

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI LİFLİ BETON İLE
ÜRETİLEN BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

TAMER BİROL

BALIKESİR, ARALIK - 2016

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI LİFLİ BETON İLE
ÜRETİLEN BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

TAMER BİROL

Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Altuğ YAVAŞ (Tez Danışmanı)

Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN

Prof. Dr. Halit YAZICI

Yrd. Doç. Dr. Kaan TÜRKER

Yrd. Doç. Dr. Umut HASGÜL

BALIKESİR, ARALIK - 2016

KABUL VE ONAY SAYFASI

Tamer BİROL tarafından hazırlanan **“ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI LİFLİ BETON İLE ÜRETİLEN BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ”** adlı tez çalışmasının savunma sınavı 29.12.2016 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Altuğ YAVAŞ

Üye

Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN

Üye

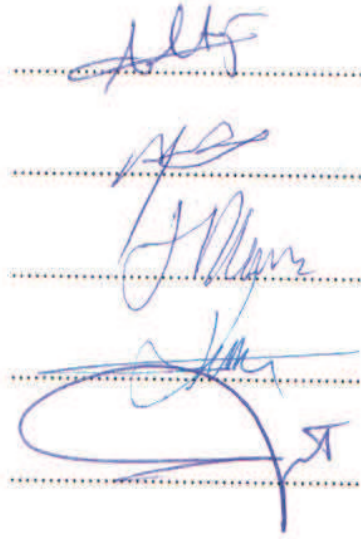
Prof. Dr. Halit YAZICI

Üye

Yrd. Doç. Dr. Kaan TÜRKER

Üye

Yrd. Doç. Dr. Umut HASGÜL



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

**Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 113M432 nolu proje ve Balıkesir Üniversitesi
Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2013/16 nolu proje ile
desteklenmiştir**

ÖZET

ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI LİFLİ BETON İLE ÜRETİLEN BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

TAMER BİROL

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: YRD. DOÇ. DR. ALTUĞ YAVAŞ)

BALIKESİR, ARALIK - 2016

Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) son yıllarda beton teknolojisindeki gelişmeler sonucu ortaya çıkan yeni nesil bir beton türüdür. Bu beton türü çok yüksek basınç dayanımı yanında içeriğindeki lifler sayesinde çekme dayanımı, süneklik ve durabilite açısından üstün özelliklere sahiptir. Betonun bu özellikleri, yapı elemanlarında eğilme ve kesme kapasitesi, süneklik ve rijitlik bakımından önemli katkılar sağlamaktadır. UYPLB'un bu üstün özelliklerine rağmen pratikte yapısal elemanlardaki kullanımı çok kısıtlıdır. Ülkemizde ise yapısal olarak kullanım alanı oldukça sınırlıdır. UYPLB'un yaygınlaşabilmesi için uygulamasının daha pratik hale getirilmesi ve tasarım standartlarının geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, kolay uygulanabilir UYPLB'un üretimi gerçekleştirilmiş, daha sonra bu betonu içeren betonarme kirişlerin eğilme davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, UYPLB'lu kirişlerin eğilme kapasitelerinin belirlenmesi için sayısal bir yöntem önerilmiş ve bu yöntemin sonuçları deneysel sonuçlar ve literatürdeki mevcut yaklaşımlar kullanılarak değerlendirilmiştir. Kirişlerde UYPLB kullanımının, eğilme kapasitesi, çatlamış kesit eğilme rijitliği ve elastik bölgedeki çatlak dağılımları bakımından lifsiz duruma göre önemli avantajlar sağladığı belirlenmiştir. UYPLB ile üretilen kirişlerde maksimum donatı oranının üzerine çıkılmasına rağmen yeterli sünekliğin sağlanabildiği görülmüştür. Ayrıca, önerilen sayısal yöntem incelenen kirişlerin eğilme kapasitelerini deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olarak belirleyebilmektedir.

ANAHTAR KELİMELELER: Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton, Eğilme Davranışı, Betonarme Kiriş, Çelik Lif

ABSTRACT

INVESTIGATION OF FLEXURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH ULTRA HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CONCRETE

PH.D THESIS

TAMER BİROL

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

CIVIL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. ALTUĞ YAVAŞ)

BALIKESİR, DECEMBER 2016

In recent years, the Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) has been a new generation concrete as a product of new developments in concrete technology. Besides having a very high compressive strength, the UHPFRC has superior features in terms of tension strength, ductility as well as durability by adding fibers to mixture. These characteristics of the concrete provide significant contributions to structural members in terms of flexure and shear capacity, ductility and stiffness. Despite these outstanding features, the use of UHPFRC in reinforced concrete (RC) structures is very limited. In our country, structural applications are very rare as well. More practical production techniques and design standards should be improved in order to make the use of UHPFRC widespread. In this study, an easy applicable UHPFRC was produced and the flexural behavior of UHPFRC beams was experimentally investigated. A numerical method was also proposed to determine the flexural capacities of the UHPFRC beams and the results of this method were evaluated by the use of experimental results and present approaches in literature. The use of UHPFRC in the RC beams provides significant advantages to non-fiber concrete in terms of the flexural capacity, effective flexural stiffness and cracking pattern in elastic region. It is also observed that an adequate ductility for the beams with UHPFRC can be obtained despite exceeding the maximum reinforcement ratio. In addition, the proposed numerical method can determine the flexural capacities of investigated beams compatible with the experimental results.

KEYWORDS: Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, Flexural Behavior, Reinforced Concrete Beam, Steel Fiber

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ.....	ix
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖNSÖZ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB)	1
1.2 Literatür Özeti.....	7
1.2.1 UYPLB'un Eğilme Davranışı ile İlgili Malzeme Esaslı Çalışmalar	7
1.2.2 UYPLB ile Üretilen Betonarme Kiriş Elemanların Eğilme Davranışı ile İlgili Çalışmalar.....	14
1.2.3 Literatürün Değerlendirilmesi.....	21
1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	23
2. UYPLB İLE ÜRETİLEN BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ	24
2.1 UYPLB ile Üretilen Betonarme Kirişler için Etkin Lif İçeriklerinin Belirlenmesi	24
2.1.1 UYPLB'ı Oluşturan Bileşenler ve Özellikleri	24
2.1.2 UYPLB'un Hazırlanması ve Numunelerin Üretimi	26
2.1.3 UYPLB'un Basınç Dayanımının, Elastisite Modülünün Belirlenmesi ve Eğilme Davranışının İncelenmesi.....	28
2.1.3.1 Beton Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi.....	28
2.1.3.2 Elastisite Modüllerinin Belirlenmesi.....	30
2.1.3.3 Numunelerin Eğilme Davranışının Belirlenmesi	32
2.1.4 Eğilme Davranışı için Etkin Lif İçeriklerinin Belirlenmesi.....	36
2.2 UYPLB ile Üretilen Betonarme Kirişlerin Eğilme Davranışının İncelenmesi	38
2.2.1 Test Kirişlerinin Özellikleri	38
2.2.2 Test Kirişlerinin Hazırlanması.....	40
2.2.3 Test Kirişlerinin Beton ve Donatılarının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	42
2.2.4 Test Düzenegi ve Ölçerlerin Yerleştirilmesi	44
2.2.5 Betonarme Kirişlerin Eğilme Testleri ve Sonuçların Karşılaştırılması	47
2.2.5.1 Yük-Düşey Yerdeğiştirme Davranışlarının Karşılaştırılması	48
2.2.5.2 Yerdeğiştirme Sünekliklerinin (Δ_u/Δ_y) Karşılaştırılması	54
2.2.5.3 Yük Taşıma Kapasitelerinin (P_{maks}) ve Artık Yük Oranlarının (P_{maks}/P_u) Karşılaştırılması.....	57
2.2.5.4 Eğrilik Sünekliklerinin ve Çatlamış Kesit Eğilme Rijitliklerinin Belirlenmesi	60
2.2.5.5 Çatlak Davranışlarının Karşılaştırılması	64

3. ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI LİFLİ BETON İLE ÜRETİLEN BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME KAPASİTELERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ	73
3.1 UYPLB ile Üretilmiş Betonarme Kirişlerin Eğilme Momenti Kapasitesinin Hesabı için Sayısal Bir Yöntem Önerisi	81
3.2 Test Kirişlerinin Eğilme Momenti Kapasitelerinin Sayısal Yöntemlerle Belirlenmesi ve Yöntemlerin Değerlendirilmesi	84
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	89
5. KAYNAKLAR.....	93
6. EKLER.....	103



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: UYPLB'un basınç altındaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi; a) Deneysel (Schmidt vd., 2008; Reineck vd.,2003), b) Şematik (Schmidt vd., 2008).....	3
Şekil 1.2: UYPLB ve geleneksel lifli betonun eksenel çekme etkisi altındaki gerilme şekildeğiştirme davranışlarının karşılaştırılması (Naaman, 2002).....	4
Şekil 1.3: UYPLB'un çeşitli kullanım alanlarına ait örnekler.....	6
Şekil 1.4: Farklı çelik lif içeriklerine sahip numunelerin yük-düşey yerdeğiştirme davranışları (Skazlic ve Bjegovic, 2009).....	8
Şekil 1.5: Karma çelik lif kullanımının eğilme davranışına etkisi (Kim vd., 2011).....	9
Şekil 1.6: Numunelerin yük-düşey yerdeğiştirme davranışları (Akçay ve Taşdemir, 2012).....	10
Şekil 1.7: Farklı hacimsel lif oranları için yük-düşey yerdeğiştirme davranışları (Yoo vd., 2013)	11
Şekil 1.8: Farklı lif ve silis dumanı oranlarının eğilme davranışına etkisi (Beglarigale vd., 2014).....	11
Şekil 1.9: Farklı hacimsel lif oranları için yük-düşey yerdeğiştirme davranışları (Yoo vd., 2014a).....	12
Şekil 1.10: Numunelerin yük-düşey yerdeğiştirme davranışları (Wu vd., 2016)	14
Şekil 1.11: İki farklı a/d oranı için yüksek dayanımlı çelik lifli kirişlerin yük-açıklık ortası düşey yerdeğiştirme davranışları (Ashour ve Wafa, 1993)	15
Şekil 1.12: Düşük çekme donatısına sahip çelik lifli ve lifsiz kirişlerin moment-açıklık ortası düşey yerdeğiştirme davranışı (Dancygier ve Zavir, 2006)	16
Şekil 1.13: Kirişlerin yük-açıklık ortası düşey yerdeğiştirme davranışları; a) Donatısız, b) Donatılı (Yang vd., 2010).....	17
Şekil 1.14: Farklı lif oranları için moment-düşey yerdeğiştirme davranışları ve kırılma şekilleri (Stürwald ve Fehling, 2012).....	17
Şekil 1.15: Hacimsel çelik lif oranının ve çekme donatısı oranının moment taşıma kapasitesine etkisi (Guan vd., 2013).....	18
Şekil 1.16: Her iki lif tipi için kirişlerin yük-açıklık ortası düşey yerdeğiştirme davranışları (Khalil ve Tayfur, 2013).....	19
Şekil 1.17: İki farklı çekme donatısına sahip kirişlerin yük-açıklık ortası düşey yerdeğiştirme davranışları (Nseir vd., 2013)	20
Şekil 1.18: İki farklı çekme donatısı oranı için lifsiz ve çelik lifli kirişlerin yük-düşey yerdeğiştirme davranışları (Yoo ve Yoon, 2015)	21
Şekil 2.1: UYPLB'u oluşturan bileşenler	25
Şekil 2.2: Çalışmada kullanılan çelik lifler	26
Şekil 2.3: UYPLB'un hazırlanması aşamaları; a) Panmikser, b) Yarı kuru karışım, c) Sıvı karışım	27
Şekil 2.4: UYPLB'un kalıplara yerleştirilmesi.....	27
Şekil 2.5: Kür havuzundaki test numuneleri	28
Şekil 2.6: Numunelerin beton basınç dayanımlarının belirlenmesi.....	29

Şekil 2.7: Elastisite modülünün tayini için başlıklanan numuneler, basınç presi ve ölçüm düzeneği	31
Şekil 2.8: Prizma numuneler için test düzeneği	32
Şekil 2.9: Testleri tamamlanan prizma numuneler	32
Şekil 2.10: Prizma numunelerin kırılma şekillerine ait örnekler	33
Şekil 2.11: Farklı lif tipleri için numunelerdeki çelik liflerin dağılımları	33
Şekil 2.12: Tekil lifli UYPLB prizma numunelerin yük-düşey yerdeğiştirme davranışları	34
Şekil 2.13: Karma lifli UYPLB prizma numunelerin yük-düşey yerdeğiştirme davranışları	35
Şekil 2.14: UYPLB için karakteristik yük-yerdeğiştirme davranışı (ASTM, 2012)	35
Şekil 2.15: Numunelerin eğilme dayanımlarının ve tokluklarının karşılaştırılması	36
Şekil 2.16: Kirişlerin geometrik özellikleri ve donatı yerleşimleri	40
Şekil 2.17: Donatılara yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerler	40
Şekil 2.18: Kiriş kalıbı ve donatısı	41
Şekil 2.19: UYPLB'un hazırlanması ve kiriş kalıplarına yerleştirilmesi	41
Şekil 2.20: Dökümü tamamlanmış test kirişi	42
Şekil 2.21: Plastik örtü ile sarılmış test kirişleri	42
Şekil 2.22: Donatıların çekme testi ile mekanik özelliklerinin belirlenmesi	43
Şekil 2.23: Dört noktalı eğilme test düzeneği	45
Şekil 2.24: Test kiriş ve şematik ölçüm düzeneği	45
Şekil 2.25: Eğrilik ölçüm düzeneği	46
Şekil 2.26: Betona yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerler	46
Şekil 2.27: Veri toplama sistemi	47
Şekil 2.28: Eğilme testleri tamamlanan kirişlerin toplu gösterimi	48
Şekil 2.29: Salt çekme donatılı kirişlere ait (1., 3. ve 5. grup) yük-düşey yerdeğiştirme davranışları	49
Şekil 2.30: Basınç donatılı kirişlere ait (2., 4. ve 6. grup) yük-düşey yerdeğiştirme davranışları	49
Şekil 2.31: Salt çelik lifli kirişler ile donatılı (lifli ve lifsiz) kirişlerin davranışlarının	50
Şekil 2.32: Salt çekme donatılı kirişlere ($\rho = 0.009$) ait kırılma şekilleri	51
Şekil 2.33: Salt çekme donatılı kirişlere ($\rho = 0.019$) ait kırılma şekilleri	52
Şekil 2.34: Salt çekme donatılı kirişlere ($\rho = 0.028$) ait kırılma şekilleri	52
Şekil 2.35: Salt çekme donatılı kirişlere ($\rho = 0.043$) ait kırılma şekilleri	52
Şekil 2.36: Basınç donatılı kirişlere ($\rho = 0.009$) ait kırılma şekilleri	53
Şekil 2.37: Basınç donatılı kirişlere ($\rho = 0.019$) ait kırılma şekilleri	53
Şekil 2.38: Basınç donatılı kirişlere ($\rho = 0.028$) ait kırılma şekilleri	53
Şekil 2.39: Basınç donatılı kirişlere ($\rho = 0.043$) ait kırılma şekilleri	54
Şekil 2.40: Yük-düşey yerdeğiştirme davranışına ait karakteristik değerler (Park, 1988)	55
Şekil 2.41: Salt çekme donatılı kirişlerde çelik lifin yerdeğiştirme sünekliği üzerindeki etkisi	56
Şekil 2.42: Basınç donatılı kirişlerde çelik lifin yerdeğiştirme sünekliği üzerindeki etkisi	56
Şekil 2.43: Salt çekme donatılı kirişlerde çelik lifin yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi	58
Şekil 2.44: Basınç donatılı kirişlerde çelik lifin yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi	58

Şekil 2.45: Salt çekme donatılı kirişlerde belirlenen artık yük oranları	59
Şekil 2.46: Basınç donatılı kirişlerde belirlenen artık yük oranları	59
Şekil 2.47: Moment- eğrilik davranışına ait karakteristik değerler (Park, 1988)	61
Şekil 2.48: 1.,3. ve 5. grup salt çekme donatılı kirişlere ait moment-eğrilik davranışları	61
Şekil 2.49: 2.,4. ve 6. grup basınç donatılı kirişlere ait moment-eğrilik davranışları	62
Şekil 2.50: Salt çekme donatılı kirişlerde çelik liflerin eğilme rijitliği üzerindeki etkisi	63
Şekil 2.51: Basınç donatılı kirişlerde çelik liflerin eğilme rijitliği üzerindeki etkisi	64
Şekil 2.52: Salt çekme donatılı kirişlerin ($\rho = 0.009$) L/250 yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları	65
Şekil 2.53: Salt çekme donatılı kirişlerin ($\rho = 0.019$) L/250 yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları	65
Şekil 2.54: Salt çekme donatılı kirişlerin ($\rho = 0.028$) L/250 yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları	65
Şekil 2.55: Salt çekme donatılı kirişlerin ($\rho = 0.043$) L/250 yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları	66
Şekil 2.56: Basınç donatılı kirişlerin ($\rho = 0.009$) L/250 yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları	66
Şekil 2.57: Basınç donatılı kirişlerin ($\rho = 0.019$) L/250 yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları	66
Şekil 2.58: Basınç donatılı kirişlerin ($\rho = 0.028$) L/250 yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları	67
Şekil 2.59: Basınç donatılı kirişlerin ($\rho = 0.043$) L/250 yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları	67
Şekil 2.60: Salt çekme donatılı kirişlerin ($\rho = 0.009$) L/70 yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları	67
Şekil 2.61: Salt çekme donatılı kirişlerin ($\rho = 0.019$) L/70 yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları	68
Şekil 2.62: Salt çekme donatılı kirişlerin ($\rho = 0.028$) L/70 yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları	68
Şekil 2.63: Salt çekme donatılı kirişlerin ($\rho = 0.043$) L/70 yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları	68
Şekil 2.64: Basınç donatılı kirişlerin ($\rho = 0.009$) L/70 yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları	69
Şekil 2.65: Basınç donatılı kirişlerin ($\rho = 0.019$) L/70 yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları	69
Şekil 2.66: Basınç donatılı kirişlerin ($\rho = 0.028$) L/70 yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları	69
Şekil 2.67: Basınç donatılı kirişlerin ($\rho = 0.043$) L/70 yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları	70
Şekil 2.68: Salt çekme donatılı kirişlerin L/250 yerdeğiştirmesi için çatlak	71
Şekil 2.69: Basınç donatılı kirişlerin L/250 yerdeğiştirmesi için çatlak genişliklerinin karşılaştırılması	71
Şekil 2.70: Salt çekme donatılı kirişlerin L/70 yerdeğiştirmesi için çatlak genişliklerinin karşılaştırılması	71
Şekil 2.71: Basınç donatılı kirişlerin L/70 yerdeğiştirmesi için çatlak genişliklerinin karşılaştırılması	72

