağmen lifler sayesinde yük taşıma kapasitesi büyük ölçüde korunarak kirişler kırılma (göçme) yüküne kadar büyük yerdeğiştirme yapabilmektedir. Çalışmada bu dayanım azalmalarını sınırlamak amacıyla Şekil 7'de gösterildiği gibi en fazla %20'lik yük düşüşü göz önüne alınmış ve maksimum yerdeğiştirmeler buna bağlı olarak belirlenmiştir [42]. Kirişlerin yerdeğiştirme süneklikleri ve ilgili diğer karakteristik değerler Çizelge 5'de verilmiştir.

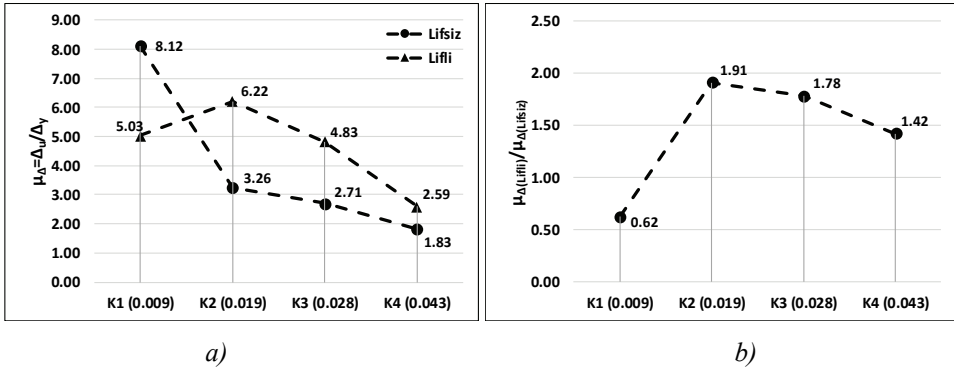


Şekil 7 - Yük- Sehim Bağıntısına Ait Karakteristik Değerler [42]

Çizelge 5 - Yerdeğiştirme Süneklikleri ile İlgili Karakteristik Değerler

Kiriş Adı	Δ_y (mm)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	P_{maks} (kN)	$\mu_{\Delta} = \Delta_u/\Delta_y$	P_u/P_{maks}
K1-R	12.05	105.81	97.87	107.13	8.12	0.99
K2-R	16.00	177.49	52.13	187.19	3.26	0.95
K3-R	19.80	273.33	53.65	275.32	2.71	0.99
K4-R	19.10	309.91	35.01	318.88	1.83	0.97
K1-F	10.74	117.28	54.00	146.59	5.03	0.80
K2-F	15.00	202.50	93.30	253.16	6.22	0.80
K3-F	16.68	242.90	80.50	303.68	4.83	0.80
K4-F	18.88	303.69	48.96	364.55	2.59	0.83

Kirişler için elde edilen yerdeğiştirme sünekliklerinin donatı oranına bağlı olarak değişimleri Şekil 8a’da verilmiştir. Ayrıca her bir donatı oranı için elde edilen süneklikler lifsiz kiriş sünekliklerine oranlanarak çelik lifin süneklik üzerindeki etkisi belirlenmiştir (Şekil 8b).

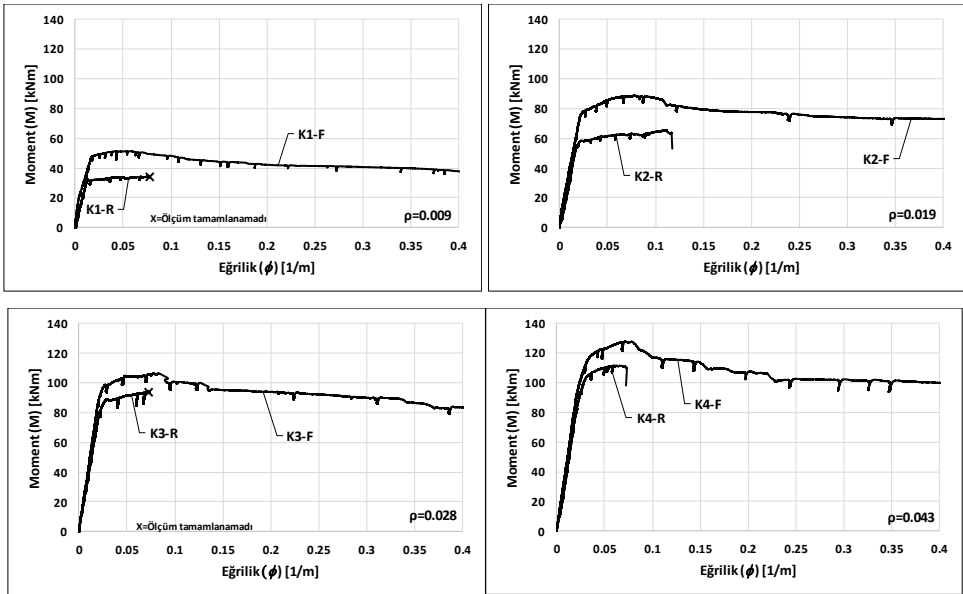


Şekil 8 - a) Kiriş Yerdeğiştirme Sünekliklerinin Donatı Oranı ile Değişimi, b) Çelik Lifin Süneklik Üzerindeki Etkisinin Donatı Oranı ile Değişimi

Lifsiz kirişlerde beklendiği gibi çekme donatısı oranı arttıkça yerdeğiştirme sünekliği azalım yönünde bir eğilim göstermiş ve süneklik oranları 1.83-8.12 arasında elde edilmiştir (Şekil 8a). Lifli kirişlerde ise, en yüksek süneklik $\rho=0.019$ 'luk donatı oranına sahip K2-F kirişinde elde edilmiş, bundan daha düşük ve daha yüksek donatı oranları için süneklik değerleri azalım göstermiştir. Lif kullanımı ile en düşük donatı oranına ($\rho=0.009$) sahip K1 kirişinde yerdeğiştirme sünekliği lifsiz duruma göre %38 azalmış, yüksek donatı oranları için %42-%91 artmıştır. Düşük donatı oranları için yapılan benzer çalışmalarda da çelik lif kullanımının sünekliği azaltıcı yönde etki yaptığı, donatı oranı arttıkça sünekliğe katkının arttığı rapor edilmiştir [27,43-44].

