

AKÜ FEMÜBİD 16 (2016) 037201 (776-785)
DOI: 10.5578/fmbd.39342

AKU J. Sci. Eng. 16 (2016) 037201 (776-785)

Araştırma Makalesi / Research Article

Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton İçeren Kirişlerde Etkin Çelik Lif Tipi İncelemesi

Kaan TÜRKER¹, Tamer Birol¹, Altuğ Yavaş¹, Umut Hasgül¹

¹Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balıkesir
e-posta: kturker@balikesir.edu.tr

Geliş Tarihi: 26.06.2016 ; Kabul Tarihi: 05.12.2016

Özet

Anahtar kelimeler
Ultra yüksek performanslı lifli beton; Çelik lif; Betonarme kiriş; Eğilme davranışı.

Çalışmada, ultra yüksek performanslı lifli beton içeren betonarme kirişlerde eğilme davranışı bakımından etkin çelik lif tipinin deneysel olarak incelemesi yapılmıştır. Bunun için biri lifsiz, diğer dördü farklı çelik lif tipi içeren beş adet 100x150x1500 mm boyutlarında kiriş üzerinde eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 120 MPa üzeri basınç dayanımına sahip, hacimce %1.5 oranında çelik lif içeren beton kullanılmıştır. Lif olarak düz mikro lif tipi (F6), iki adet tek kancalı makro lif tipi (F30 ve F60_1) ve bir adet çift kancalı lif tipi (F60_2) incelenmiştir. Eğilmede etkin çelik lif tipi değerlendirmesi yerdeğiştirme süneklikleri, yük taşıma kapasiteleri ve çatlak özelliklerine göre yapılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlardan; yük taşıma kapasitesi ve çatlakları sınırlandırma bakımından çift kancalı makro lifin (F60_2), yerdeğiştirme sünekliği bakımından ise düz mikro lifin (F6) en etkin lif olduğu belirlenmiştir.

Effective Steel Fiber Type Investigation on Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete Beams

Abstract

Keywords
Ultra high performance fiber reinforced concrete; Steel fiber; Reinforced concrete beam; Flexural behavior.

This study investigates the effective steel fiber type on ultra high performance fiber reinforced concrete beams with respect to flexural behavior. Five 100x150x1500 mm reinforced concrete beams, one is non-fiber and the others include four different steel fiber types, were tested in flexure. The concrete used in this study had compressive strength over 120 MPa and included 1.5% steel fibers by volume. Two types of hooked macro steel fibers (F30 and F60_1), double hooked macro (F60_2) and straight micro (F6) steel fibers were investigated. Evaluation of the effective steel fiber type on the flexural behavior were performed in terms of displacement ductility, load bearing capacity and cracking behavior. From the results of the study, it is determined that the most effective steel fiber for load bearing capacity and cracking control is double hooked steel fiber (F60_2) and most effective fiber for displacement ductility is straight micro fiber (F6).

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1.Giriş

Son yıllarda beton teknolojisindeki gelişmeler ile ultra yüksek dayanımlı ve çelik lif takviyeli betonlar yeni bir kompozit yapı malzemesi olarak ortaya çıkmış ve çeşitli mühendislik uygulamalarındaki kullanımları yaygınlaşmıştır. Maksimum sıklık oranına sahip içyapı, ince ve yüksek mukavemetli agrega ve çok düşük su/bağlayıcı oranı ile üretilen bu betonlarda 100–150 MPa basınç dayanımları elde edilebilmektedir (Wille et al. 2011; Wille et al.

2012; Wang et al. 2012; Yazıcı et al. 2009). Özel karıştırıcılar, yüksek performanslı beton kimyasalları veya özel kür koşulları (ısı, basınç vb.) uygulanması durumunda ise çok daha yüksek dayanımlara (200 MPa ve üzeri) ulaşılabilir (Yudenfreund et al 1972; Roy et al. 1792; Bache, 1981; Richard and Cheyrezy 1995). Bu betonlara çelik, sentetik, vb. lifler takviye edilerek basınç, çekme ve eğilme etkisi altında oldukça sünek bir davranış elde edilmektedir. Üstün mekanik

özellikleri ile beraber, 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 Kompozitleri* vb. tanımlamalar yapılmaktadır (AFGC, 2013; Fehling et al. 2014; JSCE, 2088; Russell and Graybeal 2013; Naaman, 2007).

UYPLB birçok yapı elemanında geleneksel betonlara göre çeşitli avantajlar sağlama potansiyeline sahiptir. Günümüzde UYPLB, üstün mekanik özellikleri ve durabilitesi nedeniyle çevre koşullarına maruz betonarme köprü, viyadük, iskele, liman vb. yapıların onarım ve koruma amaçlı takviyesinde kullanım alanı bulmaktadır (SAMARIS, 2005; Moreillon and Menétrey 2013). Bu tür betonların basınç dayanımları ile birlikte elastisite modüllerinin de geleneksel betonlara göre yüksek olması, yapılarda daha küçük kesitli (narin) eleman kullanımına olanak vermektedir (Graybeal B.A. 2007; Fehling et al. 2014). Buna bağlı olarak yapı ağırlığı, deprem yükleri ve temel boyutları azaltılarak önemli ekonomi sağlanmakta ve daha estetik yapılar elde edilebilmektedir. Ayrıca, kullanılan lifler sayesinde kesme dayanımının da yüksek olması, bu betonların yapısal elemanlarda kullanımını cazip hale getiren bir diğer özelliktir. Bu özellikleri nedeniyle yapısal kirişlerde de kullanım alanı bulmaktadır.