Şekil 3.1:	Geleneksel lifsiz beton ve UYPLB ile üretilmiş betonarme bir enkesite ait şekil değiştirme profili ve gerilme durumları (Bae vd., 2016)	74
Şekil 3.2:	Çelik lif içeren betonarme kirişlerin tasarıma esas şekil değiştirme ve gerilme durumları (ACI 544.4R-88, 2009).....	75
Şekil 3.3:	YDLB kirişe ait şekil değiştirme ve gerilme durumları (Beshara vd., 2012)	77
Şekil 3.4:	UYPLB ile üretilmiş tek donatılı bir kiriş enkesitine ait şekil değiştirme ve gerilme durumları (Khalil ve Tayfur, 2013)	79
Şekil 3.5:	Tek donatılı bir RPB kiriş enkesitine ait şekil değiştirme ve gerilme durumları (Al-Hasani vd., 2015).....	79
Şekil 3.6:	UYPLB ile üretilmiş betonarme enkesite ait şekil değiştirme profili ve gerilme durumu	82
Şekil 3.7:	Farklı hesap modelleri için elde edilen kapasitelerin karşılaştırılması	87
Şekil A.1:	Salt çekme donatılı lifsiz kirişlerin şekil değiştirme-düşey yerdeğiştirme davranışları; a) Beton, b) Donatı	103
Şekil A.2:	Basınç donatılı lifsiz kirişlerin şekil değiştirme-düşey yerdeğiştirme davranışları; a) Beton, b) Donatı	104
Şekil A.3:	Salt çekme donatılı tekil lifli kirişlerin şekil değiştirme-düşey yerdeğiştirme davranışları; a) Beton, b) Donatı	105
Şekil A.4:	Basınç donatılı tekil lifli kirişlerin şekil değiştirme-düşey yerdeğiştirme davranışları; a) Beton, b) Donatı	106
Şekil A.5:	Salt çekme donatılı karma lifli kirişlerin şekil değiştirme-düşey yerdeğiştirme davranışları; a) Beton, b) Donatı	107
Şekil A.6:	Basınç donatılı karma lifli kirişlerin şekil değiştirme-düşey yerdeğiştirme davranışları; a) Beton, b) Donatı	108

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1:	UYPLB’u oluşturan bileşenlerin çimentoya ağırlıkça oranları	25
Tablo 2.2:	Çelik liflerin boyutları ve mekanik özellikleri.....	26
Tablo 2.3:	Üretilen numunelerin kodları ve lif içerikleri	29
Tablo 2.4:	Numunelerin ortalama beton basınç dayanımları ve oranlar	30
Tablo 2.5:	Numunelerin ortalama elastisite modülleri.....	31
Tablo 2.6:	Farklı lif içeriklerine sahip UYPLB’lu numunelerin eğilme testi sonuçları.....	36
Tablo 2.7:	Test kirişlerinin donatı ve lif içerikleri	39
Tablo 2.8:	Test kirişlerinin 7, 28 ve 56 günlük ortalama basınç dayanımları	43
Tablo 2.9:	Kiriş boyuna donatılarının mekanik özellikleri	44
Tablo 2.10:	Lifsiz, tekil ve karma lifli kirişlerin yerdeğiştirme sünekliklerine ait oranlar	55
Tablo 2.11:	Eğrilik (birim dönme) süneklikleri ile ilgili karakteristik değerler	62
Tablo 3.1:	Çelik lifli/lifsiz betonarme test kirişlerinin enkesit, boyuna donatı ve lif özellikleri.....	85
Tablo 3.2:	Farklı hesap modelleri için teorik eğilme moment kapasiteleri ve deneysel sonuçlara oranları.....	86
Tablo 3.3:	Teorik/deneysel eğilme momenti kapasitelerine ait istatistiksel sonuçlar	86

SEMBOL LİSTESİ

a	: Eşdeğer dikdörtgen bloğu derinliği
A_s	: Çekme donatısının enkesit alanı
b	: Kiriş enkesit genişliği
c	: Tarafsız eksenin derinliği
d	: Enkesit yüksekliği
d_f	: Çelik lifin çapı
d_f	: Çelik lifin aderans katsayısı
D_f	: Çelik lifin çapı
e	: En dış beton basınç lifinden çekme gerilmesi bloğunun üst sınırına olan uzaklık
E_c	: Lifli betonun elastisite modülü
EI_ζ	: Çatlamış kesit eğilme rijitliği
f	: Eğilme dayanımı
f_1	: İlk çatlak eğilme dayanımı
F_{be}	: Çelik lifin karakteristiğine bağlı aderans katsayısı
f_c'	: Lifli betonun basınç dayanımı
f_{cf}	: Lifli betonun basınç dayanımı
f_{cuf}	: Lifli betonun basınç dayanımı
f_P	: Maksimum eğilme dayanımı
f_{pp}	: Lifli betonun basınç dayanımı
f_{te}	: Çelik lifli betonun çekme dayanımı
f_y	: Çekme donatısının akma dayanımı
h	: Kiriş enkesit yüksekliği
L	: Temiz açıklık
l	: Çelik lifin boyu
L_f	: Çelik lifin boyu
M_{maks}	: Moment taşıma kapasitesi
M_y	: Akma momenti
M_u	: Maksimum yerdeğiştirmeye karşılık gelen moment taşıma kapasitesi
P	: Yük
P_1	: İlk çatlak yükü
P_{maks}	: Maksimum yük taşıma kapasitesi
P_P	: Maksimum yük
P_y	: Akma yükü

P_u	: Maksimum yerdeğiştirmeye karşılık gelen yük taşıma kapasitesi
T_{150}^D	: Tokluk (eğilme ile yutulan enerji)
V_f	: Hacimsel çelik lif oranı
V_f	: Hacimsel çelik lif oranı (%)
β_l	: Eşdeğer gerilme bloğu derinliği
δ_l	: İlk çatlak yüküne karşılık gelen yerdeğiştirme
δ_p	: Maksimum yüke karşılık gelen yerdeğiştirme
Δ_u	: Maksimum yerdeğiştirme
Δ_y	: Akma yerdeğiştirmesi
ε_c	: En dış beton basınç lifindeki birim şekildeğiştirme
ε_{co}	: Lifli betonda f_c' basınç dayanımına karşı gelen birim şekildeğiştirme
ε_{cu}	: En dış beton basınç lifindeki maksimum birim şekildeğiştirme
ε_s	: Çekme donatısındaki birim şekildeğiştirme
$\varepsilon_s (fiber)$	: Eşdeğer çekme gerilme bloğunun başlamasına karşı gelen birim şekildeğiştirme
ε_s'	: Basınç donatısındaki birim şekildeğiştirme değeri
ε_{ie}	: Çekme bölgesindeki ilk çatlığa karşı gelen çekme birim şekildeğiştirme değeri
η_b	: Çelik liflerin aderansı ile ilişkili etkinlik çarpanı
η_l	: Çelik liflerin uzunluğu ile ilişkili etkinlik çarpanı
η_{lt}	: Lifli betonun çekme dayanımında lif boyuna ait etkinlik çarpanı
η_o	: Çelik liflerin yönelmesi ile ilişkili etkinlik çarpanı
η_{ot}	: Lifli betonun çekme dayanımında lif yönelmesine ait etkinlik çarpanı
v_f	: Hacimsel çelik lif oranı
θ_y	: Akma eğriliği
θ_u	: Maksimum eğrilik
ρ	: Çekme donatısı oranı
ρ'	: Basınç donatısı oranı
ρ_f	: Hacimsel çelik lif oranı
σ_c	: Çelik lifli betonun çekme dayanımı
σ_t	: Lifli betonun çekme dayanımı
σ_t	: Lifli betonun çekme dayanımı
τ_f	: Beton ile çelik lif arasındaki aderans gerilmesi
τ_u	: Lifli betonun aderans dayanımı

ÖNSÖZ

Doktora tezi olarak sunulan bu çalışmada, Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) ile üretilen betonarme kiriş elemanların eğilme davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Çalışmalarım sırasında çok değerli bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Altuğ YAVAŞ'a, çok değerli bilgi ve yorumlarımdan faydalandığım Sayın Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Kaan TÜRKER hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

113M432 nolu Bilimsel Araştırma Projesi kapsamında bu çalışmayı destekleyen, çalışmada kullanılan test sistemlerinin ve sarf malzemelerinin teminini sağlayan TÜBİTAK'a ve Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu süreçte de yanımda olan ve destekleyen aileme, özellikle bu sürecin her aşamasında fedakarlığı ve sevgisiyle en büyük destekçim olan eşime minnet ve şükranlarımı sunarım.

BALIKESİR, 2016

Tamer BİROL

1. GİRİŞ

1.1 Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB)

Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) son yıllarda beton teknolojisindeki gelişmeler sonucu ortaya çıkan yeni nesil bir beton türüdür. UYPLB, geleneksel ve lifli betonlara göre üstün mekanik özelliklere sahiptir. Maksimum sıkılık oranına sahip içyapı, ince ve yüksek mukavemetli agrega ve çok düşük su/bağlayıcı oranı ile üretilen bu betonlarda standart kür koşulları altında 100-150 MPa arasında basınç dayanımları elde edilebilmektedir. Özel karıştırıcılar, yüksek performanslı beton kimyasalları veya özel kür koşulları (ısı, basınç vb.) uygulanması durumunda ise çok daha yüksek dayanımlara (150 MPa üzeri) ulaşılabilir. UYPLB, içerdiği lifler (çelik, sentetik vb.) sayesinde basınç, çekme ve eğilme etkisi altında oldukça sünek bir davranış sergilemektedir. Bu üstün mekanik özelliklerin yanısıra liflerin çatlakları sınırlama özelliği nedeniyle, UYPLB çevre koşullarına karşı yüksek durabiliteye sahiptir.

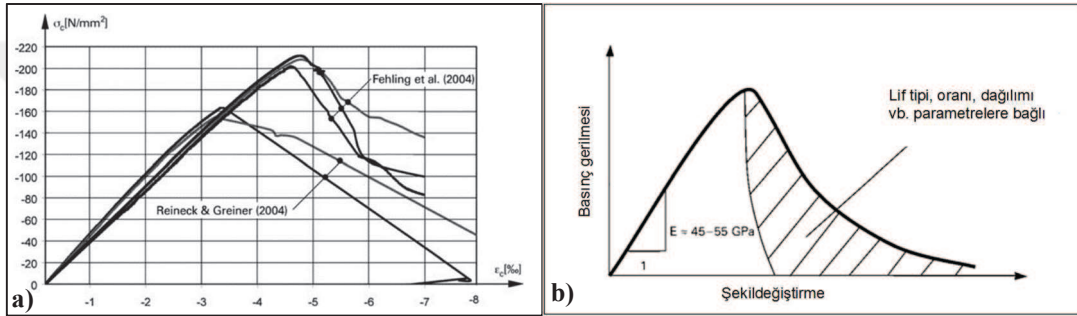
UYPLB'un ortaya çıkışı 1970'li yıllarda betonun basınç dayanımını arttırmaya yönelik çalışmalara dayanmaktadır. Roy vd. (1972)'de çok sıkı içyapı, yüksek sıcaklık (250°C) ve basınç altında (50 MPa) 500 MPa üzeri basınç dayanıma sahip çimento hamuru elde edilmiştir. Yudenfreund vd. (1972)'de çok ince malzeme, düşük su/çimento oranı (0.2'den az) ve özel bir karıştırma tekniği (vakumlu karıştırma) uygulanarak 200 MPa üzeri basınç dayanımı değerlerine ulaşılmıştır. 1980'li yıllarda süper akışkanlaştırıcı katkıların geliştirilmesi ve silis dumanı gibi çok ince puzolanik katkılarında kullanılması yeni nesil betonlar ile ilgili çalışmalara hız kazandırmıştır. Birchall vd. (1981)'de MDF (Macro Defect Free) adı verilen, polimerleştirme yöntemi ile mikroskobik çatlakların önlenmesi sonucu, standart kür koşulları altında 200 MPa üzeri basınç dayanımına sahip çimento hamuru elde edilmiştir. Bache (1981)'de günümüzde geleneksel UYPLB'un temel üretim prensipleri olan ultra ince malzeme (silis dumanı), çok düşük su/çimento oranı ve süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılarak DSP (Densified Small Particles) adı verilen çok sıkı ve boşluksuz bir içyapı oluşturulmuş ve 120-270 MPa arasında değişen basınç dayanımları elde edilmiştir. Richard ve Cheyrezy (1995)'te silis dumanı, çok ince agrega ve süper akışkanlaştırıcı

katkı ile çok düşük su/çimento oranı kullanılarak bir tür UYPLB olan RPB (Reaktif Pudra Betonu) üretilmiştir. RPB'un çok yüksek basınç dayanımı nedeniyle sahip olduğu gevrek davranışın iyileştirilmesi amacıyla hacimsel olarak %1.5-%3.0 arasında değişen oranlarda 13/0.15 mm (boy/çap) boyutlarında yüksek dayanımlı çelik lifler eklenmiş, yüksek sıcaklık ve basınç uygulamaları ile birlikte 200-800 MPa basınç dayanımları ve 40 kJ/m²'ye kadar kırılma enerjisi değerleri elde edilmiştir.

UYPLB genel olarak, çimento, silis dumanı, ince agrega, su, süper akışkanlaştırıcı katkı ve liflerden oluşmaktadır. Yüksek basınç dayanımının elde edilebilmesi için normal dayanımlı betonlara göre daha yüksek oranda çimento kullanılmaktadır. Çok ince bir malzeme olan silis dumanı karışımdaki çimento taneleri arasındaki boşlukları azaltmakta ve puzolanik özelliği nedeniyle reaksiyona girerek betonun mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Betonda sıkı ve homojen bir içyapı oluşturmak amacıyla çok ince yüksek dayanımlı agregalar (kuvars vb.) kullanılmaktadır. Yüksek dayanımın sağlanması için çok düşük su/çimento oranları (genellikle 0.20'den daha az) gerektiğinden işlenebilirliğin sağlanabilmesi amacıyla süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılması gerekmektedir. UYPLB'un sünekliğini arttırmak ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için çelik, sentetik vb. lifler kullanılmaktadır. UYPLB'larda genel olarak yüksek dayanımlı çelik lifler tercih edilmektedir. Ayrıca, kullanılan lifin tipi, boyutları ve hacimsel oranı bu tür betonların mekanik özelliklerini belirgin şekilde etkilemektedir (Parra-Montesinos vd., 2005; Graybeal ve Tanesi, 2007; Voo vd., 2010). UYPLB'un üstün mekanik özellikleri için yüksek oranda çimento kullanımı, özel kür koşulları (ısı, basınç vb.) ve yüksek lif oranlarına gereksinimi bulunması bu tür betonların hem maliyetini arttırmakta hem de yaygın olarak kullanımın önünde engel oluşturmaktadır. Son yıllarda standart kür koşulları altında UYPLB üretimi ile ilgili çalışmalar yapılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Yang vd., 2009; Yazıcı vd., 2009; Wille vd., 2011; Wang vd., 2012; Wille vd., 2012). Ayrıca yüksek çimento oranının olumsuz etkilerini (maliyet, çevresel etkiler, büzülme vb.) azaltmak amacıyla çimentonun yerine mineral katkıların (uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) kullanılabilirliği ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda mineral katkıları ve daha büyük agregalar kullanılarak UYPLB üretiminin mümkün olabileceği görülmüştür (Yazıcı vd., 2008, Yazıcı vd. 2009, Yazıcı vd. 2010; Wang vd., 2012; Yu vd., 2015). Farklı özellikte liflerin beraber (karma) olarak kullanılması UYPLB'larda kullanılan yüksek hacimsel lif oranlarının

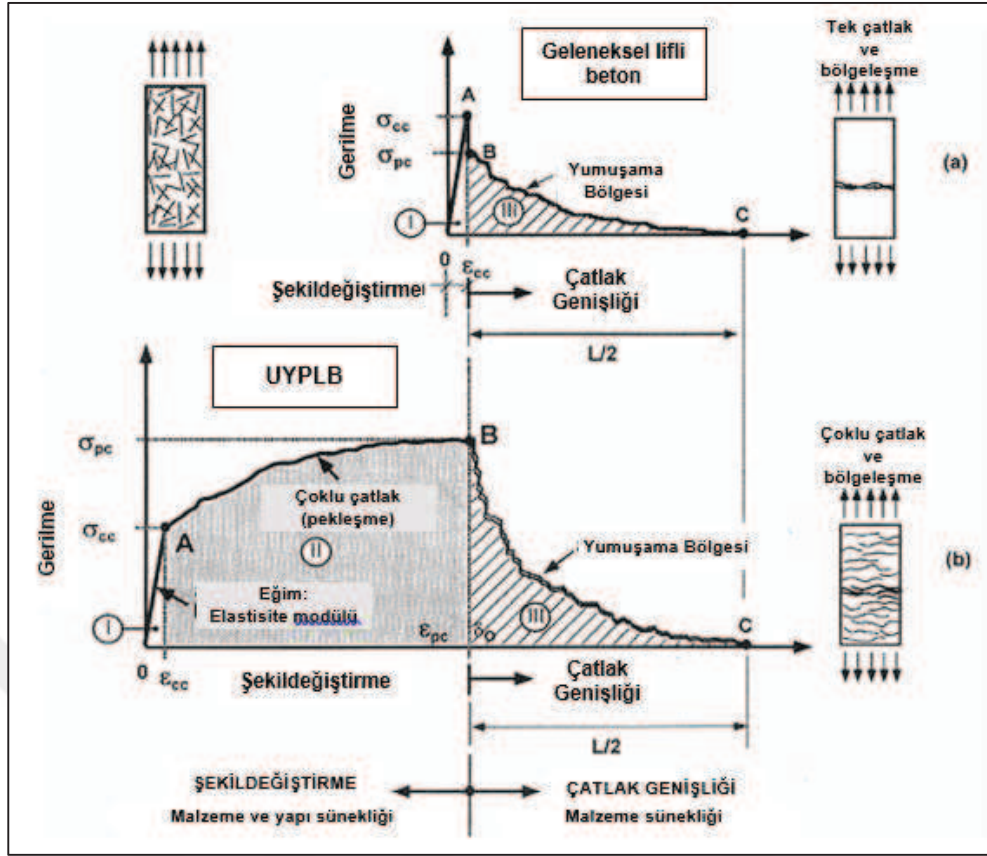
azaltılmasında başarılı sonuçlar veren yöntemlerden biri olarak ortaya çıkmaktadır (Rossi vd., 2005; Kim vd., 2011; Ye vd., 2012).

UYPLB, standart kür koşulları altında 100-150 MPa arası basınç dayanımlarına sahipken, ısı ve basınç gibi uygulamalar sonucunda 150 MPa üzeri dayanım değerlerine ulaşılabilir. UYPLB eksenel basınç altında dayanımının %70-%80'ine kadar lineer elastik davranış göstermekte ve yaklaşık olarak 45-55 GPa'lık elastisite modülü değerleri elde edilebilmektedir (Fehling vd., 2014). Bu tür beton karışımlarına eklenen çelik lifler sayesinde yüksek dayanımlı betonlardan farklı olarak eksenel basınç altında oldukça sünek bir davranış sağlanmaktadır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1: UYPLB'nin basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme ilişkisi; a) Deneysel (Schmidt vd., 2008; Reineck vd., 2003), b) Şematik (Schmidt vd., 2008)

UYPLB, geleneksel (normal dayanımlı) lifli betonlardan daha yüksek çekme dayanımına sahiptir. Bu betonlardan farklı olarak, eksenel çekme etkisi altında ilk çatlak sonrası artan bir yük taşıma kapasitesine (strain hardening) sahiptir. Şekil 1.2'de UYPLB ve geleneksel lifli betonun eksenel çekme etkisi altındaki davranışları görülmektedir. Kullanılan lifler ilk çatlak sonrası oluşan mikro düzeyde çatlaklar arasında köprüleme sağlayarak çatlakların genişlemesini önlemekte ve betonun yük taşımaya devam etmesini sağlamaktadır. Bu aşamada çok sayıda mikro düzeyde çatlak oluşmaktadır. Tepe yüküne ulaşıldığında ise çatlak genişliklerinin artması ile lifler sıyrılmaya başlamakta ve çatlaklar bir bölgede yoğunlaşarak tek ve büyük bir çatlak oluşturmaktadır. Bununla birlikte, dayanım kaybı ile birlikte yük düşüşü (softening branch) başlamaktadır (Şekil 1.2). UYPLB'da kullanılan lifin hacimsel oranı ve mekanik özelliklerine bağlı olarak betonun kapasitesi, rijitliği, sünekliği ve dayanım kaybı sonrası davranışları büyük farklılık göstermektedir.