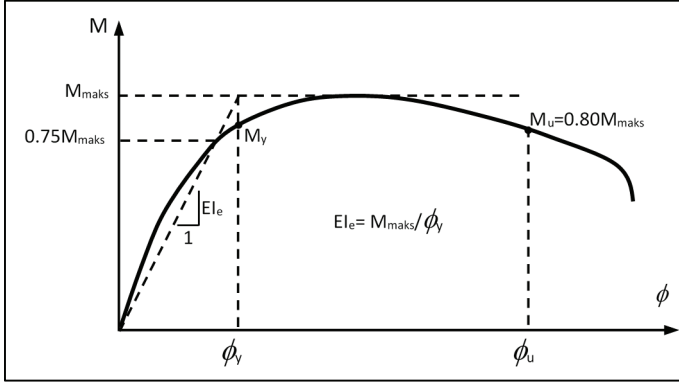
2.4.2. Eğrilik Süneklikleri ve Etkin Eğilme Rijitlikleri

Çelik lif içeriğinin betonarme kirişlerde eğrilik (birim dönme) sünekliğine (μ_ϕ) ve eğilme rijitliğine olan etkilerini belirlemek amacıyla, lifli ve lifsiz kirişlere ait deneysel *moment-eğrilik* bağıntıları kullanılmıştır (Şekil 9). Bunun için öncelikle kiriş orta bölgesine ait *moment-eğrilik* bağıntılarından akma momenti (M_y), maksimum eğriliğe karşılık gelen moment taşıma kapasitesi (M_u), akma eğriliği (ϕ_y) ve maksimum eğrilik (ϕ_u) değerleri belirlenmiştir (Şekil 10). Bu karakteristik değerlerin belirlenmesinde yerdeğiştirme sünekliklerinde esas alınan yaklaşım kullanılmıştır [42]. Kirişlerde etkin eğilme rijitlikleri (EI_e) olarak, ideal-elastoplastik idealleştirmeden elde edilen, maksimum momentin akma eğriliğine oranı esas alınmıştır (Şekil 10). İlgili karakteristik değerler Çizelge 6’da verilmiştir. K1-R ve K3-R kirişlerine ait *moment-eğrilik* bağıntıları, deneyin sonlarına doğru büyük plastik şekildeğiştirmelerin ve çatlakların ölçüm düzeneğine zarar vermesi nedeniyle erken sonlanmıştır (Şekil 9). Bu nedenle bu kirişlerde eğrilik süneklikleri belirlenememiştir.



Şekil 9 - Kirişlerden Elde Edilen Deneysel Moment-Eğrilik Bağıntıları

Ölçümü tamamlanan lifsiz referans kirişlerinde eğrilik süneklikleri 2.58 ve 5.59 olarak belirlenmişken lifli kirişlerde bu değerlerin 7.35-19.94 arasında değiştiği belirlenmiştir. Yerdeğiştirme sünekliğinde olduğu gibi, Maksimum eğrilik sünekliği $\rho=0.019$ 'luk donatı oranına sahip kirişte elde edilmiş, daha düşük ve daha yüksek donatı oranlarında süneklik azalmıştır. Liflerin orta bölgede büyük çatlak oluşumlarına sebep olması eğrilik sünekliklerinin lifsiz durumlara göre çok daha büyük olmasını sağlamıştır.



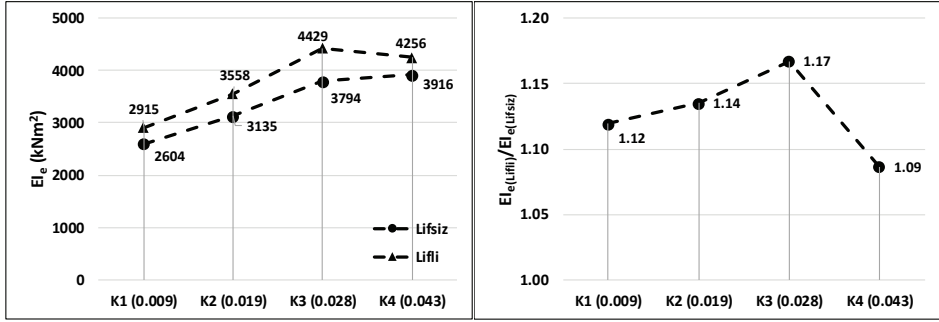
Şekil 10 - Moment- Eğrilik Bağıntısına Ait Karakteristik Değerler

Çizelge 6 - Moment-Eğrilik Bağıntısına Ait Karakteristik Değerler

Kiriş Adı	ϕ_y (1/m)	M_u (kNm)	ϕ_u (1/m)	M_{maks} (kNm)	$\mu_{\phi} = \phi_u / \phi_y$	$E I_e = M_{maks} / \phi_y$ (kNm ²)
K1-R	0.0144	*	*	*	*	2604
K2-R	0.0209	63.69	0.1168	65.52	5.59	3135
K3-R	0.0254	*	*	*	*	3794
K4-R	0.0285	109.84	0.0734	111.61	2.58	3916
K1-F	0.0176	41.08	0.2784	51.31	15.82	2915
K2-F	0.0249	70.88	0.4965	88.61	19.94	3558
K3-F	0.0240	85.03	0.3644	106.29	15.18	4429
K4-F	0.0299	106.08	0.2198	127.59	7.35	4256

Deprem etkileri ve yeniden dağılım etkisindeki sürekli kirişlerde daha büyük eğrilik sünekliklerine ihtiyaç bulunmakla birlikte, geleneksel beton ile üretilen kirişlerin düşey yükler altındaki tasarımında dengeli donatı oranına bağlı olarak verilen sınır koşullar ($\rho \leq 0.85 \rho_b$ [41], ($\rho \leq 0.75 \rho_b$ [34]) ile eğrilik sünekliğinin en az 2-3 olması garanti altına alınmaktadır [45, 46]. Düşey yük etkisindeki basit kirişlerde eğrilik sünekliği için bu değerlerin minimum süneklik değeri olarak alınabileceği görülmektedir. Buna göre UYPLB kullanılan tüm kirişlerde elde edilen sünekliklerin minimum sünekliğin çok üzerinde olduğu belirlenmiştir.