UYPLB'un mekanik özellikleri lif içeriğine bağlı olarak büyük çeşitlilik göstermektedir. Farklı lif tiplerinin ve oranlarının UYPLB üzerindeki etkileri konusunda malzeme esaslı çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Ancak bu tür betonların betonarme elemanlarda kullanımı ile ilgili çalışmalar kısıtlıdır. Yapılan çalışmalarda bu betonların geleneksel donatılı betonarme kiriş elemanlarda kullanımının önemli avantajlar sağlama potansiyeli rapor edilmiştir (Kamal et al. 2014; Yang et al. 2010; Stürwald and Fehling 2012; Dancygier and Savir 2006; Bertram and Hegger 2008; Voo et al. 2010). UYPLB'larda yüksek basınç dayanımının ve sünekliğinin yanında önemli mertebede çekme dayanımının olması bu betonlar ile üretilmiş betonarme elemanların davranışlarını da önemli

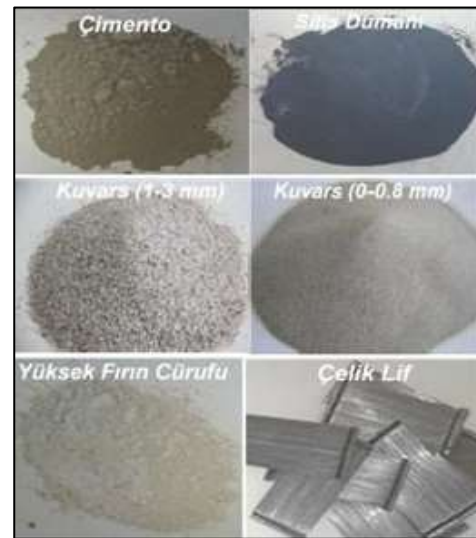
ölçüde değiştirmektedir. Bu nedenle geleneksel tasarım yaklaşımları, matematik modeller ve standartlar UYPLB için geçerli olmamaktadır. Farklı yapısal elemanlar üzerinde çeşitli davranış parametrelerinin incelendiği çok sayıda deneysel veriye ihtiyaç bulunmaktadır. Bu konuda yapılacak çalışmalar UYPLB'un tasarım standartlarının oluşturulmasına ve yaygın kullanım alanı bulmasına fayda sağlayacaktır.

Bu çalışmada, UYPLB içeren betonarme kirişlerde eğilme davranışı bakımından etkin lif tipinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Bunun için biri lifsiz, diğer dördü farklı çelik lif tipi içeren toplam beş adet 100x150x1500 mm boyutlarında kiriş üzerinde eğilme testleri uygulanmıştır. Çalışmada 120 MPa üzeri basınç dayanımına sahip hacimce %1.5 oranında çelik lif içeren beton kullanılmıştır. Testlerden elde edilen yerdeğiştirme süneklikleri, yük taşıma kapasiteleri ve çatlak özellikleri karşılaştırılarak çelik lif tiplerinin etkinlikleri belirlenmiştir.

2. Deneysel Çalışma Programı

2.1. Ultra yüksek performanslı lifli betonun (UYPLB) özellikleri

Çalışmada incelenen kirişlerde kullanılmak üzere 28 günlük basınç dayanımı en az 120 MPa olan UYPLB üretilmesi öngörülmüştür. Betonun bağlayıcı kısmı CEM I 42.5 sınıf portland çimentosu, silis dumanı ve yüksek fırın cürufundan oluşmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. UYPLB'u oluşturan bileşenler

Agrega olarak iki farklı boyutta yüksek dayanımlı kuvars agregası kullanılmıştır (Şekil 1). UYPLB çok düşük su/bağlayıcı oranına sahip olduğundan, betonun işlenebilirliğinin sağlanması için ASTM C 494 (2015) F tipi polikarbosilik eter esaslı yeni nesil süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. UYPLB'larda 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 çıktığında işlenebilirlik azalmakta, daha düşük oranlarda lif kullanılması halinde ise mekanik özelliklerdeki katkılar düşük düzeyde kalmaktadır. Buna bağlı olarak bu çalışmada betona hacimce % 1.5 oranında çelik lif katılması öngörülmüştür. Buna göre her bir kirişte 3.04 kg çelik lif kullanılmıştır. Betonun oluşturan bileşenlerin çimentoya ağırlıkça oranları Tablo 1'de verilmiştir.