Şekil 1.2: UYPLB ve geleneksel lifli betonun aksenal çekme etkisi altındaki gerilme şekildeğiştirme davranışlarının karşılaştırılması (Naaman, 2002)

UYPLB, ince malzeme kullanımı ve çok düşük su/çimento oranı sonucu sahip olduğu sıkı içyapı nedeniyle boşluksuz bir yapıdadır. Bunun sonucu olarak, fiziksel ve kimyasal etkilere karşı geçirimsiz yapısı yanında korozyon, aşınma ve darbesel yükler gibi etkilere karşı da yüksek dayanıklılığı sayesinde üstün durabilite özellikleri sergilemektedir (Matte ve Moranville, 1999; Graybeal ve Tanesi, 2007; Voo ve Foster, 2009). Ayrıca UYPLB'un lif içeriği nedeniyle hem erken dönemde hem de yapının kullanım ömrü boyunca sünme ve büzülme gibi etkiler en aza inmektedir.

UYPLB, basınç ve çekme altındaki üstün özellikleri nedeniyle özellikle eğilme etkisindeki yapısal elemanlarda önemli avantajlar sağlama potansiyeline sahiptir. Geleneksel veya öngerilmeli donatılarla birlikte kullanımı sonucu kiriş elemanlarda dayanım, süneklik ve rijitlik bakımından önemli katkılar sağlamaktadır. Bunun sonucunda yapılarda daha küçük enkesitli (narin) eleman kullanımı mümkün olmaktadır. Böylece yapı ağırlığı, deprem yükleri ve temel boyutları azaltılarak önemli ekonomi sağlanmakla birlikte daha estetik yapılar elde edilebilmektedir. Ayrıca,

kullanılan lifler sayesinde kesme dayanımının da yüksek olması, bu tür betonların yapısal elemanlarda kullanımını cazip hale getiren bir diğer özelliktir (Dancygier ve Savir, 2006; Bertram ve Hegger, 2008; Yang vd., 2010; Voo vd., 2010; Kamal vd., 2014).

UYPLB, geleneksel betonlardan farklı mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle mevcut tasarım standartları bu betonu içeren yapısal elemanlar için yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, farklı ülkelerdeki araştırma grupları ve kuruluşlar tarafından çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. UYPLB ile ilgili ilk teknik şartname, French Association for Civil Engineering (AFGC) ve French Road and Traffic Governmental Agency (SETRA) tarafından “Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes - Interim Recommendations” adıyla yayınlanmıştır (AFGC-SETRA, 2002). Dokümanda UYPLB’un mekanik özellikleri, test metotları ve yapısal tasarım esasları ile ilgili açıklamalar ve öneriler bulunmaktadır. Japonya’da Japan Society of Civil Engineers (JSCE) tarafından “Recommendation for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC)” adıyla bir teknik şartname yayınlanmıştır. Şartnamede yüksek performanslı lif katkılı çimento esaslı kompozitler ile ilgili karakteristik özellikler, mekanik özellikler, test metotları ve tasarım esasları yer almaktadır (JSCE, 2008). Birleşik Devletler’de Federal Highway Administration (FHWA) tarafından 2013 yılında “Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community” adıyla bir teknik rapor yayınlanmıştır. Bu dokümanda Ultra Yüksek Performanslı Beton’un (UYPB) üretimi, mekanik özellikleri, yapısal tasarım esasları ve test metotları ile mevcut ve potansiyel uygulamalara yer verilmiştir (FHWA, 2013). International Concrete Federation (FIB) tarafından UYPB ile ilgili araştırmalar için kurulan araştırma grubu ve Almanya Kassel Üniversitesi tarafından yayınlanan “Beton Kalender Ultra-High Performance Concrete (UHPC) Fundamentals-Design-Examples” adlı dokümanda (Fehling vd., 2014), çelik lifli ve lifsiz UYPB ile ilgili çalışmaların sonuçları değerlendirilmiş ve betonun içeriği, mekanik özellikleri ve bu beton ile tasarım yaklaşımları verilmiştir. Ülkemizde ise, UYPLB ile ilgili herhangi bir standart bulunmamakta ve pratikte yapısal elemanlarda kullanımına rastlanılmamaktadır.

UYPLB, malzeme içeriği ve özel kür koşullarının gerekliliği nedeniyle prefabrik elemanların üretiminde daha geniş kullanım alanı bulmaktadır (Yoo ve

Yoon, 2016) (Şekil 1.3). Prefabrik köprü kirişleri ve plaklar UYPLB'un en çok kullanıldığı yapısal eleman türleridir (Graybeal, 2008) (Şekil 1.3). Ayrıca, prefabrik elemanların ıslak birleşimlerinde UYPLB'un çok iyi bir performans gösterdiği belirlenmiştir. UYPLB üstün mekanik özelliklerinin yanısıra sahip olduğu geçirimsizlik ve yüksek durabilite özellikleri nedeniyle çevre koşullarına maruz betonarme köprü, viyadük, iskele, liman vb. yapıların onarım ve takviyesinde de kullanım alanı bulmaktadır (Alaee, 2003; Farhat vd., 2007) (Şekil 1.3). Bununla birlikte, UYPLB'un geleneksel betonla kompozit olarak kullanılması üzerine farklı çalışmaların başlandığı görülmektedir (SAMMARIS, 2005; Habel vd., 2007). UYPLB içerisindeki lifler sayesinde kesme dayanımı bakımından da geleneksel betona göre önemli üstünlüğe sahiptir. Bu bağlamda, perdelerin bağ kirişleri gibi yüksek kesme kuvvetine maruz elemanlarda UYPLB kullanımına yönelik çalışmalar yapılmış ve oldukça iyi performanslar elde edildiği rapor edilmiştir (Canbolat vd., 2005).



Şekil 1.3: UYPLB'un çeşitli kullanım alanlarına ait örnekler

UYPLB'un yukarıda belirtilen üstün özelliklerine rağmen mühendislik uygulamalarındaki kullanımı çok kısıtlıdır. UYPLB'un betonarme elemanlardaki kullanımı daha çok durabilite amaçlı olmakla birlikte mekanik özelliklerindeki kapasite avantajları tam olarak kullanılamamaktadır. UYPLB'un yaygınlaşması ve kapasitesinin etkin olarak kullanılabilmesi için üretiminin daha kolay hale getirilmesi ve yapısal elemanların tasarımı için basitleştirilmiş ve lif içerikleri bakımından çeşitlilik gösteren standartlarının oluşturulması önem arz etmektedir. Mevcut standartlar ve ön standart niteliğindeki dokümanlar tasarımda belirli lif tiplerinin kullanımını esas almakta ve teknik donanım gerektiren özel testlerin yapılmasını zorunlu kılmaktadır. UYPLB'da kullanılan liflerin özellikleri (şekli, boyutu ve oranı), kullanıldığı betonarme elemanın özelliklerine de bağlı olarak davranışı önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu nedenle, yapısal elemanlarda istenilen mekanik özelliklere göre etkin lif içeriğinin belirlenmesine ve çok sayıda parametrik deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu bağlamda, yapısal elemanlar üzerinde yapılacak çalışmaların UYPLB'a ait tasarım standartlarının geliştirilmesine katkı sağlayacağı ve UYPLB kullanımını yaygın hale getireceği düşünülmektedir.

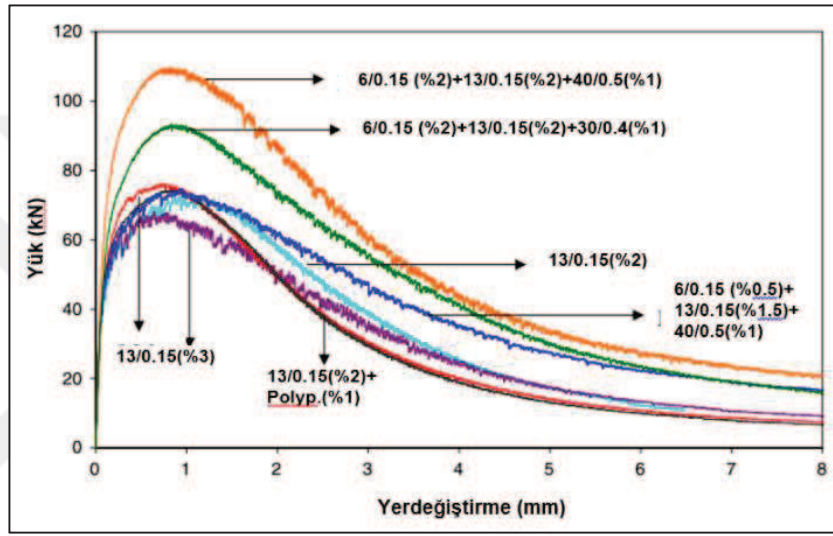
1.2 Literatür Özeti

Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) ile üretilmiş elemanların eğilme davranışı ile ilgili çalışmalar iki ayrı bölümde sunulmuştur. Birinci bölümde küp, prizma vb. küçük boyutta numunelerin kullanıldığı ve UYPLB üretimine yönelik malzeme esaslı çalışmalar, ikinci bölümde ise UYPLB içeren betonarme elemanlar (kirişler) üzerinde yapılan çalışmalar özetlenmiştir. Son olarak, özetlenen çalışmalara ait genel değerlendirmeler yapılmıştır.

1.2.1 UYPLB'un Eğilme Davranışı ile İlgili Malzeme Esaslı Çalışmalar

Skazlic ve Bjegovic (2009)'da, çelik lif oranının ve tipinin UYPLB'un eğilme davranışına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında 6/0.15 mm ve 13/0.15 mm boyutlarında düz çelik lifler ile 30/0.4 ve 40/0.5 mm'lik kancalı çelik lifler kullanılmıştır. Hacimsel olarak üç farklı hacimsel lif oranı (%2, %3 ve %5) için, sadece 13/0.15 mm tekil çelik lif içeren ve farklı lif tiplerinin karma (hibrit) olarak kullanıldığı, ortalama 200 MPa basınç dayanımına sahip UYPLB karışımları

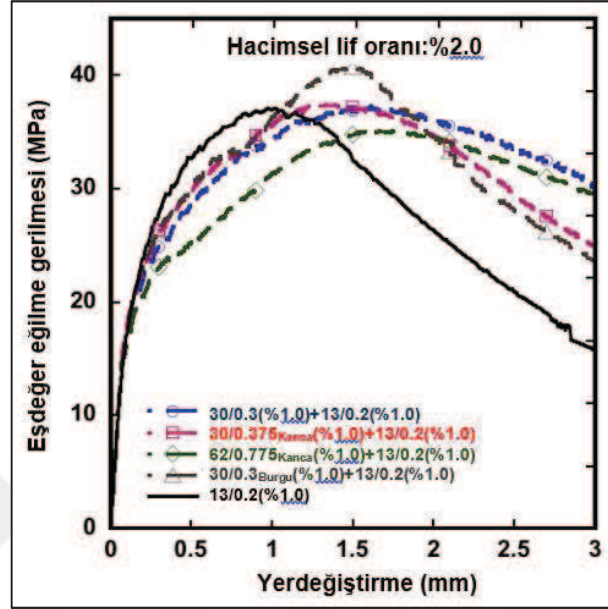
hazırlanmış ve 100x100x400 mm prizma numuneler üretilerek dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, her bir karışım için üretilen prizma numunelerin dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilerek yük-düşey yerdeğiştirme grafikleri elde edilmiş ve sonuçlar tokluk (enerji yutma kapasitesi) değerleri açısından değerlendirilmiştir (Şekil 1.4). Sonuç olarak, hacimsel lif oranı arttıkça tokluğun arttığı görülmüştür. Hacimsel olarak aynı lif oranına sahip prizma numuneleri için, karma çelik liflerin tekil lif kullanımına göre daha iyi bir eğilme davranışı gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 1.4: Farklı çelik lif içeriklerine sahip numunelerin yük-düşey yerdeğiştirme davranışları (Skazlic ve Bjegovic, 2009)

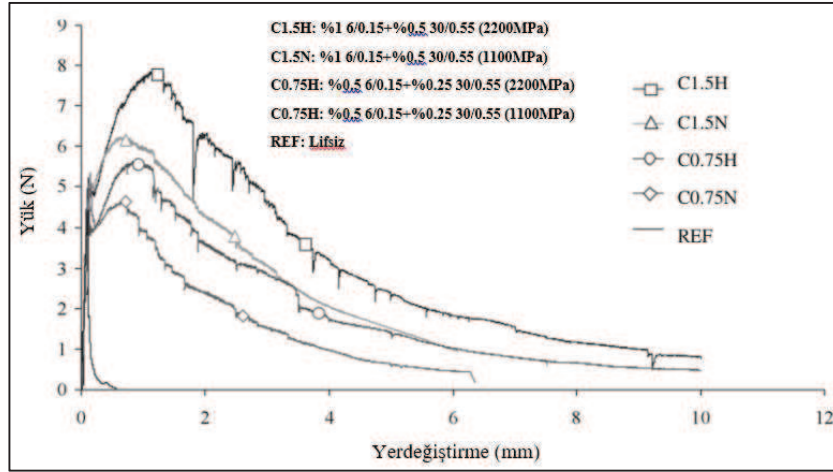
Kim vd. (2011)'de, farklı tipte çelik liflerin karma (hibrit) kullanımının UYPLB'un eğilme davranışına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında 30/0.3 mm düz, 30/0.375 mm ve 62/0.775 mm kancalı, 30/0.3 mm burgulu (makro) ve 13/0.2 mm düz kısa (mikro) çelik lifler olmak üzere 5 tip lif kullanılmıştır. Ortalama basınç dayanımı 200 MPa olan beton karışımı için hacimsel olarak %1 oranında makro ve üç farklı oranda (% 0.5, 1.0 ve 1.5) mikro çelik lifler birlikte kullanılarak karma lifli karışımlar hazırlanmıştır. Her bir karışım için 100x100x400 mm boyutlarında prizma numuneler üretilmiş ve ASTM C 1609'da belirtilen dört noktalı eğilme test prosedürü gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar eğilme dayanımı, yerdeğiştirme kapasitesi ve tokluk (enerji yutma kapasitesi) parametreleri açısından değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, karma lifli karışımların yerdeğiştirme kapasitesi ve tokluk açısından mikro lifli karışımlara göre belirgin şekilde daha iyi

performans gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 1.5). Karma lifli karışımlara ait eğilme davranışının kullanılan mikro lif oranına ve makro lifin tipine bağlı olarak değişim gösterdiği ve ayrıca, karışımdaki mikro lif oranı arttıkça daha yüksek eğilme dayanımı değerlerinin elde edildiği belirlenmiştir.



Şekil 1.5: Karma çelik lif kullanımının eğilme davranışına etkisi (Kim vd., 2011)

Akçay ve Taşdemir (2012)'de, karma (hibrit) çelik lifli ve kendiliğinden yerleşen özellikteki betonun mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Karma lifli karışımlar iki farklı hacimsel oran için (%0.75 ve %1.50), 6/0.15 mm'lik kısa düz çelik lifler ile 30/0.55 mm'lik kancalı lifler beraber kullanılarak oluşturulmuştur. Hazırlanan karışımlar için 116.3-123.6 MPa arasında değişen beton basınç dayanımları elde edilmiştir. Her bir karışım için 100x100x500 mm boyutlarında çentikli prizma numuneler hazırlanmış ve eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Tokluk ve süneklik parametreleri basımından yüksek dayanımlı kancalı lif bulunan numunelerin daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Ayrıca, çelik liflerin dayanımının artması ile numunelerin yerdeğiştirme kapasitelerinin de arttığı belirlenmiştir (Şekil 1.6).

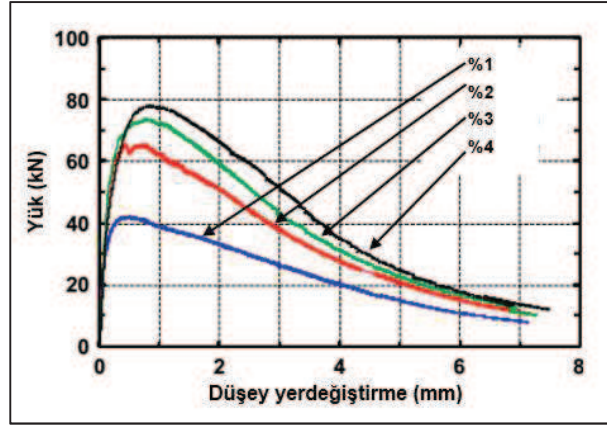


Şekil 1.6: Numunelerin yük-düşey yerdeğiştirme davranışları (Akçay ve Taşdemir, 2012)

Ye vd., (2012)'de, karma çelik lif kullanımının Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB)'un eğilme davranışı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, 13/0.2 ve 19/0.2 mm boyutlarında düz kısa, 30/0.7 ve 35/0.7 mm'lik uzun kancalı ve 30/0.7 mm'lik yassı uçlu uzun çelik lifler %2 hacimsel oranda kullanılmış ve UYPB karışımlar hazırlanmıştır. Ayrıca, uzun ve kısa lifler farklı oranlarda karıştırılarak karma lifli ve karşılaştırma yapmak amacıyla lifsiz karışımlarda hazırlanmıştır. Lifsiz karışım için 103 MPa, lifli UYPB karışımlarda ise 107-136 MPa arasında değişen beton basınç dayanımları elde edilmiştir. Her bir karışım için 100x100x400 mm boyutlarında prizma numuneler üretilmiş ve eğilme testleri yapılmıştır. Karma lifli karışımlara ait test sonuçları incelendiğinde, kısa düz liflerin eğilme dayanımını, uzun kancalı liflerin ise sünekliği önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, UYPB karışımında kullanılan çelik liflerin boyu arttıkça betonun sünekliğinin de arttığı belirlenmiştir. Çatlak kontrolü açısından en iyi performansı kancalı liflerin gösterdiği belirlenmiştir.

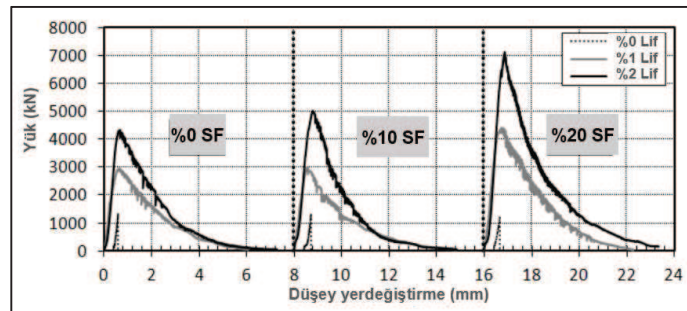
Yoo vd., (2013)'te, farklı oranlarda çelik lif kullanımının UYPLB'un eğilme davranışına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, 13/0.2 mm boyutlarında düz çelik lif dört farklı hacimsel oranda (%1-%4) kullanılarak 180-210 MPa arasında değişen beton basınç dayanımları elde edilmiştir. Her bir karışım için 100x100x400 mm boyutlarında çentikli prizma numuneler üretilmiş ve üç noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Testler sonucunda, çelik lif oranının artması ile elemanın eğilme dayanımının arttığı, buna karşın ilk çatlak yükünün belirgin şekilde etkilenmediği

görülmüştür (Şekil 1.7). Ayrıca, lif oranının artması ile tepe yükü sonrasında daha gevrek bir davranışın hakim olduğu ve sünekliğin azaldığı belirlenmiştir.