Kirişler için elde edilen etkin eğilme rijitliklerinin donatı oranına bağlı olarak değişimleri Şekil 11a'da verilmiştir. Ayrıca, her bir donatı oranı için lifli kirişlerden elde edilen rijitlikler lifsiz kiriş rijitliklerine oranlanarak çelik lifin eğilme rijitliği üzerindeki etkisi grafik olarak gösterilmiştir (Şekil 11b). Kirişlerin etkin eğilme rijitliklerinde liflerin katkısıyla lifsiz kirişlere göre %9-%17 oranında artış elde edilmiştir. Eğilme rijitliklerindeki değişim donatı oranına göre belirli bir eğilim göstermemektedir.



a)

b)

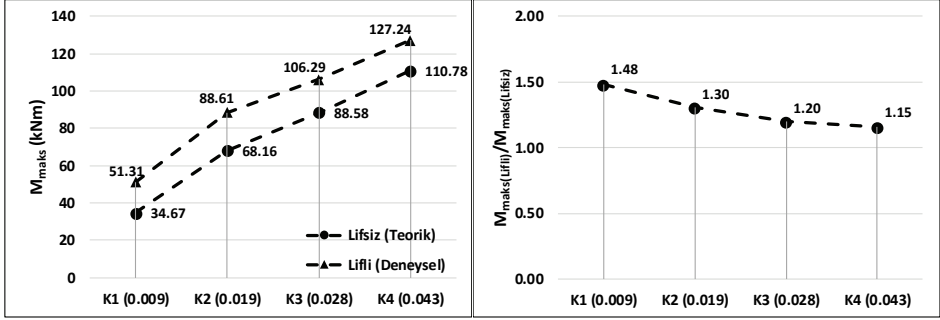
Şekil 11 - a) Kiriş Eğilme Rijitliklerinin Donatı Oranı ile Değişimi, b) Çelik Lifin Rijitlik Üzerindeki Etkisinin Donatı Oranı ile Değişimi

2.4.3. Yük/Moment Taşıma Kapasiteleri

Çelik lifin kiriş yük taşıma kapasitesine olan etkisini belirlemek amacıyla lifli ve lifsiz referans kirişlerinin yük/moment taşıma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Ancak test kirişlerinin bazılarında (K1, K3) lifli kiriş donatı akma dayanımları ile bunlara ait lifsiz referans kirişi akma dayanımları arasında moment taşıma kapasitesini etkileyebilecek düzeyde farklar bulunmaktadır (Çizelge 3). Çelik lifin kapasiteye katkısını belirlerken bu farkın gözönüne alınması gerekmektedir. Bunun için, lifsiz duruma ait deneysel sonuçlar yerine lifli kirişlerin donatı özellikleri ile belirlenen sayısal sonuçlar kullanılmıştır. Böylece, çelik lifin kapasiteye olan net etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Kirişlerin lifsiz durumdaki moment taşıma kapasitelerinin hesabı için ACI-318-14 [34] standardındaki esaslar kullanılmış, ancak kapasitelerin deney sonuçları ile uyumlu olması için donatılarda gerçek *gerilme-şekildeğiştirme* bağıntıları esas alınmıştır. Söz konusu teorik yaklaşımın ultra yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde geçerliliğini belirlemek amacıyla öncelikle lifsiz referans kirişleri için uygulanmıştır. Çizelge 7'den görüleceği üzere deneysel (M_{den}) ve teorik (M_{teo}) sonuçlar arasındaki fark %4'ü geçmemektedir. Buna göre, teorik yaklaşımın moment taşıma kapasitelerini belirlemede yeterli olduğu kabul edilmiş ve lifli kirişlerin donatı özellikleri kullanılarak teorik (referans) kapasiteleri hesaplanmıştır. Kirişler için elde edilen moment taşıma kapasitelerinin (M_{maks}) donatı oranına göre değişimleri Şekil 12a'da, çelik lifin kapasiteye olan etkisi Şekil 12b'de grafik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 7 - Lifsiz Referans Kirişlerinde Deneysel ve Teorik Moment Kapasiteleri

Kiriş Adı	K1-R	K2-R	K3-R	K4-R
M_{den} (kNm)	37.50	65.52	96.36	111.61
M_{teo} (kNm)	36.18	67.24	93.58	109.75
M_{den} / M_{teo}	0.96	1.03	0.97	0.98



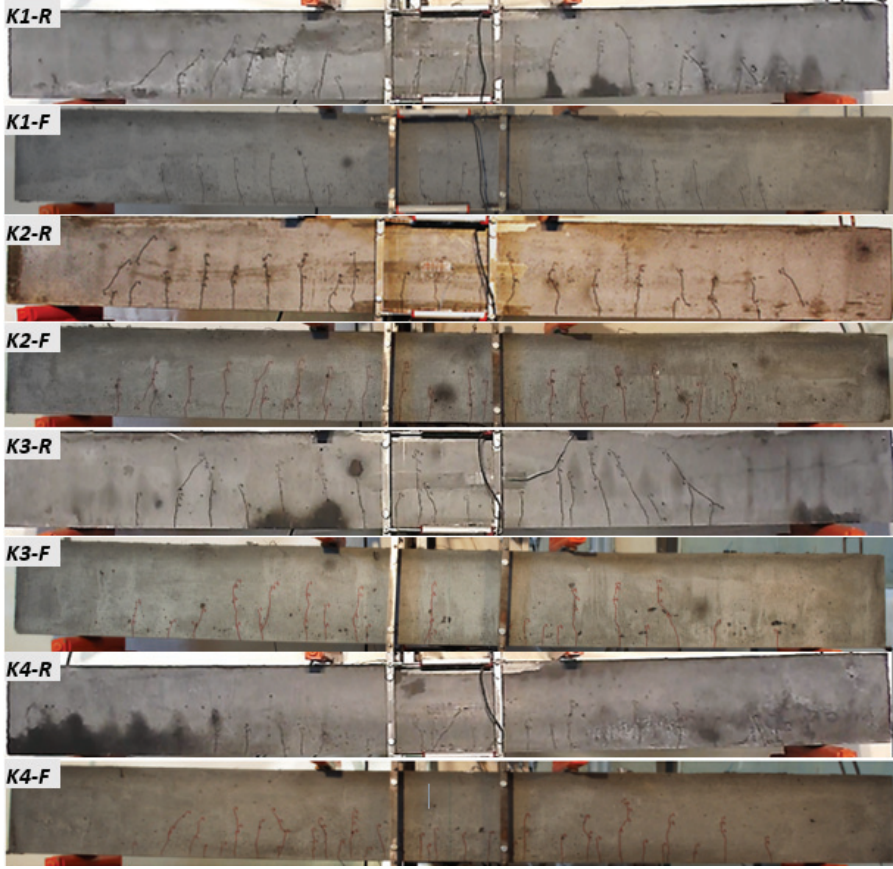
Şekil 12 - a) Kiriş Moment Taşıma Kapasitelerinin Donatı Oranı ile Değişimi, b) Çelik Lifli Kirişlerdeki Taşıma Kapasitesinin Lifsiz Duruma Göre Değişimi