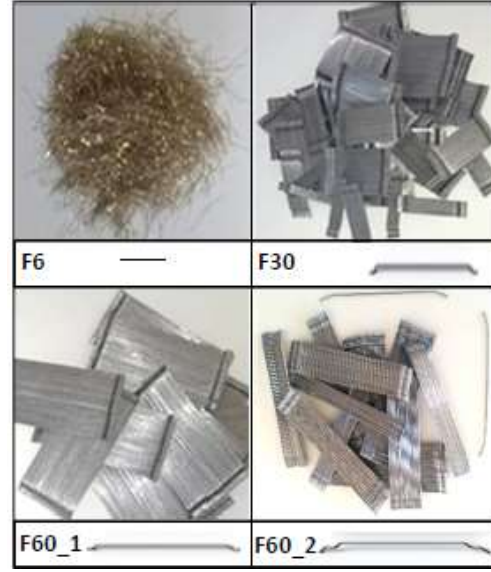
Tablo 1. Betonun oluşturan bileşenlerin çimentoya ağırlıkça oranları

Çimento	1.00	0-0.8 mm Kuvars	0.77
Silis Dumanı	0.20	1-3 mm Kuvars	0.77
Yüksek Fırın Cürufu	0.40	Su/Bağlayıcı	0.18
Süper Akışkanlaştırıcı	0.028	Çelik Lif	0.17

Çalışmada biri mikro boyutta, üçü makro boyutta olmak üzere 4 farklı çelik lif tipi incelenmiştir. Kullanılan çelik liflerin boyutları ve mekanik özellikleri Tablo 2'de, şekilleri Şekil 2'de verilmiştir. F6 düz mikro lifi, F30 ve F60_1 tek kancalı makro lifleri, F60_2 ise çift kancalı makro lifi tanımlamaktadır.

Tablo 2. Çelik liflerin boyutları ve mekanik özellikleri

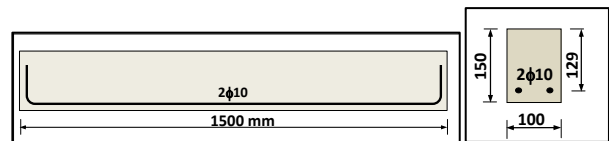
Adı	Tipi	Çap (mm)	Boy (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
F6	Düz	0.16	13	2500	210000
F30	Tek Kancalı	0.55	30	1345	
F60_1	Tek Kancalı	0.75	60	1225	
F60_2	Çift Kancalı	0.90	60	1500	



Şekil 2. Çalışmada kullanılan çelik lif tipleri

2.2 Test kirişlerinin özellikleri

Çalışmada incelenmek üzere beş adet 100x150x1500 mm boyutlarında test kirişi üretilmiştir. Kirişlerin geometrik özellikleri ve tipik donatı yerleşimi Şekil 3'te verilmiştir. Kirişlerden bir tanesi diğer kirişlerle karşılaştırmak amacıyla (referans numunesi olarak) liffsiz imal edilmiştir. Diğer dört kirişin her biri % 1.5 oranında farklı çelik lif tipi içermektedir. Çalışmada sünek çekme kırılması davranışının incelenmesi amaçlandığından kirişlere çekme donatısı olarak yaklaşık % 1.0 (2φ10) donatı koyulmuştur. Donatıların mekanik özellikleri Tablo 3'te verilmiştir. Kirişlerde lifli betonun basınç altındaki sünek davranışının gözlemlenmesi için basınç donatısı kullanılmamıştır. Kirişlerin kesme kuvveti taşıma kapasiteleri liflerin de katkısıyla, beklenen kesmeden büyük olduğundan kesme donatısına gerek duyulmamıştır.



Şekil 3. Test kirişlerinin geometrik özellikleri ve donatı yerleşimi

Tablo 3. Test kirişlerinin donatı karakteristik dayanımları

Kiriş Kodu	K1	K2	K3	K4	K5
Çelik Akma Dayanımı (MPa)	465	498	487	487	596
Çelik Kopma Dayanımı (MPa)	560	593	590	590	672

Çalışmada kullanılan UYPLB, 125 dm³ kapasiteli standart bir panmikserde üretilmiş ve kovalar aracılığı ile çelik kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 4) UYPLB'un basınç dayanımını belirlemek amacıyla her bir kiriş için 6 adet 100x100x100 mm'lik küp numune alınmıştır. Test kirişleri dökümden sonra plastik örtü ile sarılarak üç gün laboratuvar ortamı sıcaklığında kurlenmiştir. Kalıptan çıkarılan kirişler test tarihine kadar laboratuvar ortamı sıcaklığında bekletilmiştir. Betonarme kirişlerdeki lif içerikleri ve betonun test günündeki basınç dayanımları Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 4. UYPLB'nun panmikserde hazırlanması aşamaları

Tablo 4. Test kirişlerinin ortalama basınç dayanımları

Kiriş Kodu	K1	K2	K3	K4	K5
Lif İçeriği	Lifsiz	F6	F30	F60_1	F60_2
Beton Yaşı (Gün)	92	45	62	80	86
Basınç Dayanımı (MPa)	125	156	160	158	162
Standart Sapma	6.4	3.2	7.3	2.0	6.3

2.3 Test düzeneği ve yapılan ölçümler

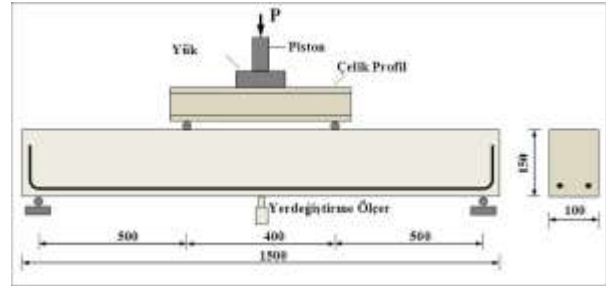
Kirişlerin eğilme testleri, Balıkesir Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan dört noktalı

eğilme test düzeneği ile yapılmıştır. Bu düzenekte, 500 kN kapasiteli hidrolik bir yük veren aracılığı ile kirişlerin testleri yerdeğiştirme kontrollü olarak