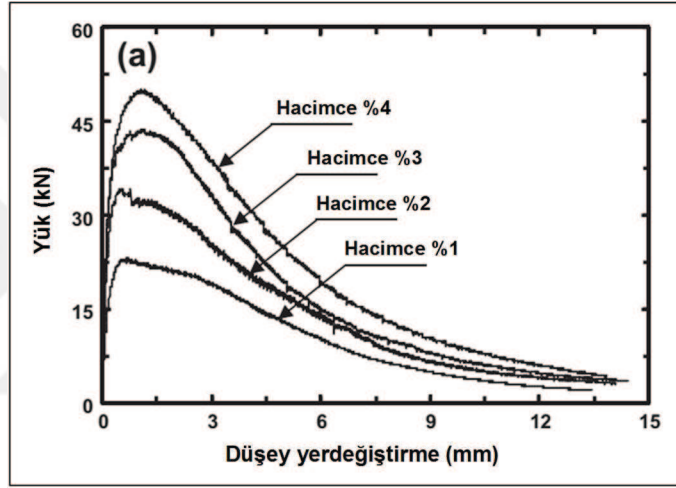
Şekil 1.7: Farklı hacimsel lif oranları için yük-düşey yerdeğiştirme davranışları (Yoo vd., 2013)

Beglarigale vd., (2014)'te çelik lif ve silis dumanı oranlarının Reaktif Pudra Betonu (RPB)'nin mekanik özelliklerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada silis dumanı (SF) çimento ile farklı oranlarda (ağırlıkça %0, %10 ve %20) ikame edilerek lifsiz ve lifli karışımlar hazırlanmıştır. Lifli karışımlarda iki farklı hacimsel oranda (%1 ve %2) 6/0.15 mm boyutlarında çelik lif kullanılmış ve yaklaşık 120-210 MPa arasında değişen beton basınç dayanımları elde edilmiştir. Her bir lif oranı için 40x40x160 mm boyutlarında çentikli prizma numuneler üretilmiş ve üç noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Lifsiz numunelerde tepe yükünden sonra ani yük düşüşü sonucu gevrek kırılma gerçekleşirken, lifli numunelerin hem tepe yükünde hem de sünekliğinde belirgin artışlar elde edilmiştir (Şekil 1.8). Silis dumanı etkisinden bağımsız olarak eğilme dayanımlarının lifsiz betona göre %1 lif kullanımı sonucu 2.4 kat, %2 lifte ise 3.4 kat artış gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 1.8: Farklı lif ve silis dumanı oranlarının eğilme davranışına etkisi (Beglarigale vd., 2014)

Yoo vd., (2014a)'da, hacimsel çelik lif oranının UYPLB'un eğilme davranışına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada %1-%4 arasında farklı hacimsel lif oranları için 13/0.2 mm boyutlarında düz kısa çelik lif kullanılarak UYPLB karışımları hazırlanmıştır. İncelenen hacimsel lif oranları için 185-207 MPa arasında değişen ortalama basınç dayanımları elde edilmiştir. Her bir lif oranı için 100x100x400 mm boyutlarında çentikli prizma numuneler üretilmiş ve üç noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, hacimsel lif oranının artması ile tepe yükünün arttığı, sünekliğin ise azaldığı belirlenmiştir (Şekil 1.9). Ayrıca, tüm prizma numunelerde ilk çatlak sonrası yük taşıma kapasitesinde belirgin bir artışın (deflection hardening) olduğu görülmüştür.

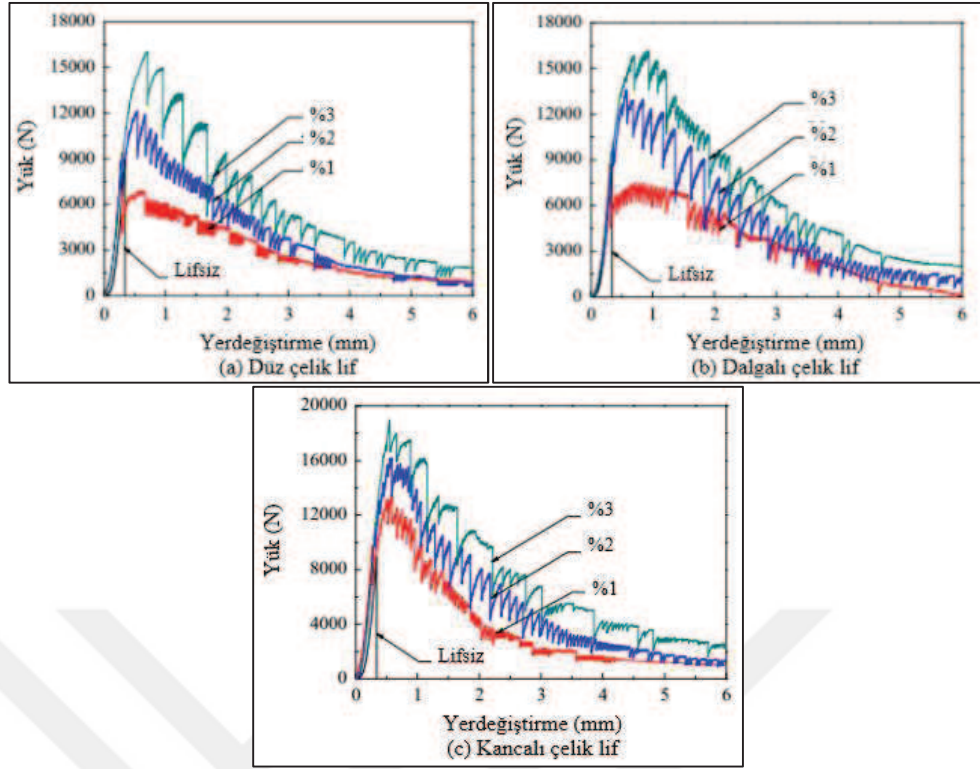


Şekil 1.9: Farklı hacimsel lif oranları için yük-düşey yerdeğiştirme davranışları (Yoo vd., 2014a)

Yoo vd., (2014b)'de, çelik lif boyunun UYPLB'un eğilme davranışına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, 13, 16.3, 19.5 ve 30 mm olmak üzere dört farklı boyda düz çelik lif kullanarak 100x100x400 mm boyutlarında çentikli prizma numuneler üretilmiş ve üç noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan UYPLB karışımlarında hacimsel lif oranı sabit tutulmuş (%2) ve ortalama 200 MPa'lık bir beton basınç dayanımı elde edilmiştir. Sonuç olarak 19.5 mm'ye kadar lif boyunun artması ile eğilme dayanımının arttığı, lif boyunun 30 mm'ye çıkması ile eğilme dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte elde edilen sonuçlar, lif boyunun eğilme dayanımı, ilk çatlak dayanımı ve buna karşı gelen yerdeğiştirme değerlerine belirgin bir etkisinin olmadığını göstermiştir.

Abbas vd., (2015)'te, UYPB'un eğilme davranışına çelik lif boyunun ve hacimsel oranının etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, üç farklı uzunlukta (8, 12 ve 16 mm) ve hacimsel oranda (%1, %3 ve %6) çelik lifler kullanılmış, 151-173 MPa arasında değişen beton basınç dayanımları elde edilmiştir. Dört noktalı eğilme testlerinde kullanılmak üzere her bir lif tipi ve hacimsel oranı için 100x100x400 mm boyutlarında prizma numuneler hazırlanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, aynı hacimsel lif oranı için kısa liflerin uzun liflere göre ilk çatlak yükü ve tepe yükü (yük taşıma kapasitesi) değerlerini arttırdığını göstermiştir. Numunelerin yük-düşey yerdeğiştirme ilişkileri incelendiğinde, tepe yükü sonrası bölümün kısa lifli numunelerde kısaldığı ve yük düşüşlerinin daha fazla olduğu görülmüştür. Uzun lifli numunelerde ise, tepe yükü sonrası daha uzun bir kuyruk bölümü gözlenirken, dayanım kayıplarının daha az olduğu belirlenmiştir. Bunun sonucu olarak, uzun lifli numunelerde kısa liflilere göre daha yüksek tokluk değerleri elde edilmiştir. Tüm lif tipleri için hacimsel oran arttıkça ilk çatlak yükü ve tepe yükünün arttığı, buna karşın rijitlikte belirgin bir değişikliğin olmadığı belirlenmiştir.

Wu vd., (2016)'da, çelik lif içeriğinin (tipi ve hacimsel oranı) UYPB'un mekanik özelliklerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, 13/0.2 mm boyutlarında üç farklı tipte (düz, dalgalı ve kancalı) ve üç farklı hacimsel oranda (%1, %2 ve %3) çelik lif kullanılmıştır. Her bir lif tipi ve oranı için üçer adet 40x40x160 mm boyutlarında prizma numuneler ile referans olarak kullanılmak üzere üç adet liffsiz numune hazırlanmıştır. Üç noktalı eğilme testleri sonucunda, her bir lif içeriği için hazırlanan üç adet prizmanın ortalamasını ifade eden ortalama yük-düşey yerdeğiştirme davranışları elde edilmiş (Şekil 1.10) ve sonuçlar ilk çatlak yükü ve yerdeğiştirmesi, tepe yükü ve yerdeğiştirmesi ile tokluk parametreleri açısından değerlendirilmiştir. Çalışmada lif içeriğinin ilk çatlak dayanımına ve yerdeğiştirmesine etkisinin oldukça sınırlı olduğu görülmüştür. Buna karşın, lif oranının artmasının tepe yükü ve yerdeğiştirmesi ile tokluğu belirgin şekilde arttırdığı belirlenmiştir.



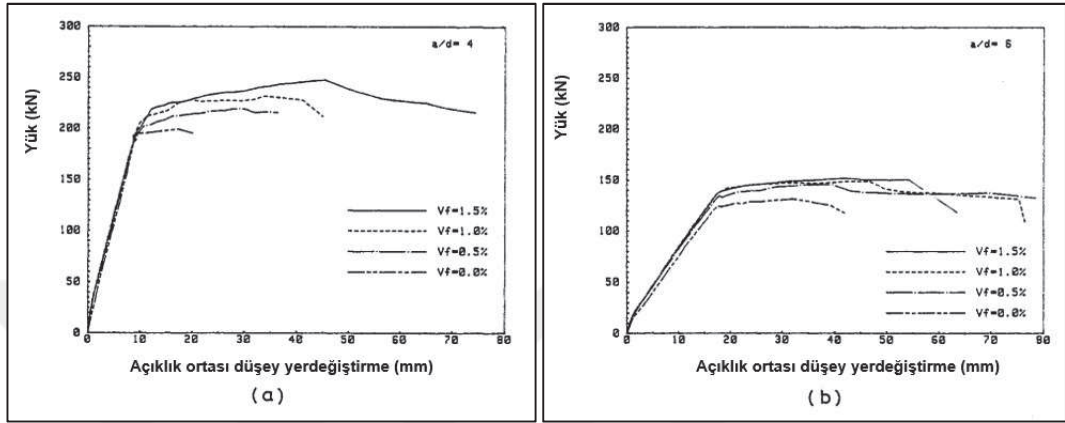
Şekil 1.10: Numunelerin yük-düşey yerdeğiştirme davranışları (Wu vd., 2016)

1.2.2 UYPLB ile Üretilen Betonarme Kiriş Elemanların Eğilme Davranışı ile İlgili Çalışmalar

Literatürde, beton basınç dayanımları 80-100 MPa arasında olan ve yüksek dayanımlı beton sınıfına giren betonarme kirişlerin eğilme davranışı ile ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların çoğunda, yüksek dayanımlı kirişlerin eğilme davranışlarına çelik liflerin katkısı araştırılmıştır. Buna karşın, UYPLB ile üretilmiş elemanların eğilme davranışı ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır. Bu çalışmaların genel özeti aşağıda sunulmuştur.

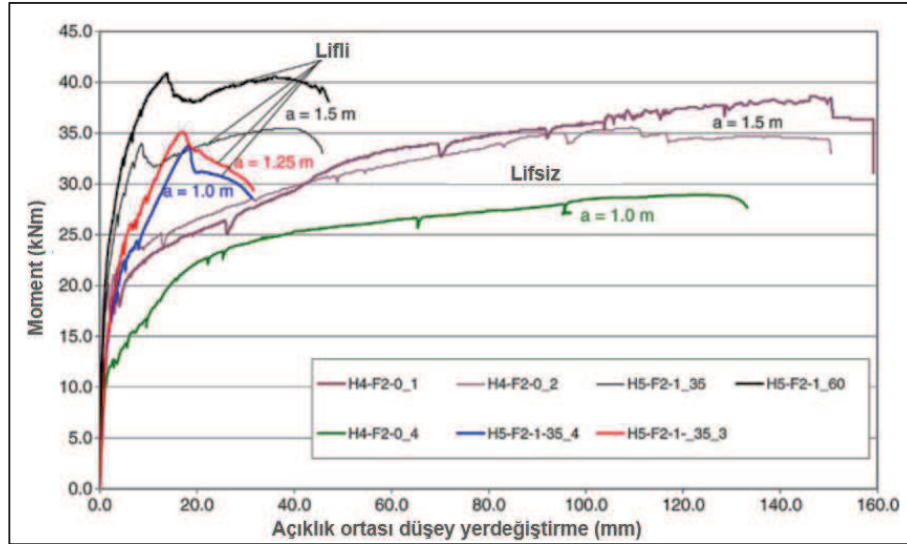
Ashour ve Wafa (1993)'te, yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde çelik liflerin eğilme davranışına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında, farklı çelik lif içeriklerine sahip, 170x300x2620/3680 mm boyutlarında ve iki farklı kesme açıklığı/enkesit yüksekliği oranına (a/d) sahip dikdörtgen enkesitli 8 adet test kirişi üretilmiştir. Lifsiz ve üç farklı hacimsel lif oranına sahip (%0, %0.5, %1.0 ve %1.5) test kirişleri için ortalama 88 MPa'lık beton basınç dayanımı elde edilmiştir. Çelik lifli kirişlerde, yumuşak çelikten üretilmiş kancalı lifler kullanılmış (60/0.8 mm) ve çekme donatısı oranı sabit tutulmuştur ($\rho = 0.014$). Test kirişlerinin tamamı, beton basınç

bölgesinde ezilme meydana gelmeden çekme donatısının kopması sonucunda kırılmıştır. İncelenen kirişlerin dört noktalı eğilme testleri sonucunda; yüksek dayanımlı betona eklenen çelik liflerin, kirişlerin çatlak genişliğini ve sayısını azalttığı, bununla birlikte eğilme dayanımını, sünekliğini ve eğilme rijitliğini artırdığı belirlenmiştir (Şekil 1.11).



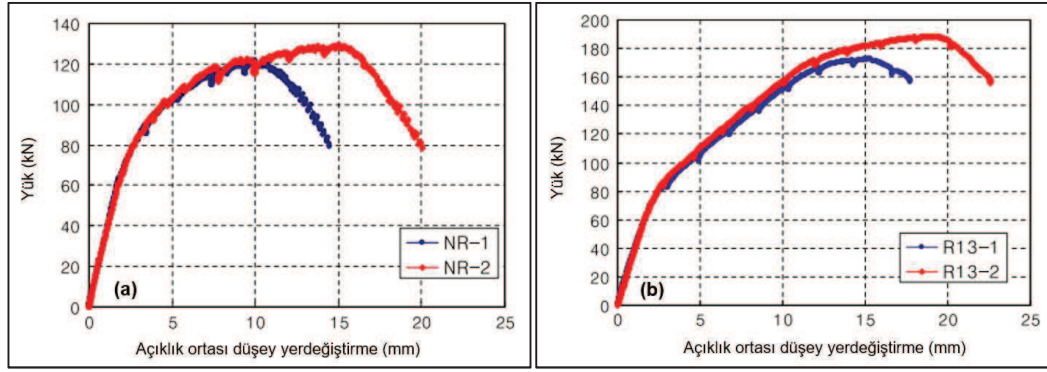
Şekil 1.11: İki farklı a/d oranı için yüksek dayanımlı çelik lifli kirişlerin yük-açıklık ortası düşey yerdeğiştirme davranışları (Ashour ve Wafa, 1993)

Dancygier ve Zavir (2006)'da, minimum çekme donatısına sahip yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde çelik liflerin eğilme davranışına katkısı deneysel olarak incelenmiştir. Bunun için, lifsiz ve lif içeren dikdörtgen enkesitli (200x300x3500 mm) test kirişleri üretilmiştir. Çelik lifli kirişler için hacimsel lif oranı sabit tutulmuş (%0.75) ve 115-130 MPa arasında değişen beton basınç dayanımları elde edilmiştir. Kirişlerin çatlak davranışı ve kırılma şekilleri incelendiğinde, lifsiz kirişlerde kiriş açıklığı boyunca çok sayıda düzenli çatlak meydana geldiği ve kırılma durumunun beton basınç bölgesinde ezilme veya donatı kopması sonucunda olduğu belirlenmiştir. Çelik lifli kirişlerde ise, küçük eğilme çatlaklarının yanısıra salt eğilme bölgesinde büyük bir çatlak oluşmuş ve bu bölgedeki donatı kopması sonucunda kırılma meydana gelmiştir. Kiriş testleri sonucunda; minimum çekme donatısına sahip kirişlere eklenen çelik liflerin daha gevrek bir davranışa neden olduğu belirlenmiştir (Şekil 1.12). Bu sonuç, sadece %0.75 lif oranı içeren test kirişleri için elde edilmiş, yüksek lif oranları için bir araştırma yapılmamıştır. Yüksek dayanımlı kirişlerde yeterli sünekliğin sağlanması için, geleneksel betonarme elemanlar için öngörülen minimum çekme donatısı oranının artırılması önerilmiştir.



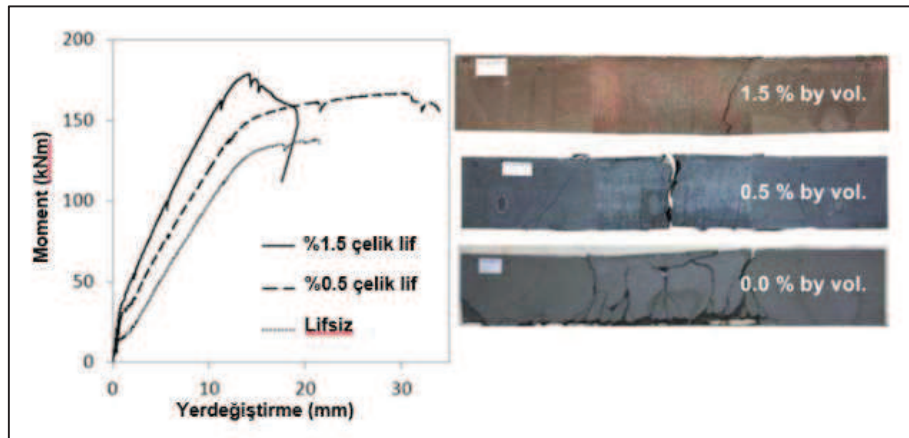
Şekil 1.12: Düşük çekme donatısına sahip çelik lifli ve lifsiz kirişlerin moment-açıklık ortası düşey yerdeğiştirme davranışları (Dancygier ve Zavir, 2006)

Yang vd., (2010)'da, UYPLB'lu kirişlerin eğilme davranışını etkileyen parametreler deneysel olarak araştırılmıştır. Bunun için, 180x270x2900 mm boyutlarında ve %2 hacimsel oranda düz kısa çelik lif (13/0.2 mm) içeren 14 adet test kirişi üzerinde, farklı çekme donatısı oranı ve yerleşiminin çatlak ve kırılma yüküne, sünekliliğe ve eğilme kapasitesine etkisi incelenmiştir. Dikdörtgen enkesitli test kirişleri için ortalama 190 MPa'lık beton basınç dayanımı elde edilmiştir. Dört noktalı eğilme testleri sonucunda, donatısız ve donatılı kirişlere ait *yük-düşey yerdeğiştirme* davranışları Şekil 1.13'te gösterilmiştir. Testlerde tüm kirişlerin sünek davranış gösterdiği ve çekme kırılmasının çelik liflerin betondan sıyrıldıktan sonra olduğu görülmüştür. Çekme donatısı oranı arttıkça UYPLB'lu kirişlerin eğilme dayanımının ve sünekliliğinin arttığı belirlenmiştir. Kullanılan çelik liflerin ilk çatlak sonrası sergilediği köprüleme özelliği sayesinde sünekliliğin arttığı belirlenmiştir. Kirişlerin çatlak davranışı ve kırılma şekilleri incelendiğinde, çok sayıda ve sıkı düzenli çatlakların meydana geldiği görülmüştür. Bu davranışın, liflerin sıyrılmadan önce gerilmenin yeniden dağılımını sağlaması ve çoklu çatlak oluşturma özelliği sonucu meydana geldiği belirtilmektedir. UYPLB karışımında lif tipi ve oranı sabit olduğu için lif oranının davranışa olan etkisi bu çalışmada ortaya konulmamıştır.