Çekme bölgesindeki liflerin katkısıyla lifsiz kirişlere göre yük/moment taşıma kapasitelerinde %15-%48 arasında artışlar sağlanmıştır. Yük taşıma kapasitelerindeki en büyük artış en düşük donatı oranına sahip K1 kirişinde gerçekleşmiştir. Çekme donatısı oranı arttıkça liflerin sağladığı kapasite artışı azalan bir eğilim göstermiştir (Şekil 12b).

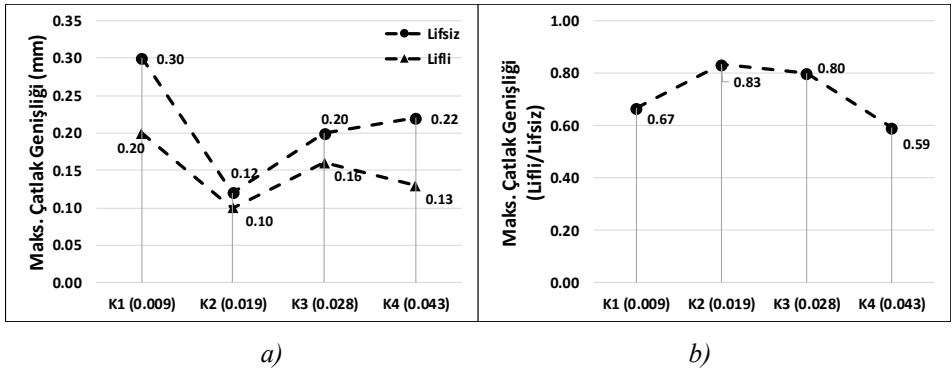
2.4.4. Çatlak Davranışları

Liflerin çatlak davranışına olan etkisini ortaya koymak amacıyla, lifli ve lifsiz test kirişlerine ait çatlak dağılımları ve ölçülen çatlak genişlikleri karşılaştırılmıştır. Çatlak incelemeleri, L kiriş açıklığını ifade etmek üzere, $L/250$ 'lik ve $L/70$ 'lik sehim değerlerinde yapılmıştır. $L/250$ değeri tüm kirişlerde elastik davranış bölgesine karşılık gelmekte ve betonarme eğilme elemanlarında kullanılabilirlik sınır durumuna ait sehim sınırlarını temsilen seçilmiştir. $L/70$ değeri ise önemli plastik şekildeğiştirmelerin olduğu plastik bölgeye karşılık gelmekte ve lifli kirişlerde yaklaşık olarak taşıma gücüne ulaşıldığı sehimi temsil etmektedir. $L/250$ 'lik yerdeğiştirme için elde edilen çatlak dağılımları ve çatlak genişlikleri Şekil 13-14'de, $L/70$ 'lik yerdeğiştirme için elde edilen çatlak dağılımları ve çatlak genişlikleri Şekil 15-16'da verilmiştir.