Şekil 5. Kirişler için eğilme test düzeneği

Kirişin düşey yerdeğiştirmesini ölçmek için kiriş açıklık ortasına bir potansiyometrik cetvel ve uygulanan yükü ölçmek için yük verenin altına bir yük hücresi (load cell) yerleştirilmiştir. Yük, rijit çelik bir profil aracılığıyla aralarında 400 mm olan iki tekil yüke dönüştürülerek kirişe uygulanmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Şematik yükleme ve ölçüm düzeneği

3. Deneysel Çalışmanın Sonuçları

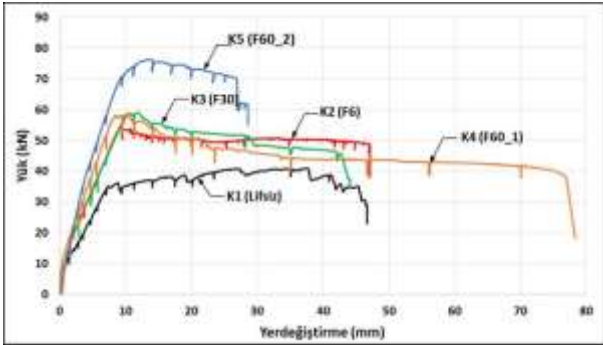
İncelenen kirişler için, göçme yüküne kadar yükleme yapılarak kırılma mekanizmaları belirlenmiştir. Çekme donatısı oranları denge altı olduğu için beklenildiği gibi tüm kirişlerde betonda ezilme olmadan önce donatı akmış ve sünek kırılma gözlemlenmiştir (Şekil 7). Bununla birlikte tüm kirişlerde eğilme davranışları basınç bölgesindeki betonun ezilmesi ile sonuçlanmıştır. Kirişlerin kesme kapasiteleri yeterli olduğu için kesme kırılması oluşmamıştır. Lifsiz kirişte orta bölgede benzer genişlikte çok sayıda çatlak oluşurken, lifli

kirişlerin tümünde tipik olarak orta bölgede büyük bir çatlak oluşumu gözlenmiştir.



Şekil 7. Eğilme testleri sonucu kırılma yüküne ulaşan betonarme kirişler

Test kirişlerinin eğilme davranışını değerlendirmek amacıyla, her bir kiriş için yük-açıklık ortası düşey yerdeğiştirme grafikleri elde edilmiştir (Şekil 8). UYPLB bünyesindeki lifler sayesinde basınç altında sargılı betona benzer davranış göstermektedir. Beton ezilme şekildeğiştirmesine ulaştığında dayanım azalmaları gözlenmekte, ancak liflerin sağladığı şekildeğiştirme kapasitesi, elemanın maksimum yük sonrasında da büyük plastik yerdeğiştirme yapmasına olanak vermektedir. Bu da ani göçmeyi engellemiştir. Lifli kirişlerde lifin katkısıyla düşey yerdeğiştirme rijitliğinde de lifsiz durumu göre artış sağlandığı görülmektedir (Şekil 8).

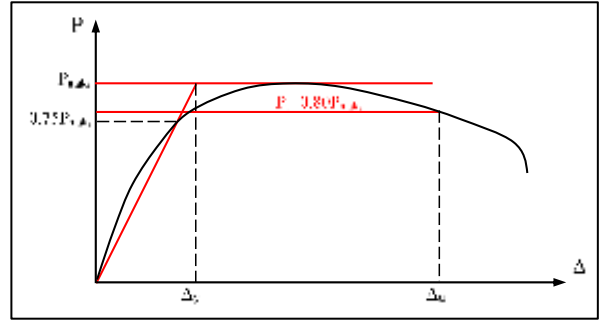


Şekil 8. Test kirişlerine ait yük-düşey yerdeğiştirme davranışlarının karşılaştırılması

3.1 Yerdeğiştirme süneklikleri

Çelik lif tipinin süneklik üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla kiriş testlerinden elde edilen

yerdeğiştirme süneklikleri belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bunun için öncelikle *Yük-düşey yerdeğiştirme* ilişkileri 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, *ideal elasto-plastik* davranıştaki akmayı esas alan azaltılmış rijitlik yaklaşımı kullanılmıştır (Şekil 9) (Park, 1988). Lifler sayesinde kirişlerde büyük yerdeğiştirmeler elde edilmekte, bununla birlikte dayanım azalmaları da gözlenmektedir. Çalışmada maksimum yerdeğiştirmenin hesabında en fazla % 20'lik dayanım azalması göz önüne alınmıştır (Park, 1988). Maksimum yerdeğiştirme ve akma yerdeğiştirmesi kullanılarak her bir kiriş için yerdeğiştirme sünekliğini ifade eden (Δ_u/Δ_y) değerleri elde edilmiştir (Tablo 5). Lif içeren kirişlerde elde edilen süneklik değerleri lifsiz kirişte elde edilen değere oranlanarak lif tipinin etkisi Şekil 10'da karşılaştırılmıştır.