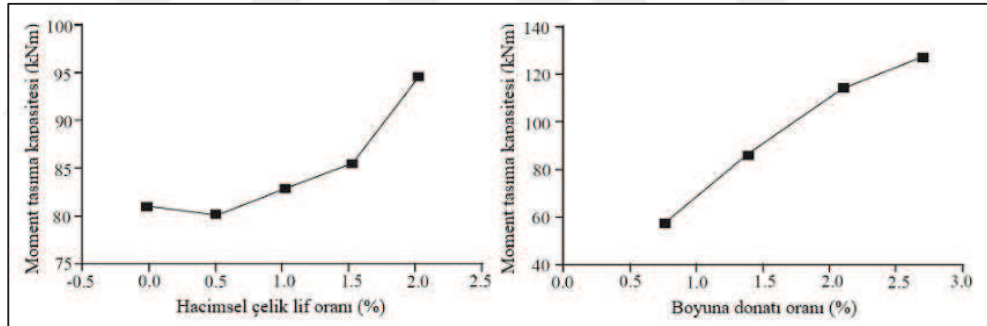
Şekil 1.13: Kirişlerin yük-açıklık ortası düşey yerdeğiştirme davranışları:
a) Donatısız b) Donatılı (Yang vd., 2010)

Stürwald ve Fehling (2012)'de, UYPLB ile üretilmiş betonarme elemanların eğilme davranışı deneysel olarak incelenmiş ve bir mekanik model önerilmiştir. Çalışmada, çelik lif ve geleneksel donatı içeren 150x150x2000 mm ve 150x350x2000 mm boyutlarında dikdörtgen enkesitli toplam 10 adet test kirişi üretilmiştir. UYPLB karışımında, farklı hacimsel çelik lif oranları (%0, %0.5 ve %1.5) için düz çelik lif (20/0.25 mm) kullanılmış ve 180-200 MPa arasında beton basınç dayanımları elde edilmiştir. Aynı enkesit boyutu ve donatı oranına sahip kirişlerin dört noktalı eğilme testleri sonucunda; UYPLB'da kullanılan lif oranı arttıkça kirişin rijitliğinin ve yük taşıma kapasitesinin arttığı, çatlak genişliğinin sınırlandığı, buna karşın sünekliğin azaldığı belirlenmiştir. Çelik lif oranı arttıkça kirişin kırılma şeklinin değiştiği ve ayrıca, oluşan eğilme çatlaklarının lifler nedeniyle bölgeleşerek tek çatlak haline geldiği gözlenmiştir (Şekil 1.14). Çalışmada, UYPLB içeren betonarme kirişlerde eğilme davranışının elde edilmesi için daha yüksek oranda çekme donatısı ve çelik lifin kullanılmasına gerek duyulduğu belirtilmiştir.



Şekil 1.14: Farklı lif oranları için moment-düşey yerdeğiştirme davranışları ve kırılma şekilleri (Stürwald ve Fehling, 2012)

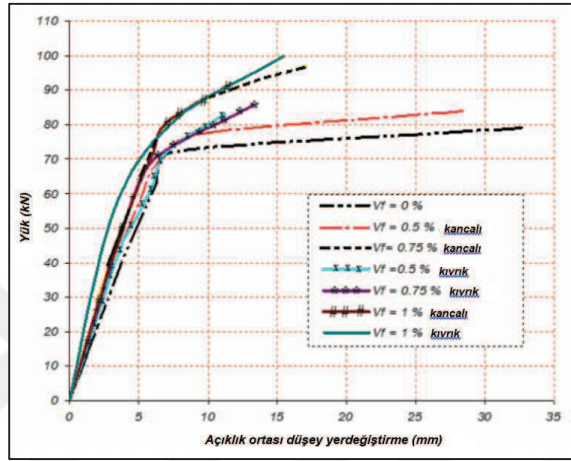
Guan vd., (2013)'te, yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin eğilme davranışına çekme donatısı oranının, hacimsel çelik lif oranının ve enkesit yüksekliğinin etkileri parametrik olarak incelenmiştir. Çalışmada, dört farklı çekme donatısı oranı ($\rho = \%0.77, \%1.39, \%2.10$ ve $\%2.70$), dört lif oranı ($\%0, \%0.5, \%1.0$ ve $\%2.0$) ve üç farklı enkesit yüksekliği esas alınarak toplam 11 adet test kirişi üretilmiştir. Çelik lifli kirişlerde 32 mm boyunda kancalı lifler kullanılmıştır. Test kirişlerinin üretilmesinde, göz önüne alınan parametrelerden ikisi sabit tutularak diğerinin değişimi esas alınmıştır. Lifsiz karışımların tasarımı 60 MPa'lık beton basınç dayanımı için yapılmıştır. Kirişlerin dört noktalı eğilme testleri sonucunda; lifsiz duruma göre çelik lif oranı arttıkça moment taşıma kapasitesinin ve ölçülen yerdeğiştirmenin arttığı ve $\%1$ lif oranından sonra bu artışın daha belirgin olduğu görülmüştür (Şekil 1.15). Yüksek dayanımlı ve çelik lif içeren betonarme kirişlerin eğilme kapasitesinde, çekme donatısı oranının önemli bir etkisinin olduğu belirlenmiştir (Şekil 1.15). Ayrıca, incelenen lifli kirişlerin eğilme davranışında enkesit yüksekliğinin de önemli bir parametre olduğu ifade edilmektedir.



Şekil 1.15: Hacimsel çelik lif oranının ve çekme donatısı oranının moment taşıma kapasitesine etkisi (Guan vd., 2013)

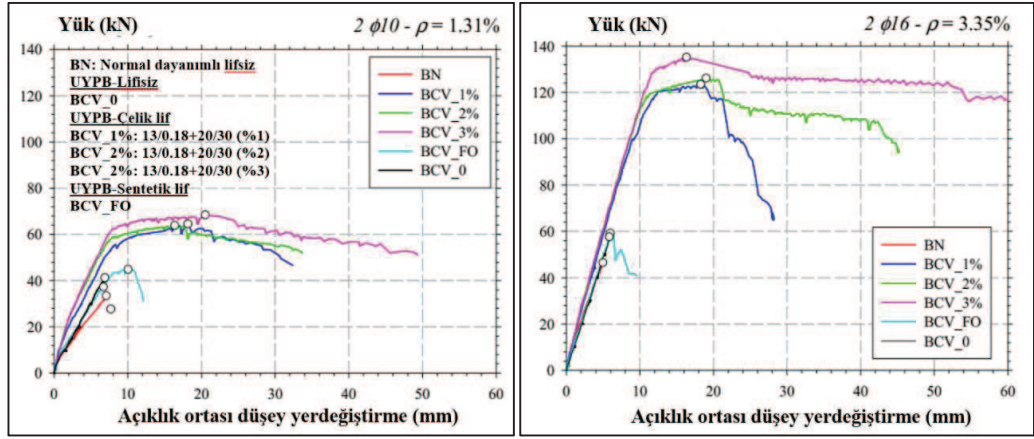
Khalil ve Tayfur (2013)'te, UYPLB'lu kirişlerde çelik lif tipinin ve hacimsel lif oranının eğilme davranışına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Bunun için, üç farklı hacimsel lif oranı ($\%0.5, \%0.75$ ve $\%1.00$) ve iki çelik lif tipi (30 mm uzunluğunda kancalı ve kıvrık) içeren 150x250x1950 mm boyutlarında dikdörtgen enkesitli 10 adet test kirişi üretilmiştir. Ayrıca, karşılaştırmalar yapmak amacıyla lifsiz bir kiriş de üretilmiştir. Tüm kirişlerde çekme donatısı oranı sabit tutulmuştur ($\rho = 0.005$). Çelik lif içeren kirişler için ortalama 143 MPa'lık beton basınç dayanımı elde edilmiştir. Test kirişlerinin tamamı çekme donatısının kopması sonucunda kırılmıştır. Betonarme kirişlerin dört noktalı eğilme testleri sonucunda; $\%0.75$ ve $\%1$

oranında kancalı lif içeren kirişler dışında, karışıma eklenen çelik liflerin ilk çatlak yüküne önemli bir etkisinin olmadığı, %1 oranında kancalı ve kıvrık tipte lif içeren kirişler için moment taşıma kapasitesini yaklaşık %25 oranında artırdığı belirlenmiştir (Şekil 1.16). Bununla birlikte, UYPLB'lu kirişlerin kırılma durumundaki çatlak sayısının, lifsiz referans kirişe göre çok daha fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca, lif tipinden bağımsız olarak, herhangi bir yük seviyesi için çelik liflerin basınç ve çekme bölgesindeki birim şekildeğiştirmeleri azalttığı belirlenmiştir.



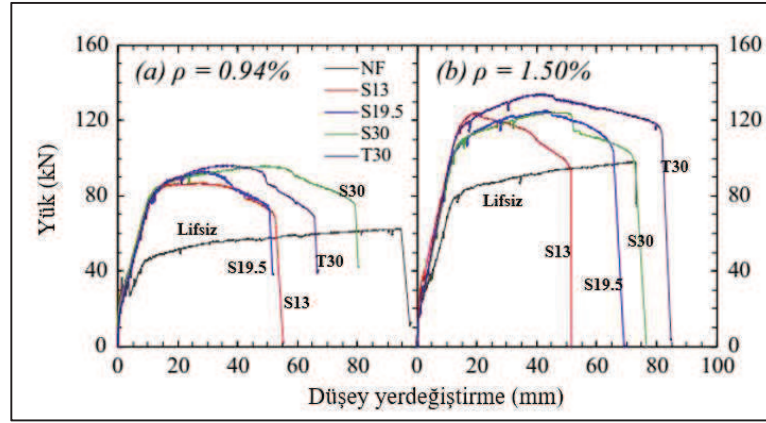
Şekil 1.16: Her iki lif tipi için kirişlerin yük-açıklık ortası düşey yerdeğiştirme davranışları (Khalil ve Tayfur, 2013)

Nseir vd., (2013)'te, eğilme ve kayma gerilmeleri etkisindeki UYPLB'lu kirişlerin eğilme davranışına çelik lif içeriğinin etkisi deneysel olarak incelenmiştir. İki farklı çekme donatısı oranı ($\rho = 0.0131$ ve 0.0335) için hacimce %1 oranında 13/0.18 mm çelik lifli, üç farklı lif oranı (%1, 2 ve 3) için karma çelik lifli (13/0.18 mm ve 20/0.30 mm) ve lifsiz olmak üzere toplam 25 adet test kirişi üretilmiştir. Test kirişleri için ortalama beton basınç dayanımı 150 MPa olarak elde edilmiştir. Farklı çekme donatısı oranlarına sahip kirişler için, lifsiz ve tekil (tek tip) lif içeren kirişlerin kesme kırılması nedeniyle gevrek kırıldığı, buna karşın karma liflerin kullanıldığı kirişlerde sünek eğilme kırılmasının meydana geldiği görülmüştür (Şekil 1.17). İncelenen kirişlerin eğilme testleri sonucunda; UYPLB'un gevrek kırılma olmaksızın yüksek donatı oranlarına sahip narin elemanlara imkan verdiği ve çelik liflerin yük taşıma kapasitesini arttırmasına karşın yerdeğiştirme sünekliğini azalttığı belirlenmiştir. Genel olarak, optimum oranda kullanılacak çekme donatısı ile birlikte, çelik liflerin kiriş boyutlarının azaltılmasında ekonomik çözümler yaratabileceği ve basınç donatısı yerine çelik liflerin kullanılabileceği belirtilmiştir.



Şekil 1.17: İki farklı çekme donatısına sahip kirişlerin yük-açıklık ortası düşey yerdeğiştirme davranışları (Nseir vd., 2013)

Yoo ve Yoon (2015)'te, UYPLB içeren betonarme kirişlerin eğilme davranışına çelik lif tipinin ve çekme donatısı oranının etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada, iki farklı çekme donatısı oranı ($\rho = 0.0094$ ve 0.015) ve üç farklı uzunlukta (13, 19.5 ve 30 mm) düz çelik lif ile 30 mm uzunluğunda bükümlü çelik lif içeren dikdörtgen enkesitli (150x220x2500 mm) kirişler üretilmiştir. UYPLB karışımlarında hacimsel lif oranı sabit tutulmuştur (%2). Ayrıca, karşılaştırmalar yapmak amacıyla her bir donatı oranı için lifsiz kirişler de üretilmiştir. Üretilen test kirişleri için lifsiz karışımda 200 MPa, lifli karışımlarda ise 209-232 MPa arasında değişen beton basınç dayanımları elde edilmiştir. İncelenen betonarme kirişlerin dört noktalı eğilme testleri sonucunda; çelik lif kullanımının yük taşıma kapasitesini, çatlamış kesit eğilme rijitliğini ve çatlak davranışını önemli oranda arttırdığı, buna karşın yerdeğiştirme sünekliğini azalttığı belirlenmiştir (Şekil 1.18). Düz çelik liflere ait lif boyunun artması ile kirişlerin çatlak sonrası performanslarının ve sünekliklerin arttığı görülürken, yük taşıma kapasitelerinde, çatlamış kesit eğilme rijitliklerinde ve çatlak davranışında belirgin bir etki görülmemiştir. Bununla birlikte, lifsiz kirişlerde kırılma durumu beton basınç bölgesinde ezilme ile meydana gelirken, çelik lifli kirişlerde çekme donatısının kopması ile testler sonlanmıştır.



Şekil 1.18: İki farklı çekme donatısı oranı için lifsiz ve çelik lifli kirişlerin yük-düşey yerdeğiştirme davranışları (Yoo ve Yoon, 2015)

1.2.3 Literatürün Değerlendirilmesi

Literatürde farklı lif içeriklerinin UYPLB'un eğilme davranışına etkilerinin araştırıldığı malzeme esaslı çalışmalarda;

- Eğilme davranışları prizma numuneler üzerinde dört noktalı eğilme testleri yapılarak incelenmiştir. Genel olarak eğilme dayanımı, tokluk (enerji yutma kapasitesi) ve çatlak davranışı parametreleri değerlendirilmiştir.
- Lif tipinin, hacimsel oranının ve farklı lif tiplerinin bir arada kullanımının (karma) eğilme davranışına olan etkileri incelenmiştir. UYPLB'un eğilme davranışının çelik lif oranından ve tipinden belirgin şekilde etkilendiği görülmüştür. Hacimsel lif oranı arttıkça UYPLB'un eğilme dayanımının ve tokluğunun arttığı belirlenmiştir. Kancalı liflerin düz liflere göre çatlak köprüleme özelliği açısından daha etkili olduğu görülmüştür.
- Kısa liflerin tepe yükü öncesi oluşan çatlakları sınırlamada etkili oldukları ve bu sayede yük taşıma kapasitesini ve eğilme rijitliğini arttırdıkları görülmüştür. Uzun liflerin ise tepe yükü sonrası artan çatlak genişlikleri nedeniyle kısa liflere göre daha etkin oldukları ve bu sayede sünekliği ve tokluğu arttırdıkları belirtilmiştir.
- Farklı tipte liflerin karma olarak kullanılması sonucu tekil (tek tip) çelik lif kullanımına göre daha iyi bir eğilme davranışı elde edildiği belirtilmiştir.

Sonuç olarak, tekil lif içeren UYPLB'un eğilme davranışının oldukça kapsamlı olarak ortaya konduğu görülmektedir. Karma lif içeren UYPLB'un eğilme davranışında da önemli performans artışları gözlemlendiği dikkat çekmektedir. Ancak, karma lif kullanımı ile ilgili çalışmaların oldukça kısıtlı olduğu, hangi lif tiplerinin hangi oranlarda kullanılarak etkin eğilme davranışı elde edileceği konusunda çok sayıda çalışmaya ihtiyaç olduğu görülmektedir.

UYPLB ile üretilmiş betonarme kiriş elemanların eğilme davranışı ile ilgili çalışmalarda;

- Betonarme kirişlerde salt eğilme bölgesi oluşturacak şekilde yükleme yapılarak çelik lifli beton içeren betonarme elemanların eğilme davranışları incelenmiştir. Eğilme davranışının ortaya konması için yerdeğiştirme sünekliği, yük taşıma kapasitesi, eğilme rijitliği ve çatlak dağılımları gibi parametreler değerlendirilmiştir.
- Betonarme elemanlarda çelik lif kullanımının eğilme davranışını önemli ölçüde etkilediği ve geleneksel betonarme kirişlerden çok daha farklı davranışlar elde edildiği görülmüştür.
- Elemanlardaki çekme donatısı oranına da bağlı olarak, çelik lif içeriğinin (hacimsel lif oranı ve lif tipi) kiriş eğilme davranışını önemli ölçüde etkileyebildiği görülmüştür.
- Çelik lif kullanımının kiriş eğilme kapasitesini ve eğilme rijitliğini arttırdığı, bununla birlikte oluşan çatlakları sınırladığı belirlenmiştir.
- Yüksek çelik lif oranının betonarme kirişlerin sünekliğini azalttığı belirlenmiştir.
- Düşük donatı oranına sahip kirişlerde çelik lif kullanımı sünekliği azaltırken, yüksek donatı oranlarında arttırdığı görülmüştür.

Sonuç olarak, farklı donatı oranları ve farklı çelik lif içerikleri için yapısal elemanlara ait eğilme davranışlarının büyük değişim gösterdiği ve geleneksel betonarme esaslarının bu davranışı belirlemede yetersiz kaldığı ortaya konmuştur. Buna karşın, çelik lif içeriğine bağlı olarak, liflerin bazı eğilme parametrelerini iyileştirirken diğer bazı parametreler için olumsuz sonuçlar verebildiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle, eğilme davranışında etkin olan parametrelerin birlikte

değerlendirildiği ve farklı donatı oranlarına sahip kirişlerde kullanılması gereken optimum lif içeriklerinin ortaya konulduğu çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca, çok kısıtlı olarak incelenmiş olan karma liflerin betonarme kirişlerde kullanımı da araştırılması gereken bir diğer önemli konudur.

1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, kolay uygulanabilir Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) üretiminin gerçekleştirilmesi ve bu betonu içeren betonarme kirişlerde eğilme davranışının deneysel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, UYPLB'lu kirişlerin eğilme kapasitelerinin belirlenmesi için bir sayısal yöntem önerilmiş ve bu yöntemin sonuçları deneysel sonuçlar ve literatürdeki mevcut yaklaşımlar kullanılarak değerlendirilmiştir.