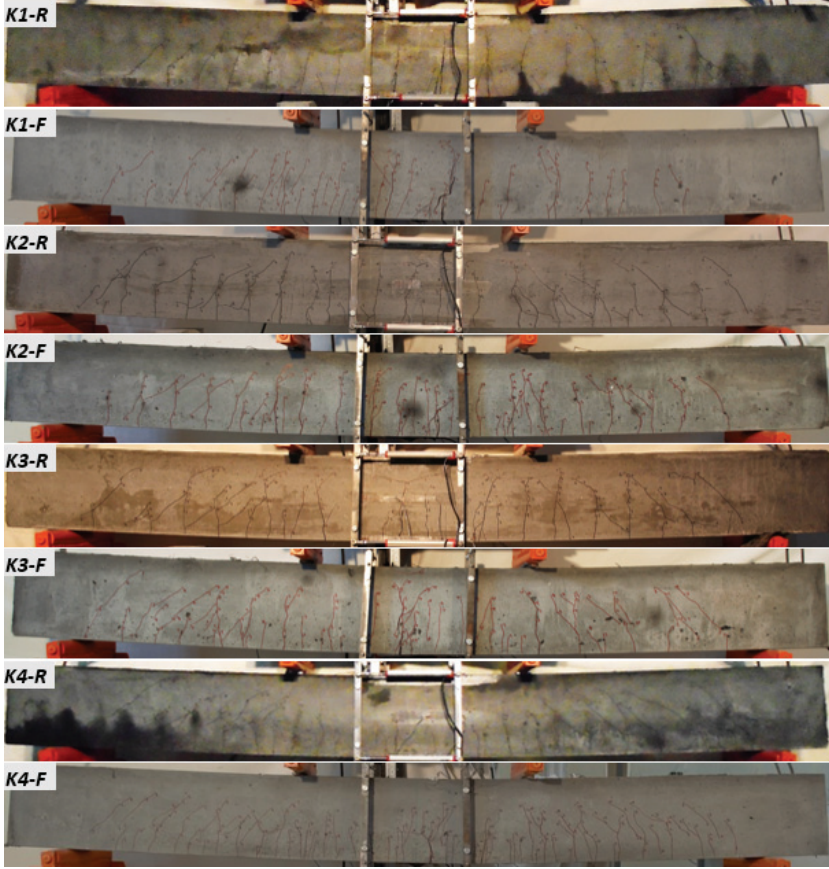
Lifli ve lifsiz referans kirişlerindeki çatlak dağılımları karşılaştırıldığında, *kullanılabilirlik* sınır durumunu temsil eden $L/250$ 'lik yerdeğiştirme değerinde düşük donatı oranları için benzer çatlak dağılımları elde edilirken, donatı oranı arttıkça lifli kirişlerde çatlak sayısının bir miktar arttığı görülmektedir (Şekil 13). Buna karşılık, çatlak genişlikleri lifsiz duruma göre %17-%41 oranında azalma göstermiştir. *Taşıma gücü* sınır durumunu temsil eden $L/70$ 'lik yerdeğiştirme değerinde ise, lifli ve lifsiz kirişler arasındaki çatlak dağılımı büyük farklılık göstermiştir. Lifsiz kirişlerde kiriş boyunca benzer genişlikte çatlaklar gözlenirken, lifli kirişlerde çok sayıda küçük çatlak ile birlikte orta bölgede bir veya iki büyük çatlak oluşumu gözlenmiştir (Şekil 15). Bu büyük çatlaklar donatı şekildeğiştirmelerini artırarak kopmaya sebep olmuş ve kırılmada belirleyici olmuştur. Bu aşamada lifli kirişlerdeki çatlakların lifsiz duruma göre 2.00-3.21 kat fazla olduğu belirlenmiştir (Şekil 16).



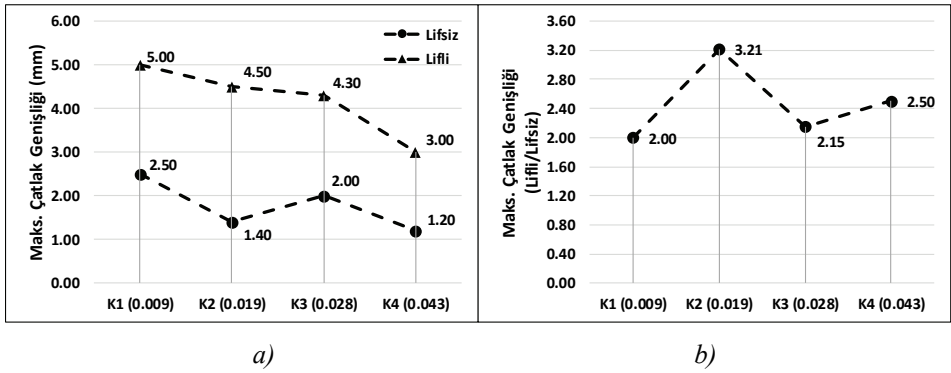
Şekil 13 - Kirişlerdeki Çatlak Dağılımları (L/250 Yerdeğiştirmesi)



Şekil 14 - a) Kirişlerdeki Çatlak Genişliklerinin Donatı Oranına Göre Değişimi, b) Çelik Lifli Kirişlerdeki Çatlak Genişliklerinin Lifsiz Duruma Göre Değişimi (L/250)



Şekil 15 - Kirişlerdeki Çatlak Dağılımları (L/70 Yerdeğiştirmesi)

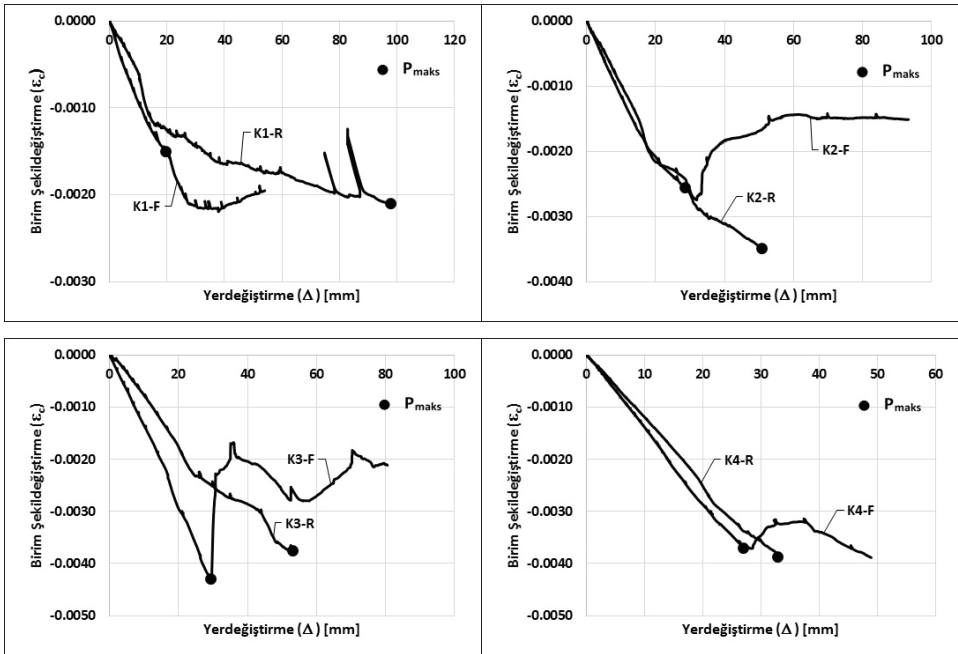


Şekil 16 - a) Kirişlerdeki Çatlak Genişliklerinin Donatı Oranına Göre Değişimi, b) Çelik Lifli Kirişlerdeki Çatlak Genişliklerinin Lifsiz Duruma Göre Değişimi (L/70)