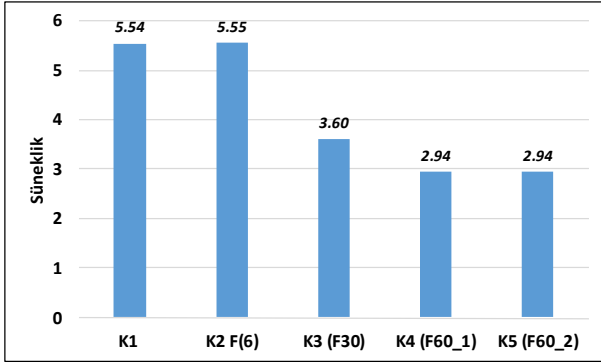
Şekil 9. Akma yerdeğiştirmesinin ve maksimum yerdeğiştirmesinin belirlenmesi

Tablo 5. Kirişlerin eğilme testlerinden elde edilen karakteristik değerler

Kiriş Kodu	P_y (kN)	Δ_y (mm)	P_{maks} (kN)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	Δ_u / Δ_y
K1	35.41	8.19	40.96	35.09	45.41	5.54
K2	51.65	8.47	54.90	48.73	46.98	5.55
K3	55.08	9.53	59.08	47.63	34.28	3.60
K4	54.95	7.69	58.98	48.17	22.63	2.94
K5	69.85	9.13	76.35	70.00	26.86	2.94

Yerdeğiştirme süneklikleri incelendiğinde; F6 lifinin lifsiz kirişle aynı sünekliği sağladığı, diğer makro lif tiplerinin (F30, F60_1, F60_2) ise sünekliği önemli ölçüde azalttığı görülmektedir (Şekil 10). Buradan

makro liflerin çekme bölgesinde ilave donatı görevi üstlenerek yüksek donatılı düşük süneklilikli kiriş davranışına yol açtığı söylenebilmektedir. Bununla birlikte sünekliliğin en düşük olduğu F60_2 lifinde dahi yerdeğiştirme sünekliliği yaklaşık üç olarak elde edilmiştir. Ayrıca lifsiz kirişte maksimum yerdeğiştirme sonrası yük taşıma kapasitesi ani olarak sonlanırken, lifli kirişlerde maksimum yerdeğiştirme sonrası halen büyük yerdeğiştirme kapasitesi kalmakta ve ani bir göçme oluşmamaktadır (Şekil 8).

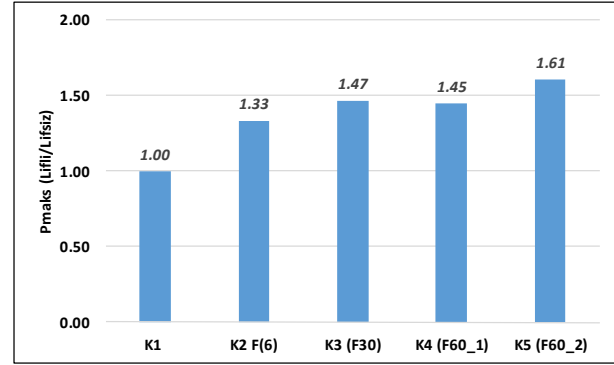


Şekil 10. Lif tiplerinin süneklilik üzerindeki etkisinin karşılaştırılması

3.2. Yük taşıma kapasiteleri ve artık yük oranları

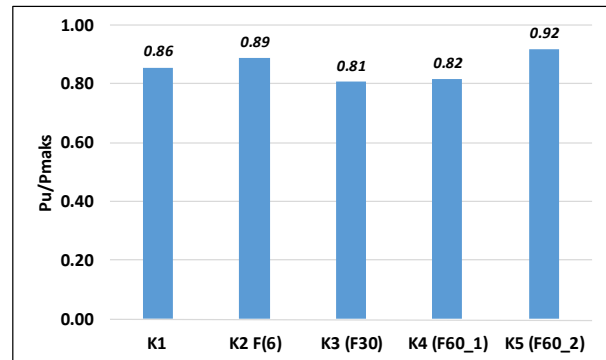
Çelik lif tipinin yük taşıma kapasitesine olan etkisini belirlemek amacıyla lifli kirişlerde elde edilen yük taşıma kapasiteleri lifsiz kirişte elde edilen değere oranlanarak lif tipinin etkisi Şekil 11'de karşılaştırılmıştır. Ancak kirişlerin deneysel yük-yerdeğiştirme bağıntılarından elde edilen kapasiteler çekme donatısının dayanımındaki farklılıklar nedeniyle lifin etkisini net olarak gösterememektedir. Bunun için her bir kirişte lifsiz duruma ait moment-eğrilik analizi yapılarak yük taşıma kapasiteleri belirlenmiş ve lifli durumdaki deneysel kapasiteler bu teorik kapasitelere oranlanmıştır (Şekil 11). Böylece lifin taşıma kapasitesi üzerindeki net etkisi ortaya konmuştur. Lifsiz duruma ait teorik analizlerde ultra yüksek dayanımlı beton için Fehling et al. (2014)'de önerilen karakteristikler kullanılmış ve analizler Sap2000 Kesit analiz modülü ile gerçekleştirilmiştir (CSI,2002). Kirişlerdeki yük taşıma kapasiteleri incelendiğinde; çekme bölgesindeki liflerin katkısıyla lifsiz kirişe göre tüm lifli kirişlerde önemli dayanım artışı sağlanmıştır. Kapasite artışlarının %

33 ile % 61 arasında değiştiği, en düşük artışın F6 lifinde, en yüksek artışın ise F60_2 lifinde elde edildiği görülmektedir (Şekil 11).