Çalışma deneysel ve sayısal olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Deneysel çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, kolay uygulanabilir ve eğilme davranışı bakımından uygun çelik lif içeriklerine sahip UYPLB karışımlarının belirlendiği malzeme esaslı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada yapılan incelemeler salt UYPLB içeren prizma numunelerinin eğilme testlerini içermektedir. Farklı boyutlarda çelik lifler tekil (tek tip) ve karma olarak kullanılarak UYPLB karışımlar hazırlanmış ve bunlara ait etkin lif içerikleri araştırılmıştır. İkinci aşamada ise, birinci aşamada belirlenen etkin çelik lif içerikleri ile üretilen betonarme kirişlerin eğilme davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Bu aşamada, farklı çekme donatısı oranlarına sahip 24 adet 150x250x2500 mm boyutlarında test kirişi üzerinde eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, basınç donatısı etkisi de incelenmiştir. Çalışmanın sayısal bölümünde ise, deneysel olarak incelenen betonarme kirişlerin eğilme momenti kapasitelerinin teorik hesabı için sayısal bir yöntem geliştirilmiştir. Test kirişlerine ait parametrelerin esas alındığı yaklaşımdan elde edilen sonuçlar, yüksek dayanımlı betonlar için mevcut yöntemler ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve önerilen yöntemin kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

2. UYPLB İLE ÜRETİLEN BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Deneysel çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşama, kolay uygulanabilir ve eğilme davranışı bakımından uygun çelik lif içeriklerine sahip Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) karışımlarının belirlendiği malzeme çalışmasıdır. Bu aşamada yapılan incelemelerde, UYPLB içeren küp, silindir ve prizma numuneler kullanılmıştır.

İkinci aşama ise, birinci aşamada belirlenen etkin çelik lif içerikleri ile üretilen betonarme kirişlerin eğilme davranışlarının incelendiği yapısal eleman çalışmasıdır. Bu çalışma, çekme donatısı ve basınç donatısı oranları bakımından farklılıklar içeren 150x250x2500 mm boyutlarında toplam 24 adet test kirişi üzerinde gerçekleştirilmiştir.

2.1 UYPLB ile Üretilecek Betonarme Kirişler için Etkin Lif İçeriklerinin Belirlenmesi

Bu bölümde, kolay uygulanabilir ve hedef basınç dayanımını sağlayan UYPLB üretimi hakkında detaylı bilgi verilmiş ve ayrıca, UYPLB'un eğilme davranışı bakımından etkin olan çelik lif içerikleri araştırılmıştır. Betonun kolay uygulanabilir olması amaçlandığı için standart kür koşulları altında ve standart karıştırıcılar ile işlenebilirliği yüksek bir beton üretilmesi öngörülmüştür. Üretilecek UYPLB için en az 120 MPa'lık beton basınç dayanımı hedeflenmiştir. Etkin eğilme davranışı için biri mikro, ikisi makro boyutta olmak üzere üç farklı lif tipi, tekil (tek tip) ya da farklı oranlarda birleştirilerek karma olarak kullanılmıştır.

2.1.1 UYPLB'u Oluşturan Bileşenler ve Özellikleri

UYPLB üretimi için literatürde yaygın olarak kullanılan bileşenler (çimento, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, ince agrega, akışkanlaştırıcı ve çelik lif) seçilmiştir

(Şekil 2.1). Bu bileşenlerin özellikleri ve kullanım amaçları aşağıda özetlenmiştir. Betonlu oluşturan bileşenlerin çimentoya ağırlıkça oranları Tablo 2.1’de verilmiştir.

- *Çimento*: Betonda ana bağlayıcı madde olarak kullanılmıştır. Çalışmada CEM I 42.5 R katkısız portland çimentosu kullanılmıştır.
- *Silis Dumanı*: İnceliği (çimentonun yaklaşık yüzde biri boyutunda), geniş yüzey alanı ve yüksek SiO₂ içeriği nedeniyle çok aktif bir puzolandır. Bu özellikleri nedeniyle betonun basınç dayanımını, aderansını ve aşınma direncini önemli oranda arttırmaktadır.
- *Yüksek Fırın Cürufu*: Çimento miktarını azaltmak, işlenebilirliği artırmak ve boşluk miktarını azaltmak amacıyla kullanılmaktadır.
- *Agrega*: Betonda ince agrega olarak 0-0.8 ve 1-3 mm tane çaplarında iki ayrı kuvars agregası kullanılmıştır.
- *Süper Akışkanlaştırıcı Katkı*: Karışımlardaki su/bağlayıcı oranının çok düşük olması nedeniyle gerekli işlenebilirliğin sağlanabilmesi için kullanılmaktadır. Çalışmada ASTM C 494 (2015) F tipi polikarboksilat eter esaslı yeni nesil süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır.



Şekil 2.1: UYPLB’u oluşturan bileşenler

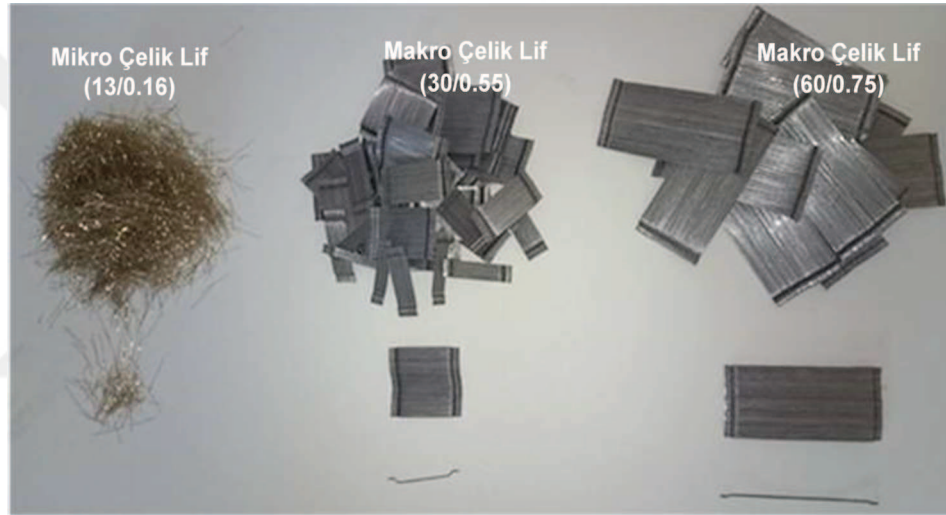
Tablo 2.1: UYPLB’u oluşturan bileşenlerin çimentoya ağırlıkça oranları

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

- *Çelik Lifler:* Üç farklı boyutta çelik lif kullanılmıştır (Şekil 2.2). Biri düz mikro boyutta, diğer ikisi kancalı ve makro boyutta liflerdir. Çelik liflerin şekilleri Şekil 2.2’de, boyutları ve mekanik özellikleri ise Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.2: Çelik liflerin boyutları ve mekanik özellikleri

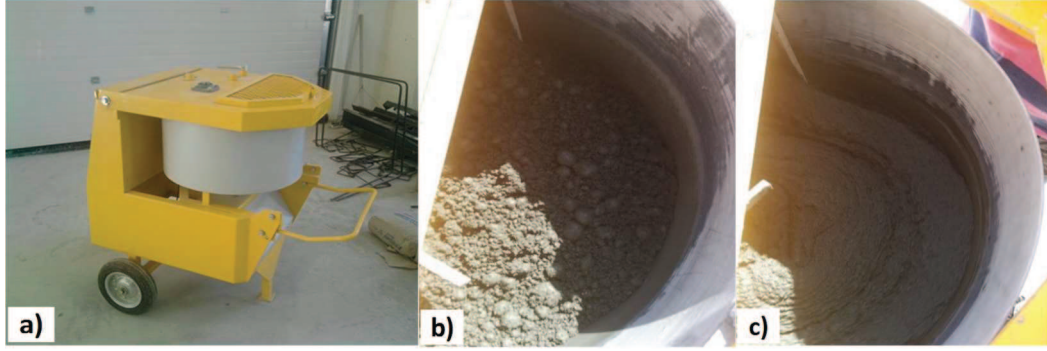
Çelik Lif Tipi	Çap (mm)	Boy (mm)	Narinlik (Boy/En)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Düz Mikro Lif	0.16	13	81	7.8	2500	210000
Kancalı Makro Lif	0.55	30	55	7.8	1345	210000
Kancalı Makro Lif	0.75	60	80	7.8	1225	210000



Şekil 2.2: Çalışmada kullanılan çelik lifler

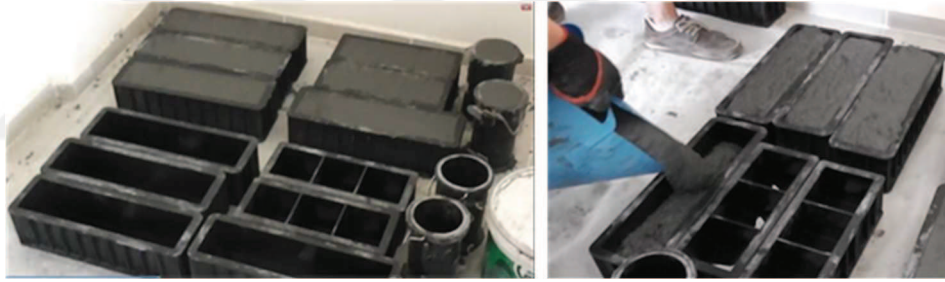
2.1.2 UYPLB’un Hazırlanması ve Numunelerin Üretimi

UYPLB için gerekli malzemeler, karışım oranlarına göre tartıldıktan sonra bağlayıcı maddeler (çimento, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu) ve agregalar 56 dm³ kapasiteli bir panmikserde kuru olarak beş dakika karıştırılmaktadır (Şekil 2.3). Daha sonra, karışıma gerekli su ve akışkanlaştırıcının yarısı ilave edilerek üç dakika daha karıştırılmaktadır. Plastik kıvamdaki UYPLB karışımına geri kalan akışkanlaştırıcı da ilave edilerek üç dakika daha karıştırıldıktan sonra çelik lifler eklenmekte ve homojen karışım elde edilene kadar karıştırmaya devam edilmektedir.



Şekil 2.3: UYPLB'un hazırlanması aşamaları; a) Panmikser, b) Yarı kuru karışım, c) Sıvı karışım

Hazırlanan beton, kovalar yardımıyla prizma, küp ve silindir numune kalıplarına doldurulmaktadır (Şekil 2.4). Prizma numuneler hazırlanırken (özellikle makro lifli betonlarda), beton dökümü kalıbın bir ucundan başlanıp diğer ucuna doğru gezdirilmekte ve böylece liflerin yönelmesi sağlanmaktadır. Hazırlanan betonlar akıcı kıvamda olduklarından sarsma işlemine gerek kalmamaktadır.



Şekil 2.4: UYPLB'un kalıplara yerleştirilmesi

Numuneler bir gün sonra kalıptan çıkarılmakta ve $20 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklığındaki standart bir kür havuzuna yerleştirilmektedir (Şekil 2.5). Hazırlanan küp numunelerin üç tanesi yedi gün sonunda kırılmakta, diğer numuneler ise test için 28 gün kür havuzunda bekletilmektedir.



Şekil 2.5: Kür havuzundaki test numuneleri

2.1.3 UYPLB'un Basınç Dayanımının, Elastisite Modülünün Belirlenmesi ve Eğilme Davranışının İncelenmesi

Çalışmada, UYPLB için eğilme davranışı bakımından etkin lif içeriklerinin belirlenmesi amacıyla üç farklı çelik lif tipinin %1.0, %1.5 ve %2.0 oranlarında tekil ve çeşitli oranlarda karma olarak kullanıldığı 17 set numune hazırlanmıştır (Tablo 2.3). Her bir sette üçer adet 100x100x400 mm prizma numune, altı adet 100x100x100 mm küp numune ve iki adet 100x200 mm silindir numune bulunmaktadır. Prizma numuneler eğilme testleri için, küp numuneler basınç dayanımlarının belirlenmesi için ve silindir numuneler elastisite modüllerinin tayini için kullanılmıştır. Ayrıca, sonuçları karşılaştırmak amacıyla bir set de lifsiz referans numunesi hazırlanmıştır (Tablo 2.3).

2.1.3.1 Beton Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi

Çalışma kapsamında hazırlanan UYPLB karışımlarına ait beton basınç dayanımları 100x100x100 mm'lik küp numunelerin eksenel basınç testleri ile belirlenmiştir. Testler Balıkesir Üniversitesi Prof. Dr. Şerif SAYLAN Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda bulunan 3000 kN kapasiteli basınç presi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.6). Tüm eksenel basınç testlerinde yükleme hızı 1 MPa/sn olarak uygulanmıştır.

Tablo 2.3: Üretilen numunelerin kodları ve lif içerikleri

Test Numunesi		Mikro Lif		Makro Lif			
		13/0.16		30/0.55		60/0.75	
		Oran (%)	Ağırlık (kg/m ³)	Oran (%)	Ağırlık (kg/m ³)	Oran (%)	Ağırlık (kg/m ³)
Lifsiz	Referans	-	-	-	-	-	-
Tekil lifli	13(1.0)	1.0	78	-	-	-	-
	13(1.5)	1.5	117	-	-	-	-
	13(2.0)	2.0	156	-	-	-	-
	30(1.0)	-	-	1.0	78	-	-
	30(1.5)	-	-	1.5	117	-	-
	30(2.0)	-	-	2.0	156	-	-
	60(1.0)	-	-	-	-	1.0	78
	60(1.5)	-	-	-	-	1.5	117
	60(2.0)	-	-	-	-	2.0	156
Karma lifli	13(0.5)30(1.0)	0.5	39	1.0	78	-	-
	13(1.0)30(0.5)	1.0	78	0.5	39	-	-
	13(1.0)30(1.0)	1.0	78	1.0	78	-	-
	13(1.5)30(0.5)	1.5	117	0.5	39	-	-
	13(0.5)60(1.0)	0.5	39	-	-	1.0	78
	13(1.0)60(0.5)	1.0	78	-	-	0.5	39
	13(1.0)60(1.0)	1.0	78	-	-	1.0	78
	13(1.5)60(0.5)	1.5	117	-	-	0.5	39

Çalışma kapsamında, 102 adet lifli ve 6 adet lifsiz beton olmak üzere toplam 108 adet küp numune test edilmiştir. Numunelerin yarısı 7. günde, geri kalanlar 28. günde test edilmiştir. Elde edilen ortalama basınç dayanımları, 28/7 günlük basınç dayanımı oranları ve lifli/lifsiz basınç dayanım oranları Tablo 2.4'te verilmiştir.

**Şekil 2.6:** Numunelerin beton basınç dayanımlarının belirlenmesi

Tablo 2.4: Numunelerin ortalama beton basınç dayanımları ve oranlar

Test Numunesi	Basınç Dayanımı (MPa)		28 Gün/ 7 Gün	Lifli/ Lifsiz
	7 Gün	28 Gün		
Referans	75	90	1.2	1.0
13(1.0)	100	120	1.2	1.3
13(1.5)	109	134	1.2	1.5
13(2.0)	116	132	1.1	1.5
30(1.0)	98	117	1.2	1.3
30(1.5)	102	121	1.2	1.3
30(2.0)	92	114	1.2	1.3
60(1.0)	96	114	1.2	1.3
60(1.5)	103	121	1.2	1.3
60(2.0)	107	119	1.1	1.3
13(0.5)30(1.0)	101	121	1.2	1.3
13(1.0)30(0.5)	102	114	1.1	1.3
13(1.0)30(1.0)	103	128	1.2	1.4
13(1.5)30(0.5)	107	132	1.2	1.5
13(0.5)60(1.0)	102	114	1.1	1.3
13(1.0)60(0.5)	103	123	1.2	1.4
13(1.0)60(1.0)	111	129	1.2	1.4
13(1.5)60(0.5)	112	136	1.2	1.5

Çelik lif tipi ve hacimsel oranından bağımsız olarak beton basınç dayanımının lif kullanımı ile lifsiz duruma göre %30-%50 arttığı ve 28 günlük dayanımların 7 gün için elde edilenlere göre yaklaşık %20 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Mikro liflerin UYPLB'un basınç dayanımını makro liflere göre daha fazla arttırdığı belirlenmiştir. Karma lifli UYPLB numunelerde ise, mikro lif oranı arttıkça basınç dayanımının arttığı görülmüştür.

2.1.3.2 Elastisite Modüllerinin Belirlenmesi

Çalışma kapsamında hazırlanan UYPLB karışımlarının elastisite modülleri, 100x200 mm boyutlarındaki silindir numunelerin eksenel basınç testleri yardımıyla ve ASTM C 469 (2014) yönetmeliği esas alınarak belirlenmiştir. Testler Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı'nda bulunan 3000 kN kapasiteli ve yerdeğiştirme kontrollü basınç presinde gerçekleştirilmiştir. Silindir numunelerin basınç altındaki şekildeğiştirmeleri iki adet LVDT'nin bağlandığı bir çerçeve sistemi yardımıyla belirlenmiştir (Şekil 2.7). Testlerde yükleme hızı 1 MPa/sn olarak uygulanmıştır.

Çalışmada 34 adet lifli ve 2 adet lifsiz beton olmak üzere toplam 36 adet silindirik numune test edilmiştir (Şekil 2.7). Numuneler başlıklanmış ve 28 gün sonra test edilmiştir. Numunelerin eksenel basınç kapasitelerinin %40'ına kadar yükleme yapılarak elde edilen *gerilme-birim şekil değiştirme* ilişkileri kullanılarak elastisite modülleri hesaplanmıştır (ASTM, 2014). Elde edilen ortalama elastisite modülleri ile lifli/lifsiz duruma ait oranlar Tablo 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.7: Elastisite modülünün tayini için başlıklanan numuneler, basınç presi ve ölçüm düzeneği

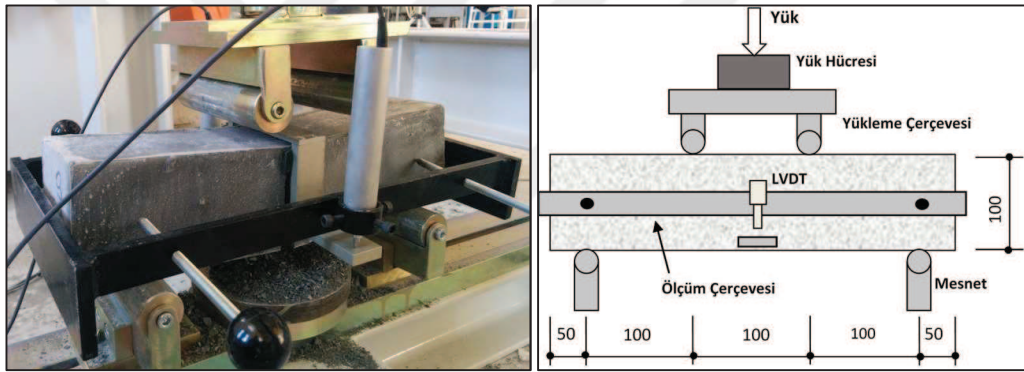
Tablo 2.5'te görüleceği üzere lif kullanımı sonucu elastisite modülü değerlerinde lifsiz duruma göre %10-%20 oranında artış gösterdiği görülmüştür. Çelik lif oranının ve tipinin UYPLB'un elastisite modülüne belirgin bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. UYPLB numunelerinde ortalama 43 GPa elastisite modülü değeri elde edilmiştir.