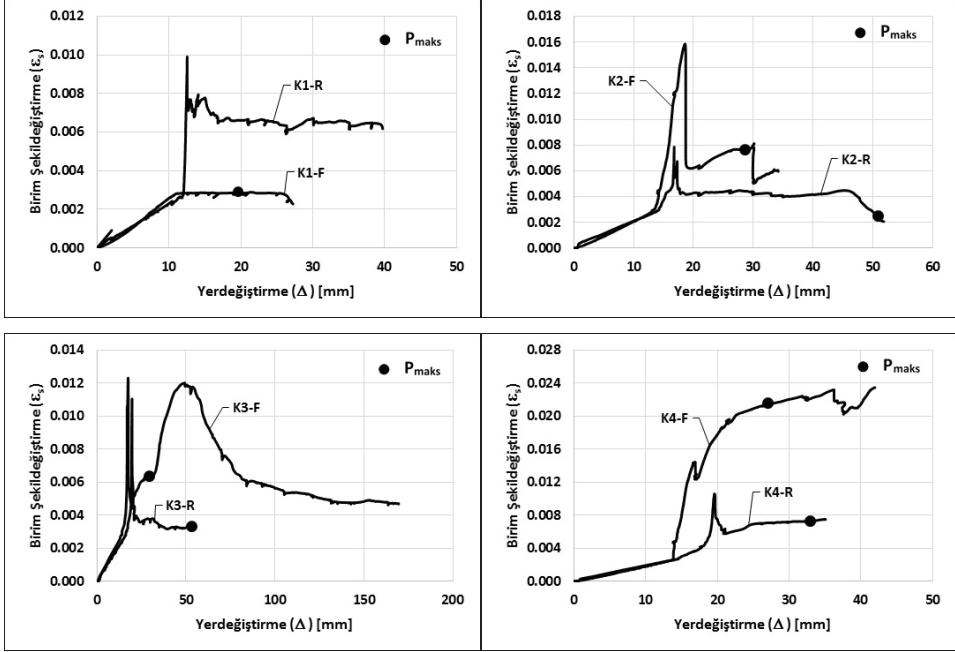
2.4.5. Beton ve Donatı Çeliğinin Şekildeğiştirme Davranışları

Lifli betonun ve lifli beton içerisindeki çekme donatısının şekildeğiştirme davranışları, yapı elamanlarının tasarım esaslarının geliştirilmesi bakımından önem arz etmektedir. Bu nedenle, kirişlerde en büyük şekildeğiştirmelerin olduğu kiriş orta bölgesindeki beton ve donatı için şekildeğiştirme ölçümleri yapılmıştır. Kirişlerin en dış beton basınç lifleri (üç adet) ve çekme donatılarının her biri için şekildeğiştirme ölçümleri yapılmıştır (Şekil 5). Her bir kiriş için en büyük birim şekildeğiştirmelerin elde edildiği ölçümler, lifli ve lifsiz kirişler için Şekil 17-18'de karşılaştırılmıştır. Yerdeğiştirmeye bağlı olarak sunulan bu grafiklerde maksimum yüke (P_{maks}) karşılık gelen noktalar grafik üzerine işaretlenmiştir.

Lifsiz kirişlerde beton için elde edilen maksimum beton şekildeğiştirmelerinin 0.0021-0.0039 arasında, çelik lifli kirişlerde ise 0.0022-0.0043 arasında değiştiği görülmektedir (Şekil 17). Yüksek donatı oranına sahip K3-F ve K4-F kirişlerinde maksimum beton şekildeğiştirmesi maksimum yük değerinde elde edilmiş ve bu değer beton ezilmesi gözlenmiştir. Düşük donatı oranına sahip K1-F ve K2-F kirişlerinde ise maksimum beton şekildeğiştirmesi, maksimum yük sonrası belirli bir dayanım azalması gerçekleştiği sonra gözlenmiştir. Bu durum düşük donatı oranlı kirişlerde dayanım azalmalarının beton ezilmesinden değil, çekme bölgesindeki liflerin sıyrılmasından kaynaklandığını göstermektedir.



Şekil 17 - Lifli ve Lifsiz Kirişlerin Beton Şekildeğiştirmelerinin Karşılaştırılması



Şekil 18 - Lifli ve Lifsiz Kirişlerin Donatı Şekildeğiştirmelerinin Karşılaştırılması

En düşük donatı oranına sahip K1 kirişinde lifsiz durumda donatı şekildeğiştirmesi daha yüksek elde edilirken, donatı oranı arttıkça lifli kirişlerde elde edilen şekildeğiştirmeler lifsiz kirişlerdekilerin çok üzerine çıkmıştır (Şekil 18). Lifli kirişlerde geleneksel betonarmedekinin aksine, donatı oranı arttıkça donatı şekildeğiştirmeleri de artmıştır. En yüksek donatı oranına sahip K4-F kirişinde yük taşıma kapasitesine ulaşıldığında donatı pekleşme bölgesine geçerken, diğer kirişlerde daha düşük düzeylerde kalmıştır.

Bu sonuçlar, lifli kirişlerde taşıma kapasitesine ulaşıldığı andaki beton ve çelik şekildeğiştirme değerlerinin donatı oranına bağlı olarak geleneksel betonarmeden farklı değerler alabildiğini göstermektedir. UYPLB'da kullanılan lif oranının da bunda etkili olacağı söylenebilmektedir.