Şekil 11. Lif tiplerinin yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisinin karşılaştırılması

Lifli numunelerde maksimum yük sonrası beton ezilmeleri nedeniyle lif tipine bağlı olarak farklı dayanım azalmaları oluşmaktadır. Liflerin maksimum yük sonrası dayanımı koruma kapasitesini karşılaştırmak amacıyla her bir kirişte, maksimum yerdeğiştirmeye karşılık gelen yük taşıma kapasitesi (P_u) maksimum yüke (P_{maks}) oranlanarak, dayanım azalmasını ifade eden *artık yük oranları* (P_u/P_{maks}) elde edilmiştir (Şekil 12). Bu oranlar incelendiğinde; F60_2 makro lifinin % 8'lik bir azalma ile diğer makro liflere göre daha iyi performans gösterdiği, F30 makro lifinin ise % 19'luk dayanım kaybı ile en düşük performansa sahip olduğu görülmektedir (Şekil 12).



Şekil 12. Lif tiplerinin artık yük oranları üzerindeki etkisinin karşılaştırılması

3.3. Çatlak özellikleri

Liflerin en önemli katkılarından biri olan çatlak sınırlama özelliği bakımından çelik lif tiplerini karşılaştırmak amacıyla, kiriş testleri esnasında düşey yerdeğiştirmenin belirli değerleri için yükleme duraklatılmış ve çatlaklar işaretlenmiştir. Ayrıca bu yerdeğiştirme değerlerinde çatlak mikroskobu ile kirişlerdeki maksimum çatlak genişlikleri ölçülmüştür. Çatlak incelemeleri, L kiriş açıklığını ifade etmek üzere, düşük yerdeğiştirmeleri temsilen L/250'lik yerdeğiştirmede, her bir kirişin kendisine ait akma yerdeğiştirmesinde ve büyük yerdeğiştirmeleri temsilen L/70'lik düşey yerdeğiştirme değerinde yapılmıştır. Çatlak dağılımları Şekil 13-15'te, çatlak genişliklerinin karşılaştırmaları Şekil 16-18'de verilmiştir.

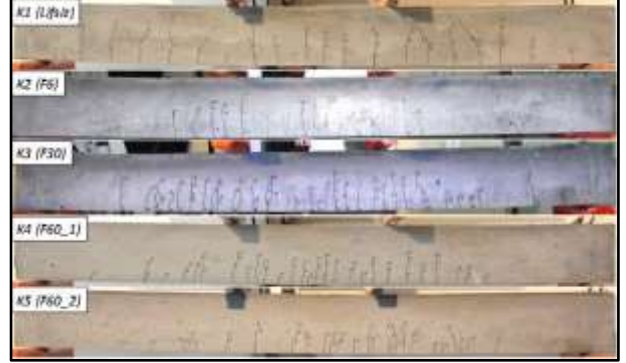
Çatlak dağılımları incelendiğinde, akma yerdeğiştirmesi ve öncesinde tüm lif tiplerinin genel olarak lifsize göre daha çok sayıda kılcal çatlak oluşturduğu, akma yerdeğiştirmesinden sonra ise orta bölgede büyük bir çatlak oluşumuna sebep olduğu görülmektedir (Şekil 13-15). F6 ve F60_2 liflerini içeren kirişlerde genel olarak diğer lif tiplerine göre çatlak sayısının daha az olduğu gözlenmektedir.

Çatlak genişlikleri incelendiğinde; lifli kirişlerde akma yerdeğiştirmesi ve öncesinde tüm çelik liflerin çatlak genişliklerini çok iyi sınırlandırdığı görülmektedir (Şekil 13-15). Çatlak genişlikleri lif kullanılması ile L/250'lik yerdeğiştirme değerinde 4-40 kat, akma yerdeğiştirmesinde 5-50 kat daha düşük elde edilmiştir. Lif tipleri arasında en düşük çatlak genişliği F60_2 lifinde elde edilmiştir. F6 mikro lifinde de F60_2 lifine yakın çatlak genişlikleri elde edilmiştir (Şekil 16).

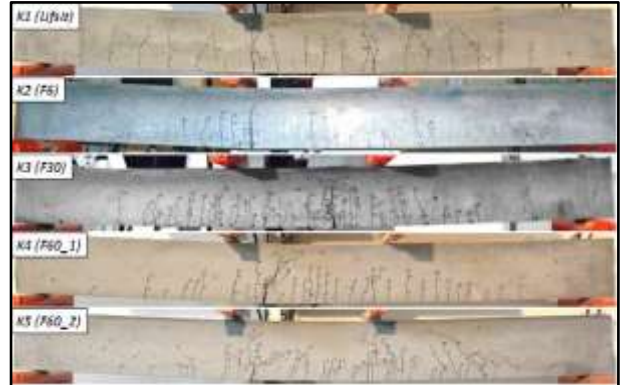
Akma yerdeğiştirmesinden sonra lifli kirişlerde orta bölgede şekildeğiştirmeler toplanarak büyük bir çatlak oluşturduğu, diğer çatlakların bu aşamadan sonra sabit kaldığı gözlenmiştir (Şekil 17).