Tablo 2.5: Numunelerin ortalama elastisite modülleri

Test Numunesi	Ortalama Elastisite Modülü (GPa)	Lifli/Lifsiz
Referans	38	1.0
13(1.0)	42	1.1
13(1.5)	45	1.2
13(2.0)	42	1.1
30(1.0)	45	1.2
30(1.5)	42	1.1
30(2.0)	41	1.1
60(1.0)	40	1.0
60(1.5)	42	1.1
60(2.0)	44	1.2
13(0.5)30(1.0)	45	1.2
13(1.0)30(0.5)	44	1.2
13(1.0)30(1.0)	48	1.3
13(1.5)30(0.5)	41	1.1
13(0.5)60(1.0)	39	1.0
13(1.0)60(0.5)	43	1.1
13(1.0)60(1.0)	41	1.1
13(1.5)60(0.5)	43	1.1

2.1.3.3 Numunelerin Eğilme Davranışının Belirlenmesi

Çalışma kapsamında hazırlanan lifsiz ve farklı lif içeriklerine sahip UYPLB karışımlarının eğilme davranışları, ASTM C 1609 (2012) yönetmeliğinde belirtilen 100x100x4000 mm boyutlarındaki prizma numunelerin dört noktalı eğilme testleri ile belirlenmiştir. Testler, Balıkesir Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarı'ndaki 200 kN kapasiteli ve yerdeğiştirme kontrollü eğilme testi düzeneği yardımıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.8). Numunenin düşey yerdeğiştirmesi, açıklık ortasına çelik bir çerçeve yardımıyla sabitlenen iki adet LVDT'nin ortalama yerdeğiştirmesi hesaplanarak belirlenmiştir. Testlerde yükleme hızı 0.1 mm/dk olarak uygulanmıştır. Her bir numune için L temiz açıklık olmak üzere, $L/150$ (2 mm) düşey yerdeğiştirme değerinde testler sona erdirilmiştir (ASTM, 2012). Çalışmada 51 tanesi lifli, 3 tanesi lifsiz olmak üzere toplam 54 adet prizma numune test edilmiştir (Şekil 2.9).

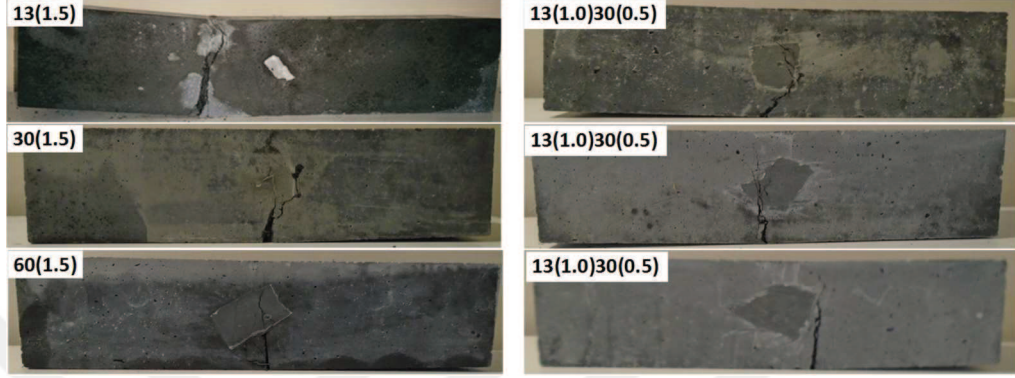


Şekil 2.8: Prizma numuneler için test düzeneği

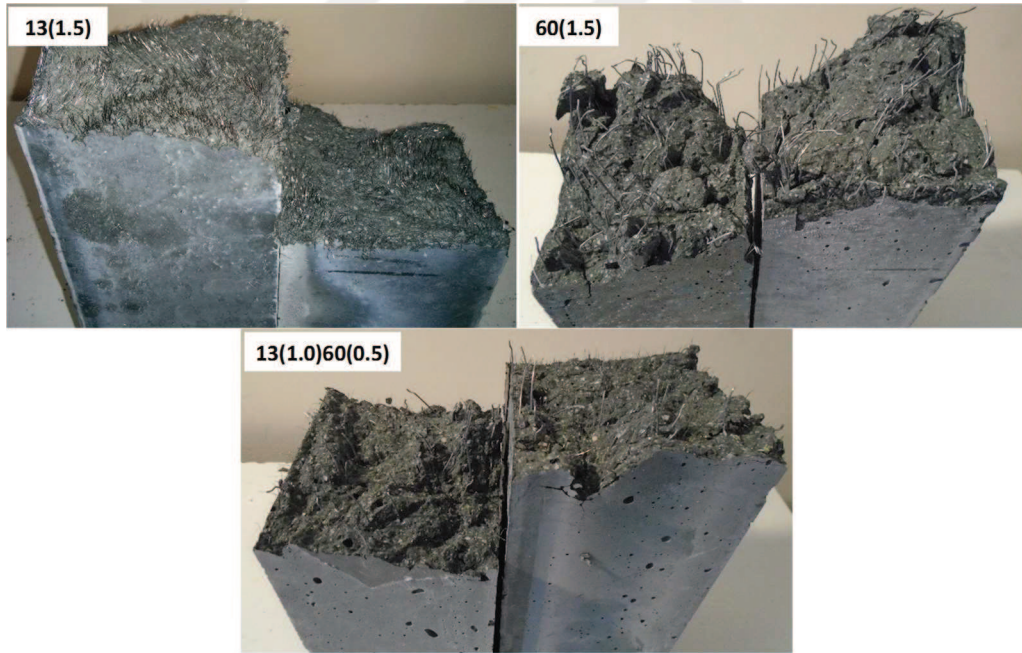


Şekil 2.9: Testleri tamamlanan prizma numuneler

Tüm numunelerin eğilme testleri süresince, ilk olarak orta bölgede büyük bir çatlak oluşumu gözlenmiş, kırılmalar bu çatlak bölgesindeki liflerin sıyrılması sonucu meydana gelmiştir. Tekil ve karma lifli bazı numunelere ait kırılma şekilleri örnek olarak Şekil 2.10’da gösterilmiştir. Test edilen tüm prizma numuneler incelendiğinde, liflerin oldukça homojen dağıldığı gözlenmiştir (Şekil 2.11).



Şekil 2.10: Prizma numunelerin kırılma şekillerine ait örnekler



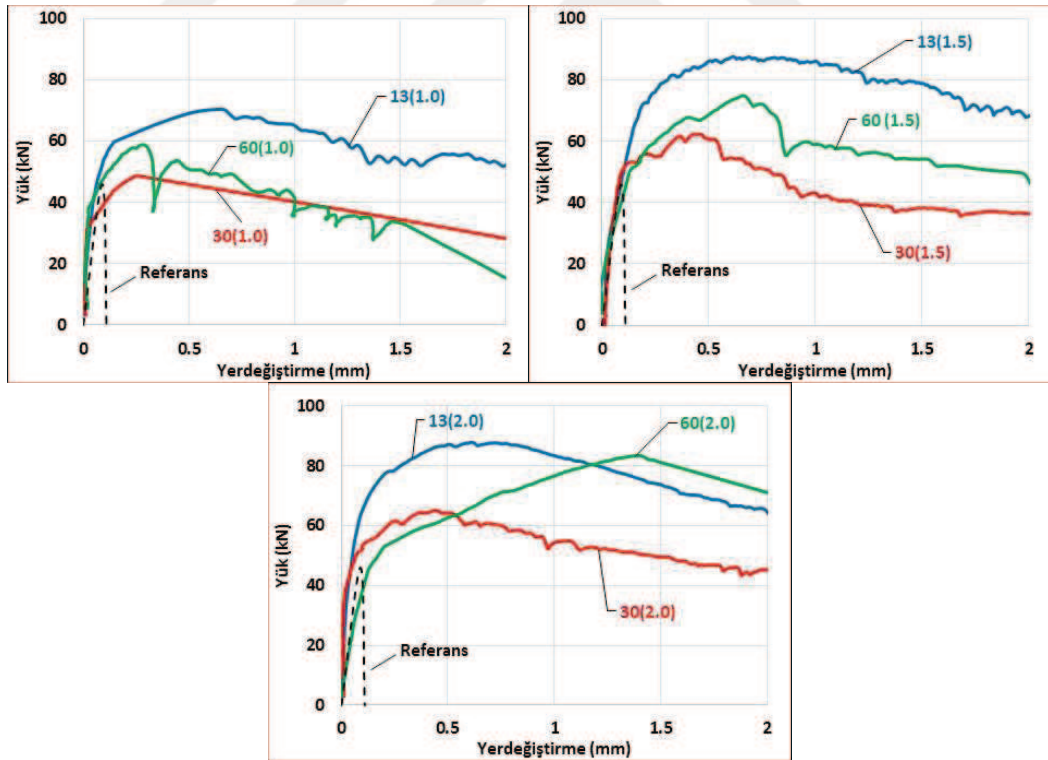
Şekil 2.11: Farklı lif tipleri için numunelerdeki çelik liflerin dağılımları

Çalışmada göz önüne alınan her bir lif içeriği için üç adet prizma numunesi test edilmiş ve açıklık ortası için *yük-düşey yerdeğiştirme* grafikleri elde edilmiştir. İncelenen prizma numunelerin lif içeriği aynı olmasına karşın, *yük-düşey yerdeğiştirme* grafiklerinin farklı davranış gösterebildiği belirlenmiştir. Bu nedenle, tokluk parametresi açısından üç numuneden en yüksek ve en düşük değerleri verenler

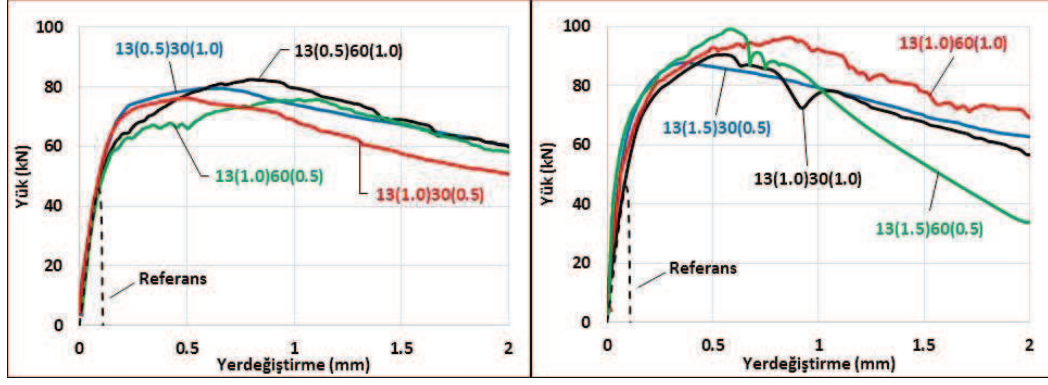
değerlendirme dışı bırakılarak ortada kalan numunenin eğilme davranışı esas alınmıştır. Şekil 2.12’de sırasıyla %1.0, %1.5 ve %2.0 hacimsel lif oranına sahip tekil lifli numunelerin *yük-düşey yerdeğiştirme* grafikleri verilmiştir. Şekil 2.13’te ise, sırasıyla toplam %1.5 ve %2.0 hacimsel lif oranına sahip karma (hibrit) lifli numunelerin yük-düşey yerdeğiştirme grafikleri verilmiştir.

UYPLB numunelerin eğilme davranışını değerlendirmek amacıyla, seçilen *yük-düşey yerdeğiştirme* grafikleri için ASTM C 1609 (2012)’da belirtilen parametreler elde edilmiştir (Şekil 2.14, Tablo 2.6). Bunlar;

- İlk çatlak yükü (P_1) ve ona karşılık gelen yerdeğiştirme (δ_1)
- İlk çatlak dayanımı (f_i)
- Maksimum yük (P_p) ve ona karşılık gelen yerdeğiştirme (δ_p)
- Maksimum eğilme dayanımı (f_p)
- Tokluk (eğilme ile yutulan enerji) değeri (T_{150}^D)



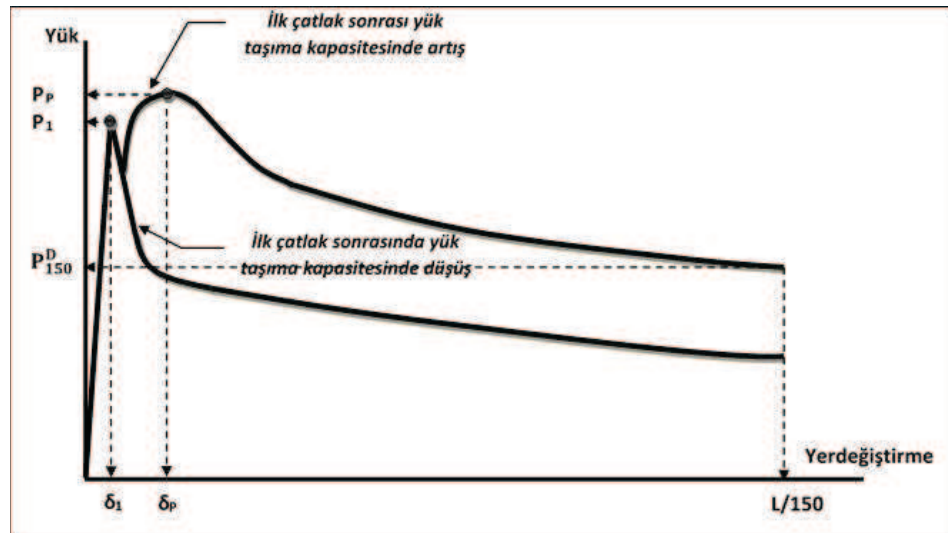
Şekil 2.12: Tekil lifli UYPLB prizma numunelerin yük-düşey yerdeğiştirme davranışları



Şekil 2.13: Karma lifli UYPLB prizma numunelerin yük-düşey yerdeğiştirme davranışları

Yük-düşey yerdeğiştirme grafiklerinde eğimin değiştiği ilk noktadaki yük *ilk çatlak yükü*, bu yüke karşılık gelen yerdeğiştirme ise *ilk çatlak yerdeğiştirmesi* olarak alınmıştır. İlk çatlak ve maksimum eğilme dayanımı değerleri (2.1) bağıntısı esas alınarak, numunelerin tokluk değerleri ise, $L/150$ yerdeğiştirme değeri esas alınarak *yük-düşey yerdeğiştirme* grafiklerinin altında kalan alanların hesaplanması ile elde edilmiştir (ASTM, 2012). Burada, f eğilme dayanımını, P yükü, L numunenin temiz açıklığını, b ve d enkesit genişliğini ve yüksekliğini göstermektedir.

$$f = \frac{PL}{bd^2} \quad (2.1)$$



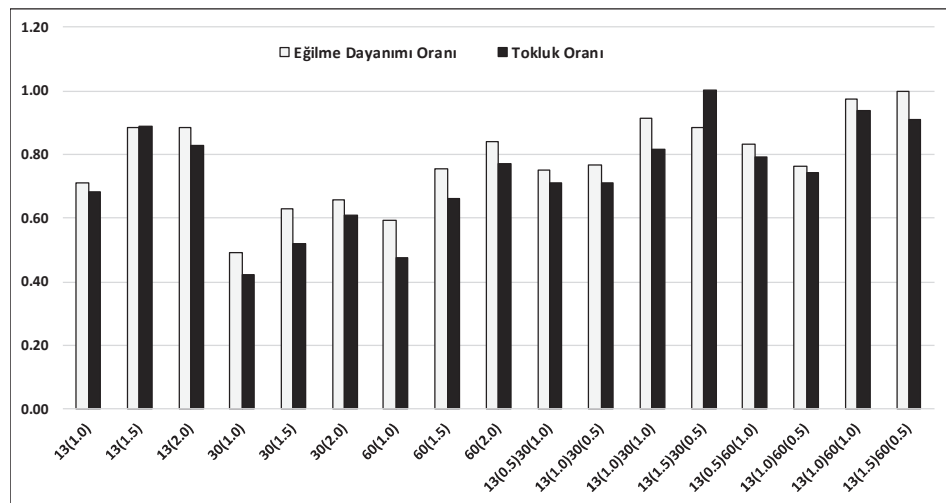
Şekil 2.14: UYPLB için karakteristik yük-yerdeğiştirme davranışı (ASTM, 2012)

Tablo 2.6: Farklı lif içeriklerine sahip UYPLB'lu numunelerin eğilme testi sonuçları

Test Numunesi	P_1 (kN)	δ_1 (mm)	f_1 (MPa)	P_P (kN)	δ_P (mm)	f_P (MPa)	(T_{150}^D) (kNmm)
Referans	45.98	0.062	13.29	45.98	0.062	13.29	-
13(1.0)	45.52	0.03	13.66	71.50	0.69	21.45	122.38
13(1.5)	73.16	0.11	21.95	89.25	0.64	26.77	159.34
13(2.0)	60.02	0.08	18.01	74.74	0.51	22.42	148.32
30(1.0)	40.09	0.01	12.03	49.13	0.28	14.74	75.92
30(1.5)	50.33	0.04	15.10	64.07	0.46	19.22	93.38
30(2.0)	49.59	0.11	14.88	66.34	0.54	19.90	108.84
60(1.0)	47.98	0.10	14.39	59.82	0.32	17.95	85.35
60(1.5)	55.97	0.07	16.79	76.44	0.70	22.93	118.43
60(2.0)	50.79	0.10	15.24	84.30	1.50	25.29	138.04
13(0.5)30(1.0)	62.89	0.13	18.87	71.04	0.50	21.31	126.99
13(1.0)30(0.5)	49.73	0.04	14.92	76.56	0.51	22.97	127.34
13(1.0)30(1.0)	71.07	0.11	21.32	91.29	0.56	27.39	146.18
13(1.5)30(0.5)	59.71	0.06	17.91	88.62	0.38	26.59	179.35
13(0.5)60(1.0)	43.03	0.04	12.91	83.64	0.82	25.09	141.88
13(1.0)60(0.5)	53.15	0.04	15.95	76.59	1.01	22.98	133.26
13(1.0)60(1.0)	67.19	0.09	20.16	97.86	0.93	29.36	167.90
13(1.5)60(0.5)	48.61	0.04	14.58	99.64	0.61	29.89	162.95

2.1.4 Eğilme Davranışı için Etkin Lif İçeriklerinin Belirlenmesi

UYPLB karışımları için etkin lif içeriklerinin araştırılması ve eğilme dayanımı ile tokluk parametreleri bakımından performans değerlendirmelerinin yapılabilmesi için, testler sonucunda elde edilen ilgili değerler maksimum değerlerine göre normalize edilmiştir (Şekil 2.15). Burada 1.0 değeri en iyi performansı, 0-1.0 arasındaki değerler ise daha düşük performansları ifade etmektedir.

**Şekil 2.15:** Numunelerin eğilme dayanımlarının ve tokluklarının karşılaştırılması

Farklı çelik lif içeriklerine sahip UYPLB'lu prizma numunelerine ait eğilme dayanımı ve tokluk değerleri incelendiğinde (Şekil 2.15);

- Mikro ve makro çelik lifler karşılaştırıldığında en iyi performansı mikro lifler göstermiştir. Hacimsel olarak %2.0'lik oran için mikro lif hem eğilme dayanımı hem de tokluk açısından en iyi sonuçları vermesine rağmen %1.5 lif oranı için mikro liflerin eğilme performansına etkisinin çok kısıtlı kaldığı belirlenmiştir.
- Makro çelik lifler kendi aralarında karşılaştırıldığında, göz önüne alınan tüm hacimsel lif oranları için 60 mm'lik makro lifin 30 mm'lik life göre daha iyi bir eğilme davranışı sağladığı görülmüştür.
- Karma çelik lifli numunelerde 60 mm'lik makro lifli numuneler, 30 mm'lik makro lifli numunelere göre daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir.
- Karma lifli numunelerde, hacimsel lif oranı olarak %2.0 kullanımı %1.5 oranına göre daha iyi eğilme performansı göstermiştir. Buna karşın lif oranındaki % 30'luk artışa rağmen eğilme ve tokluk performanslarındaki artış çok düşük düzeyde kalmıştır. Ayrıca, lif miktarının artması sonucu işlenebilirliğin özellikle karma çelik lifli numunelerde azaldığı gözlemlenmiştir.