3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada, betonarme kirişlerde Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) kullanımının, kiriş yerdeğiştirme ve eğrilik sünekliği, taşıma kapasitesi, eğilme rijitliği, kırılma şekilleri ve çatlak davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Kullanılan beton içeriğinde %1.0 oranında düz mikro lif ve %0.5 oranında kancalı makro lif karma olarak kullanılmıştır. Düşük ve yüksek çekme donatısı oranlarını temsil eden ($\rho=0.009-0.043$) dokuz adet kiriş üzerinde dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiş ve salt eğilme davranışları incelenmiştir. İncelenen betonarme kirişlerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- UYPLB içeren kirişlerde yerdeğiştirme süneklikleri 2.59-5.03 arasında, eğrilik süneklikleri 7.35-19.94 arasında elde edilmiştir. $\rho=0.019$ 'luk donatı oranı ve daha yüksek donatı oranları için sünekliklerde lifsiz duruma göre %42-%91 artış sağlanmıştır. Düşük donatı oranında ($\rho=0.009$) ise lif kullanımı literatürdeki çalışmalarda da görüldüğü gibi yerdeğiştirme sünekliğinde önemli oranda azalmaya neden olmuştur. Bununla birlikte, incelenen tüm donatı oranları için yeterli sünekliğin sağlanabildiği belirlenmiştir. Buna göre, UYPLB'un yüksek basınç kapasitesinin etkin olarak kullanılabilmesi ve daha ekonomik kiriş boyutlarının uygulanabilmesi için yüksek donatı oranlarının kullanılabilceği düşünülmektedir.
- Yük/moment taşıma kapasiteleri bakımından UYPLB kullanımının lifsiz duruma göre %15-%48 oranında artış sağladığı belirlenmiştir. Taşıma kapasitesindeki artışlar donatı miktarı ile ters orantılı olarak değişim göstermiştir.
- Kirişlerin orta bölgesindeki etkin eğilme rijitlikleri, UYPLB kullanımı ile lifsiz duruma göre ortalama %10 arttırmıştır. Eğilme rijitliklerinin değişimi ile donatı oranı arasında belirli bir eğilim tespit edilmemiştir.
- UYPLB kullanımı ile elastik davranış bölgesindeki maksimum çatlak genişliklerinde ortalama %28 azalma meydana gelmiştir. Taşıma gücü sınır durumunu temsil eden plastik davranış bölgesinde ise, maksimum çatlak genişlikleri lifsiz duruma göre ortalama 2.5 kat artmıştır. Çatlak genişliklerinin değişimi ile donatı oranı arasında belirli bir eğilim görülmemiştir.
- UYPLB kullanımı kirişlerdeki çatlak dağılımını geleneksel betonarmeye göre büyük ölçüde değiştirmiştir. Kiriş boyunca genel olarak çok sayıda küçük çatlak oluşmakla birlikte, taşıma kapasitesine ulaşıldıktan sonra orta bölgede bir veya iki büyük çatlak oluşmakta ve bunlar kırılmanın (göçmenin) donatı kopması ile gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Ancak, bu aşamaya kadar olan kısımda lifli betonun basınç sünekliği sayesinde büyük şekildeğiştirme kapasitesi sağlanabilmektedir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlar, kirişlerde UYPLB kullanımının süneklik, taşıma kapasitesi, eğilme rijitliği ve elastik bölgedeki çatlak genişliklerini sınırlama bakımından önemli avantajlar sağladığını göstermektedir. Bu avantajlar kullanılan lif içeriğine (tipine ve miktarına) ve donatı oranına bağlı olarak önemli değişimler gösterebilecektir. Bu sonuçlar ışığı altında, farklı lif içerikleri ve donatı oranları için benzer çalışmaların yapılması, UYPLB'un sayısal hesap yöntemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

Semboller

EI_e : Etkin eğilme rijitliği

f_y : Donatı akma dayanımı

f_u : Donatı çekme dayanımı

M_{maks} : Moment taşıma kapasitesi

M_{den} : Deneysel moment taşıma kapasitesi

M_{teo} : Teorik moment taşıma kapasitesi

- M_u : Maksimum eğriliğe karşılık gelen moment taşıma kapasitesi
 M_y : Akma momenti
 L : Kiriş açıklığı
 P : Yük
 P_{maks} : Yük taşıma kapasitesi
 P_u : Maksimum yerdeğiştirmeye karşılık gelen yük taşıma kapasitesi
 P_y : Akma yükü
 Δ : Sehim (düşey yerdeğiştirme)
 Δ_u : Maksimum yerdeğiştirme
 Δ_y : Akma yerdeğiştirmesi
 ϵ_c : Beton birim şekildeğiştirmesi
 ϕ_y : Akma eğriliği
 ϕ_u : Maksimum eğrilik
 μ_Δ : Yerdeğiştirme sünekliği
 μ_ϕ : Eğrilik sünekliği
 ρ : Çekme donatısı oranı
 ρ_b : Dengeli donatı oranı

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmaya 113M432 nolu proje kapsamında destek sağlayan TÜBİTAK'a ve akışkanlaştırıcı katkıları konusunda destek sağlayan BASF firmasına teşekkürlerini sunarlar.

Kaynaklar

- [1] Wille, K., Naaman, A. E., Parra-Montesinos, G. J., Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 Mpa (22 ksi): a simpler way, ACI Materials Journal, 108, 1, 46-54, 2011.
- [2] Wille, K., Naaman, A. E., El-Tawil, S., Parra-Montesinos, G. J., Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing, Materials and Structures, 45, 309-324, 2012.
- [3] Wang, C., Yang, C., Liu, F., Wan, C., Pu, X., Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials, Cement and Concrete Composites, 34, 538-544, 2012.

- [4] Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., Aydın, S., Karabulut, A. S., Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes, *Construction and Building Materials*, 23, 1223-31, 2009.
- [5] Yudenfreund, M., Skalny, J., Mikhail, R.S., Brunauer, S., Hardened portland cement pastes of low porosity, II. Exploratory studies, Dimensional changes, *Cement and Concrete Research*, 2, 3, 331-348, 1972.
- [6] Roy, D. M., Gouda, G. R., Bobrowsky, A., Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques, *Cement and Concrete Research*, 2, 349-366, 1972.
- [7] Bache, H. H., *Densified cement/ultrafine particle-based materials*. 2nd int. Conference on superplasticizers in concrete, Ottawa, 1981.
- [8] Richard, P., Cheyrezy, M., *Composition of reactive powder concretes*. *Cement and Concrete Research*, 25, 7, 1501-1511, 1995.
- [9] AFGC, *Recommendation: Ultra high performance fibre-reinforced concretes*, revised ed., Association Française de Génie Civil; Service d'études techniques des routes et autoroutes, 2013.
- [10] Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Leutbecher, T., Frönlich, S., *Ultra-High Performance Concrete UHPC*, Betonkalender, Wilhelm Ernst & Sohn, 2014.
- [11] JSCE, *Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks*, Concrete Engineering Series, 82, Japan Society of Civil Engineers, 2008.
- [12] Russell, H. G., Graybeal, B. A., *Ultra-high performance concrete: a state-of-the-art report project bridge community*, FHWA Publication HRT-13-060, Federal Highway Administration, 2013.
- [13] Gowripalan, N., Gilbert, I., *Design guidelines for ductal prestressed concrete beams*, VSL Australia, 2000.
- [14] Naaman, A. E., *High performance fiber reinforced cement composites classification and applications*, CBM-C1 International workshop, Karachi, Pakistan, 389-400, 2007.
- [15] Taşdemir, M. A., Bayromov, F., *Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı, itüdergisi/d, mühendislik serisi*, 1, 2, 125-144, 2002.
- [16] SAMARIS, *Report D22, Full scale application of UHPFRC project rehabilitation of bridges-from the lab to the field*, European project 5th FWP/SAMARIS-Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructures-WP 14: HPRCC, 2005.
- [17] 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, 127-136, 2013.
- [18] Wang, Y. C., Lee, M. G., *Ultra-high strength steel fiber reinforced concrete for strengthening of RC frames*, *Journal of Marine Science and Technology*, 15, 3, 210-218, 2007.