Şekil 13. Yerdeğiştirmenin L/250 değeri için kirişlerdeki çatlak dağılımı

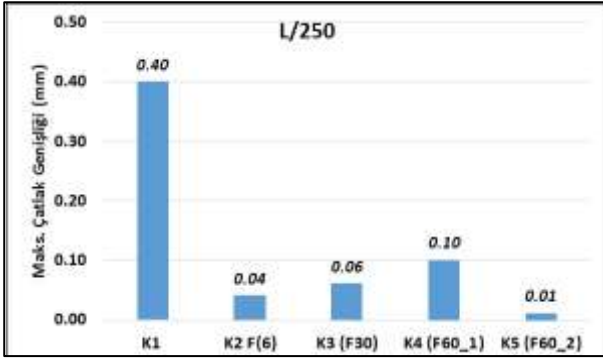


Şekil 14. Kirişlerin akma yerdeğiştirmesine ait çatlak dağılımı

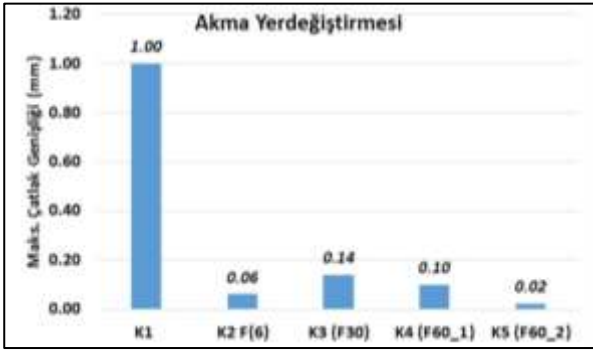


Şekil 12. Yerdeğiştirmenin L/70 değeri için kirişlerdeki çatlak dağılımı

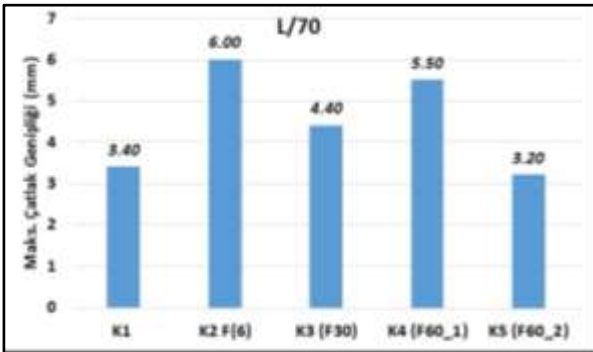
L/70'lik yerdeğiştirme değerinde F6, F30 ve F60_1 liflerini içeren kirişlerdeki orta çatlak genişliği, lifsiz kirişin maksimum çatlak genişliğini aşmakta, ancak F60_2 lifinde ise maksimum çatlak genişliği lifsizden altında kalmaktadır (Şekil 18).



Şekil 16. Yerdeğiştirmenin L/250 değeri için kirişlerdeki maksimum çatlak genişlikleri



Şekil 17. Akma yerdeğiştirmesinde kirişlerdeki maksimum çatlak genişlikleri



Şekil 18. Yerdeğiştirmenin L/70 değeri için kirişlerdeki maksimum çatlak genişlikleri

4. Sonuçlar

Çalışmada, ultra yüksek performanslı lifli betonarme kirişlerde eğilme davranışı bakımından etkin çelik lif tipinin deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bunun için biri liffsiz, diğer dördü farklı çelik lif tipi içeren toplam beş adet 100x150x1500 mm boyutlarında kiriş üzerinde eğilme testleri uygulanmıştır. Çalışmada 120 MPa üzeri basınç dayanımına sahip, hacimce %1.5 oranında çelik lif içeren beton kullanılmıştır. Lif

olarak düz mikro lif tipi (F6), iki adet tek kancalı makro lif tipi (F30 ve F60_1) ve çift kancalı lif tipi (F60_2) incelenmiştir. Eğilmede etkin çelik lif tipi değerlendirilmesi yerdeğiştirme süneklikleri, yük taşıma kapasiteleri ve çatlak özelliklerine göre yapılmıştır. Çalışmada öne çıkan bulgular aşağıda özetlenmiştir.

Tüm lif tipleri ani gevrek kırılmayı önlemede etkili olmuştur. Yerdeğiştirme sünekliği bakımından hiçbir lif tipi liffsiz göre artış sağlayamamıştır. Ancak bu konuda düz mikro lif tipinin (F6) diğerlerinden çok daha etkin olduğu belirlenmiştir.

Kirişin yük taşıma kapasitesi bakımından tüm lifler liffsiz duruma göre önemli avantaj sağlamıştır. En etkin dayanım artışı çift kancalı makro lif tipinde (F60_2) elde edilmiştir.

Çatlak genişliğini sınırlama bakımından tüm lifler liffsiz duruma göre çok önemli avantajlar sağlamıştır. Bu konuda en etkin lif tipi çift kancalı makro lif (F60_2) olmuştur. Düz mikro lif (F6) tipinde de buna yakın etkinlik elde edilmiştir.