- [19] Tayeh, B. A., Bakar, B. H. A., Johari, M. A. M., Voo, Y. L., Utilization of ultra-high performance fibre concrete (UHPFC) for rehabilitation-A review, *Procedia Engineering*, 54, 525-538, 2013.
- [20] İlki, A., Demir, C., Bedirhanoglu, I., Kumbasar, N. "Seismic retrofit of brittle and low strength RC columns using fiber reinforced polymer and cementitious composites", *Journal of Advances in Structural Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 325-347, 2009.
- [21] Yavaş, A., Türker, K., Terzi, M., Hasgül, U., Birol, T., Gören, A., Ultra yüksek dayanımlı lifli beton ile güçlendirilmiş betonarme kolonların tersinir yükler altındaki davranışının incelenmesi, Sekizinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, Türkiye, 2015.
- [22] Tanarlan H.M., Alver N., Jahangiri, R., Yaçınkaya, Ç., Yazıcı, H. Flexural strengthening of RC beams using UHPFRC laminates: Bonding techniques and rebar addition, *Construction and Building Materials*, 155, 45–55, 2017.
- [23] Guan, Q., Zhang, P., Xie, X., Flexural behavior of steel fiber reinforced high-strength concrete beams, *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 6, 1, 1-6, 2013.
- [24] Yang, I., Joh, C., Kim, B., Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending, *Engineering Structures*, 32, 3478-3487, 2010.
- [25] Khalil, W. I., Tayfur, Y. R., Flexural strength of fibrous ultra high performance reinforced concrete beams, *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 8, 3, 200-214, 2013.
- [26] Stürwald, S., Fehling, E., Design of reinforced UHPFRC in flexure, 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel University Press, Germany, 403-410, 2012.
- [27] Dancygier, A. N., Savir, Z., Flexural behavior of HSFRC with low reinforcement ratios, *Engineering Structures*, 28, 1503-1512, 2006.
- [28] Türker, K., Birol, T., Yavaş, A., Hasgül, U., Ultra yüksek performanslı lifli beton içeren kirişlerde etkin çelik lif tipi incelemesi, *Afyon Kocatepe Ü. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 776-785, 2016.
- [29] Ashour, S. A., Wafa, F. F., Flexural behavior of high-strength fiber reinforced concrete beams, *ACI Structural Journal*, 90, 3, 279-287, 1993.
- [30] Yoo, D. Y., Yoon, Y. S., Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers, *Engineering Structures*, 102, 409-423, 2015.
- [31] Bertram, G., Hegger, J., Shear carrying capacity of ultra-high performance concrete beams, 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, Tokyo, Japan, 2008.
- [32] Voo, Y. L., Poon, W. K., Foster, S. J., Shear strength of steel fiber-reinforced ultra-high performance concrete beams without stirrups, *Journal of Structural Engineering*, 136, 11, 1393-1400, 2010.

- [33] Sudheer Reedy, L., Ramana Rua, N. V., Gunneswara Rao, T. D., Shear resistance of high strength concrete beams without shear reinforcement, *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 1, 1, 101-113, 2010.
- [34] ACI 318-14, Building code requirements for structural concrete and commentary, ACI Standard, American Concrete Institute, 2014.
- [35] Sivakamur, A., Santhanam, M. Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres, *Cement and Concrete Composites*, 29, 603-608, 2007.
- [36] Yoo, D. Y., Lee, J. H., Yoon, Y. S. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites, *Composite Structures*, 106, 742-753, 2013.
- [37] Marković, I., High-performance hybrid-fibre concrete-development and utilization, Ph.D. Dissertation, Delft University of Technology, 2006.
- [38] Kim, D. J., Park, S. H., Ryu, G. S., Koh, K. T., Comparative flexural behavior of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers, *Construction and Building Materials*, 25, 4144-4155, 2011.
- [39] Rossi, P., Arca, A., Parant, E., Fakhri, P., Bending and compressive behaviors of a new cement composite, *Cement and Concrete Research*, 35, 1, 27-33, 2005.
- [40] Birol, T. Ultra yüksek performanslı lifli beton ile üretilen betonarme kirişlerin eğilme davranışının incelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2016.
- [41] Türk Standartları Enstitüsü, TS500: Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, Bakanlıklar, Ankara, 2000.
- [42] 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.
- [43] Yoo, D., Yoon, Y., Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers, *Engineering Structures*, 102, 409–423, 2015.
- [44] Dancygier, A.N., Berkover, E., Cracking localization and reduced ductility in fiber-reinforced concretebeams with low reinforcement ratios *Engineering Structures* 111, 411–424, 2016.
- [45] Park, R., Ruitong, D., Ductility of doubly reinforced concrete beam sections, *ACI Structural Journal*, 85, 2, 217-225, 1988.
- [46] Rashid, M. A., Mansur, M. A., Reinforced high-strenght beams in flexure, *ACI Structural Journal*, 84, 4, 330-341, 2005.