Sonuç olarak, tüm parametreler birlikte değerlendirildiğinde düz mikro lifin (F6) yapısal kirişlerin eğilme davranışında en etkin lif tipi olduğu söylenebilmektedir. Bununla birlikte, süneklik dışındaki parametreler bakımından değerlendirildiğinde çift kancalı makro lifin (F60_2) mikro liften çok daha etkin olduğu belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, bazı çelik lif tiplerinin eğilme davranışında daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Ancak, sonuçların genelleştirilebilmesi için eleman boyutları, çekme donatısı oranları, lif miktarı vb. parametreler bakımından çok sayıda farklı deneysel çalışmaya ihtiyaç bulunmaktadır.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmada kullanılan Ultra Yüksek Performanslı Lifli Betonun geliştirilmesine 113M432 nolu proje kapsamında destek sağlayan TÜBİTAK'a, 2015/31 nolu proje kapsamında destek sağlayan Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimine,

akışkanlaştırıcı temindeki katkılarından dolayı BASF firmasına teşekkürlerini sunarlar.

Kaynaklar

- AFGC, 2013. Recommendation: Ultra high performance fibre-reinforced concretes, revised ed. Association Française de Génie Civil; Service d'études techniques des routes et autoroutes.
- ASTM C494 / C494M-15a, 2015. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bache H.H. Densified cement/ultrafine particle-based materials. in "2nd int. conference on superplasticizers in concrete", Ottawa, 10–12 June 1981. Wille K., Naaman A.E. ve Parra-Montesinos G.J., 2011. *Ultra-high performance Concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): a simpler way*. ACI Materials Journal, **108(1)**, 46–54.
- Bertram G. and Hegger J., 2008. Shear carrying capacity of Ultra-High Performance Concrete beams. Proceedings, 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, Tokyo, Japan.
- CSI, 2002. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual, SAP2000 V.8, Computers and Structures, Inc. C.A., USA.
- Dancygier A.N. and Savir Z., 2006. *Flexural behavior of HSFRC with low reinforcement ratios*. Engineering Structures, **28**, 1503–1512.
- Fehling E, Schmidt M, Walraven J, Leutbecher T, Frönlich S., 2014. Ultra-High Performance Concrete UHPC, Betonkalender, Wilhelm Ernst & Sohn.
- Graybeal, B.A., 2007, *Compressive Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete*, ACI Materials Journal, 104 (2), 146-152.
- JSCE, 2008. Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks; Concrete Engineering Series, 82, Japan Society of Civil Engineers.
- Kamal M.M., Safan M.A., Etman Z.A. and Salama R.A., 2014. *Behavior and strength of beams cast with ultra high strength concrete containing different types of fibers*. HBRC Journal, **10(1)**, 55-63.
- Moreillon L. and Menétrey P. 2013. "Rehabilitation and Strengthening of Existing RC Structures with UHPFRC: Various Application." RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, France: RILEM Publication S.A.R.L., 127-136.
- Naaman A.E., 2007. High performance fiber reinforced cement composites classification and applications CBM-C1 International workshop. Karachi, Pakistan., p.389–400.
- Park R. 1988. Ductility evaluation from laboratory and analytical testing. Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Kyoto, 8, 605-616.
- Richard P. and Cheyrezy M., 1995. *Composition of reactive powder concretes*. Cement and Concrete Research, **25(7)**, 1501–1511.
- Roy D.M., Gouda G.R. and Bobrowsky A., 1972. *Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques*. Cement and Concrete Research, **2**, 349–366.
- Russell H.G. and Graybeal B.A. 2013. Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community; FHWA Publication HRT-13-060. Federal Highway Administration. June.
- SAMARIS, 2005. Report D22, 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 - WP 14: HPRCC.
- Stürwald, S. and Fehling, E., 2012. Design of Reinforced UHPFRC in Flexure. in "Ultra High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction, 3rd Intl. Symp. on Ultra High Performance Concrete and Nanotechnology for High Performance Construction Materials", Structural Materials & Engineering Series No. 19 174 References, Kassel University Press GmbH, Kassel, pp. 443–450.
- Voo Y.L., Poon W.K. and Foster S.J., 2010. *Shear strength of steel fiber-reinforced ultra-high performance concrete beams without stirrups*. Journal of Structural Engineering, **136** (11), 1393–1400.
- Wang C., Yang C., Liu F., Wan C. and Pu X., 2012. *Preparation of Ultra-High Performance Concrete with common technology and materials*. Cement and Concrete Composites, **34**, 538-544.
- Wille K., Naaman A.E., El-Tawil S. and Parra-Montesinos G.J., 2012. *Ultra-high performance concrete and fiber*

reinforced concrete: achieving strength and ductility without heat curing. Materials and Structures, 45, 309-324.

Yazıcı H. Yardımcı M.Y., Aydın S. and Karabulut A.S., 2009. *Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes. Construction and Building Materials; 23,1223–31.*

Yang I.H., Joh C. and Kim B.S., 2010. *Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending. Engineering Structures, 32, 3478-3487.*

Yudenfreund M., Skalny J., Mikhail R.S. and Brunauer S., 1972. *Hardened portland cement pastes of low porosity, II. Exploratory studies. Dimensional changes. Cement and Concrete Research, 2(3):331–348*