Prizma numuneler için elde edilen eğilme performansları değerlendirildiğinde;

- UYPLB karışımında hacimsel olarak %2 oranında kullanılan çelik liflerin % 1.5 oranına göre sağladığı performans artışının düşük düzeyde kalması ve yoğun lif kullanımının betonarme elemanlarda işlenebilirlik sorunlarına yol açabileceği de göz önünde bulundurularak, çalışma kapsamında incelenecek UYPLB'lu betonarme kirişler için hacimce %1.5 oranında çelik lif kullanımının daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.
- Karma lifli numunelerde en iyi eğilme performansları 13 ve 60 mm'lik liflerin birlikte kullanımı sonucu elde edilmiş ve betonarme kirişlerde bu liflerin kullanılmasına karar verilmiştir. %1.5 hacimsel lif oranı için mikro ve makro liflerin hangi oranda kullanılacağı ile ilgili olarak, 13 mm'lik mikro liflerin eğilme davranışı, tokluk ve işlenebilirlik gibi parametreler bakımından daha iyi

performanslar göstereceği düşünülerek karışımda %1.0 oranında 13 mm'lik mikro ve %0.5 oranında 60 mm'lik makro lifler kullanılmıştır.

Bu sonuçlara göre betonarme kirişlerde kullanılacak UYPLB için aşağıda belirtilen tekil ve karma lif alternatifleri seçilmiştir.

- Hacimsel olarak %1.5 oranında 13/0.16 mm mikro lif (tekil)
- Hacimsel olarak toplam % 1.5 oranında %1.0 13/0.16 mm mikro ve %0.5 oranında 60/0.75 mm makro lif (karma)

2.2 UYPLB ile Üretilen Betonarme Kirişlerin Eğilme Davranışının İncelenmesi

Çalışmanın bu bölümünde, birinci aşamada tekil ve karma lifli UYPLB'lar için belirlenen etkin çelik lif içerikleri ile üretilen betonarme kirişlerin eğilme davranışları incelenmiştir. Bu inceleme, lif içeriği, çekme donatısı oranı ve basınç donatısı oranı bakımından farklılıklar içeren toplam 26 adet kiriş üzerinde gerçekleştirilmiştir. 150x250x2500 mm boyutlarındaki kirişlerin dört noktalı eğilme testleri yapılmış ve elde edilen, yük/moment taşıma kapasiteleri, yerdeğiştirme ve eğrilik süneklikleri, çatlama kesit eğilme rijitlikleri ve çatlak özellikleri karşılaştırılarak eğilme davranışları değerlendirilmiştir.

2.2.1 Test Kirişlerinin Özellikleri

Çalışmada, 6 ayrı grup olarak toplam 26 adet test kirişi üretilmiştir (Tablo 2.7). 1. ve 2. grup, çelik lifin eğilme davranışına etkilerinin belirlenmesi için karşılaştırmalarda kullanılmak üzere üretilen lifsiz betonarme kirişlerden oluşmaktadır. 3. ve 4. grup kirişler tekil çelik lifli, 5. ve 6. grup kirişler ise karma çelik lifli UYPLB ile üretilmiştir. 1., 3. ve 5. gruptaki kirişlerde sadece çekme donatısı bulunmakta, 2., 4. ve 6. gruptaki kirişlerde bunlara ilave olarak basınç donatısı bulunmaktadır (Tablo 2.7).

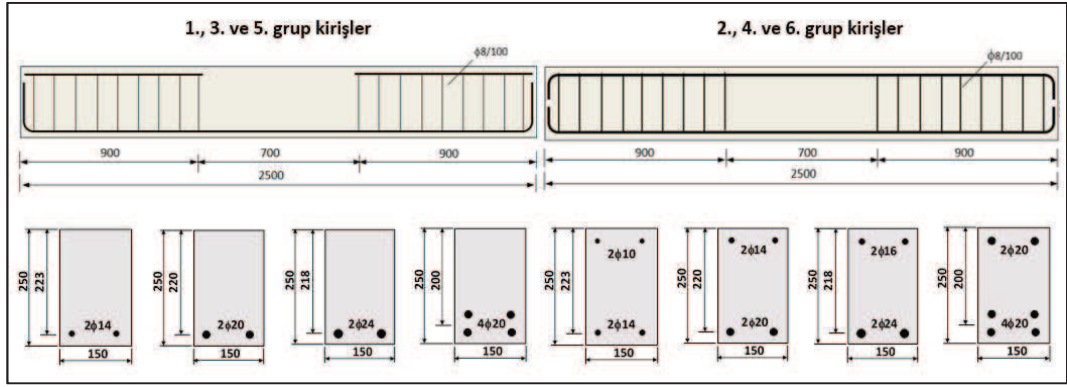
Çalışmada kirişler çekme kırılması oluşacak şekilde donatılandırılmıştır. Bu amaçla, çekme donatısı oranları (ρ) dengeli donatı oranının (ρ_d) altında tutulmuştur (Tablo 2.7). Kirişlerde dört farklı çekme donatısı oranı göz önüne alınmıştır. Bunların

ikisi TS 500 (2000)'deki maksimum çekme donatısı oranı sınırının ($\rho = 0.02$) altında (A ve B kirişleri), diğer ikisi UYPLB'un yüksek basınç dayanımını kullanmak amacıyla sınırın üstünde (C ve D kirişleri) olacak şekilde seçilmiştir. Basınç donatılı kirişlerde çekme donatısının yaklaşık yarısı oranında basınç donatısı kullanılmıştır (Tablo 2.7). Kirişlerde kesme kırılmasını önlemek amacıyla salt eğilme bölgesi dışında $\phi 8/100$ etriye kullanılmıştır. Kirişlerin geometrik özellikleri ve donatı yerleşimleri Şekil 2.16'da şematik olarak gösterilmiştir.

Ayrıca, çelik lifin eğilme davranışına direkt katkısını inceleyebilmek için tekil ve karma lif içeren donatısız (referans) kirişler de üretilmiştir. 3. ve 4. grup kirişler, hacimsel olarak %1.5 oranında 13/0.16 mm'lik mikro çelik lif, 5. ve 6. grup kirişler ise %1.0 oranında 13/0.16 mm'lik mikro ve %0.5 60/0.75 mm'lik makro çelik lifleri karma olarak içermektedir (Tablo 2.7).

Tablo 2.7: Test kirişlerinin donatı ve lif içerikleri

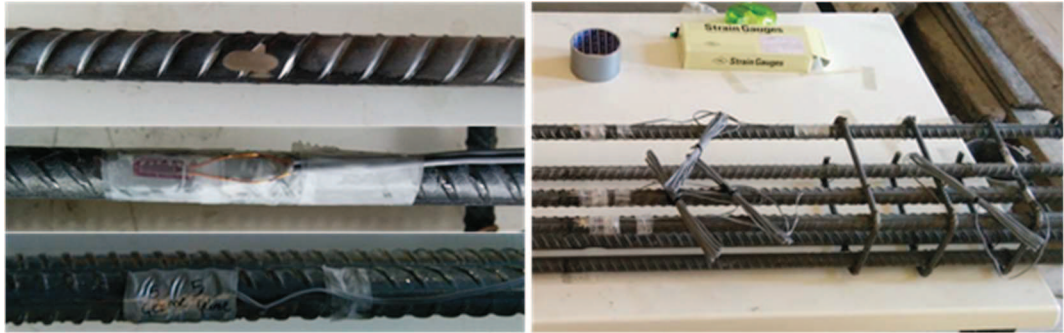
Grup No	Kiriş Kodu	Çekme Donatısı	Çekme Donatısı Oranı (ρ)	Basınç Donatısı	Basınç Donatısı Oranı (ρ')	Çelik Lif
1	1-A	2 ϕ 14	0.009	--	--	Yok
	1-B	2 ϕ 20	0.019	--	--	
	1-C	2 ϕ 24	0.028	--	--	
	1-D	4 ϕ 20	0.043	--	--	
2	2-A	2 ϕ 14	0.009	2 ϕ 10	0.005	Yok
	2-B	2 ϕ 20	0.019	2 ϕ 14	0.009	
	2-C	2 ϕ 24	0.028	2 ϕ 16	0.012	
	2-D	4 ϕ 20	0.043	2 ϕ 20	0.019	
3	Referans	--	--	--	--	Tekil %1.5(13/0.16)
	3-A	2 ϕ 14	0.009	--	--	
	3-B	2 ϕ 20	0.019	--	--	
	3-C	2 ϕ 24	0.028	--	--	
4	4-A	2 ϕ 14	0.009	2 ϕ 10	0.005	Tekil %1.5(13/0.16)
	4-B	2 ϕ 20	0.019	2 ϕ 14	0.009	
	4-C	2 ϕ 24	0.028	2 ϕ 16	0.012	
	4-D	4 ϕ 20	0.043	2 ϕ 20	0.019	
5	Referans	--	--	--	--	Karma %1.0(13/0.16) %0.5(60/0.75)
	5-A	2 ϕ 14	0.009	--	--	
	5-B	2 ϕ 20	0.019	--	--	
	5-C	2 ϕ 24	0.028	--	--	
6	6-A	2 ϕ 14	0.009	2 ϕ 10	0.005	Karma %1.0(13/0.16) %0.5(60/0.75)
	6-B	2 ϕ 20	0.019	2 ϕ 14	0.009	
	6-C	2 ϕ 24	0.028	2 ϕ 16	0.012	
	6-D	4 ϕ 20	0.043	2 ϕ 20	0.019	



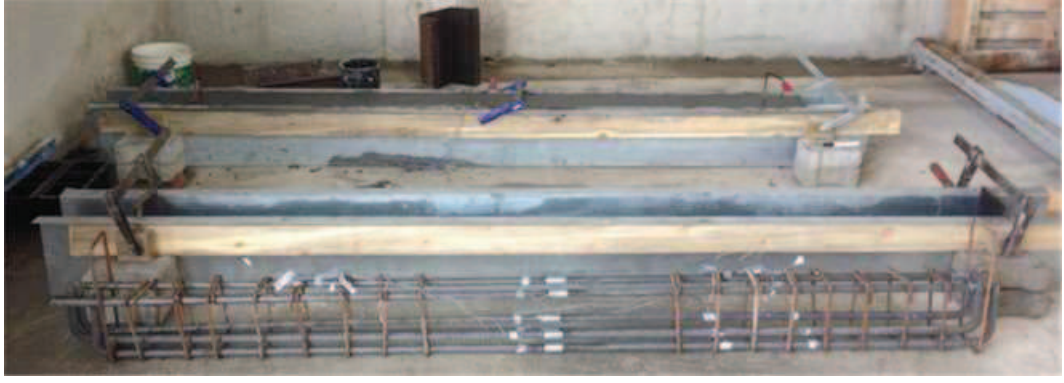
Şekil 2.16: Kirişlerin geometrik özellikleri ve donatı yerleşimleri

2.2.2 Test Kirişlerinin Hazırlanması

Test kirişlerine ait boyuna ve enine donatıların hazırlanmasının ardından her bir çekme donatısına ve varsa basınç donatısına şekildeğiştirme ölçerler (strain gauge) yerleştirilmiştir. Özel yalıtımlı bantlar yardımıyla ölçerlerin beton dökümü ve sonrasında hasar görmesi engellenmiştir (Şekil 2.17). Ölçerler yerleştirildikten sonra donatılar çelik kalıplara yerleştirilerek beton dökümüne hazır hale getirilmiştir (Şekil 2.18).



Şekil 2.17: Donatılara yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerler



Şekil 2.18: Kiriş kalıbı ve donatısı

Çalışmada kullanılan UYPLB, Bölüm 2.1’de belirtilen karışım oranlarına ve hazırlanma prosedürüne uygun olarak 125 dm³ kapasiteli standart bir panmikserde üretilmiştir. Beton, çelik liflerin yönelmesine imkan verecek şekilde özel tasarlanmış bir beton arabası aracılığı ile çelik kalıplara yerleştirilmiştir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19: UYPLB’un hazırlanması ve kiriş kalıplarına yerleştirilmesi

Hazırlanan UYPLB karışımlarına ait beton basınç dayanımlarını belirlemek amacıyla, her bir kiriş için 9 adet 100x100x100 mm’lik küp numune alınmıştır. Dökümü tamamlanan kirişler kalıptan alınincaya kadar su kaybını önlemek amacıyla plastik bir örtü ile sarılarak korunmuştur. (Şekil 2.20 ve 2.21). Kirişler kalıptan

alındıktan sonra test gününe kadar yaklaşık 20°C sıcaklığındaki laboratuvar ortamında bekletilmiştir.



Şekil 2.20: Dökümü tamamlanmış test kirişi



Şekil 2.21: Plastik örtü ile sarılmış test kirişleri

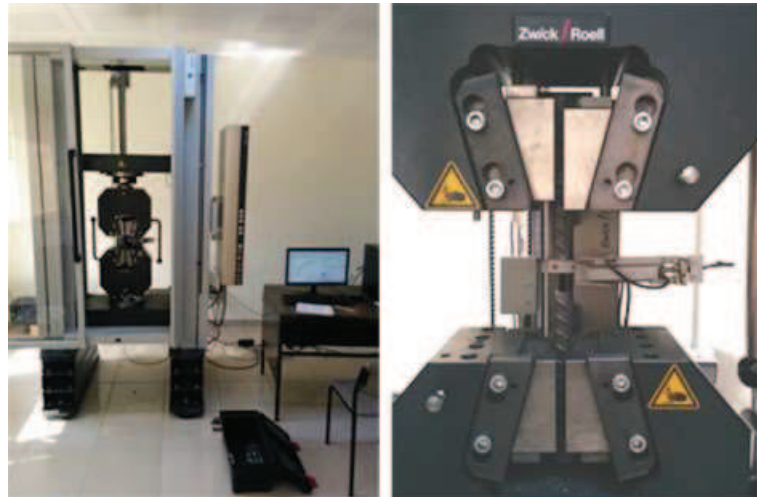
2.2.3 Test Kirişlerinin Beton ve Donatılarının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

UYPLB'lu betonarme kirişlerde kullanılan betonun basınç dayanımları eksenel basınç testleri yardımıyla belirlenmiştir. Çalışmada, her bir kiriş için 9 adet küp numunenin 7, 28 ve 56 gündeki ortalama basınç dayanımları Tablo 2.8'de verilmiştir.

UYPLB'lu test kirişlerinde kullanılan boyuna donatıların mekanik özellikleri 300 mm uzunluğundaki örneklerin çekme deneyleri yapılarak belirlenmiştir. Çekme testleri, Balıkesir Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda bulunan 250 kN kapasiteli çekme cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.22). Testlerde yükleme hızı 6 mm/dk olarak uygulanmıştır. Donatılara ait akma ve çekme dayanımları ile kopma uzaması değerleri Tablo 2.9'da verilmiştir.

Tablo 2.8: Test kirişlerinin 7, 28 ve 56 günlük ortalama basınç dayanımları

Grup No	Kiriş Kodu	Basınç Dayanımı (MPa)		
		7 Gün	28 Gün	56 Gün
1 (Lifsiz, çekme donatılı)	1-A	98	127	137
	1-B	94	122	133
	1-C	96	125	135
	1-D	103	134	146
2 (Lifsiz, basınç donatılı)	2-A	106	138	142
	2-B	107	138	145
	2-C	101	131	139
	2-D	109	142	152
3 (Tekil lifli, çekme donatılı)	3-A	113	146	157
	3-B	121	161	167
	3-C	112	145	157
	3-D	118	154	166
4 (Tekil lifli, basınç donatılı)	4-A	112	143	148
	4-B	113	153	164
	4-C	112	153	160
	4-D	122	156	161
5 (Karma lifli, çekme donatılı)	5-A	121	158	169
	5-B	104	148	150
	5-C	120	158	164
	5-D	116	157	167
6 (Karma lifli, basınç donatılı)	6-A	114	154	163
	6-B	111	154	166
	6-C	120	158	164
	6-D	121	153	162



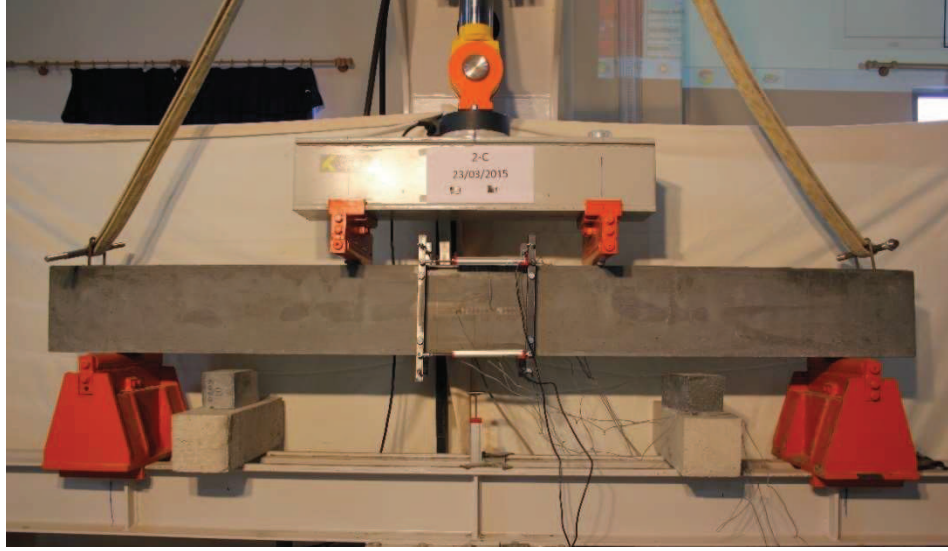
Şekil 2.22: Donatıların çekme testi ile mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Tablo 2.9: Kiriş boyuna donatılarının mekanik özellikleri

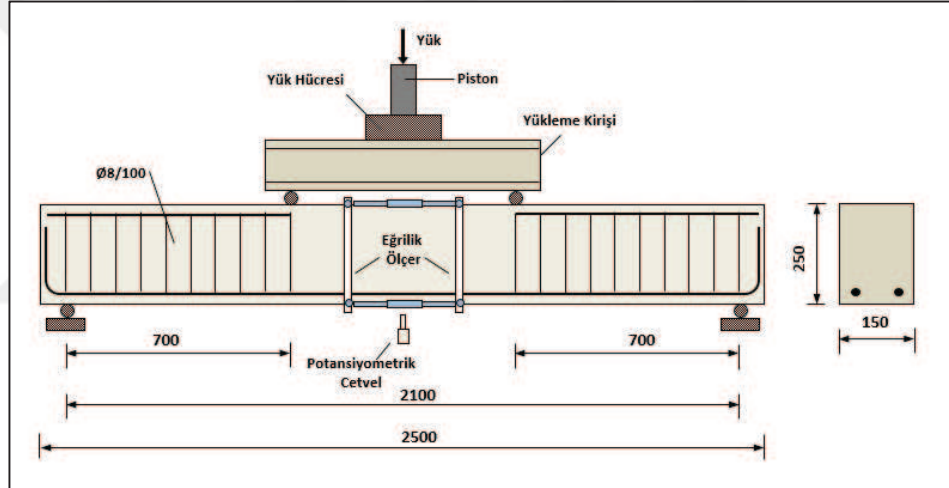
Grup No	Kiriş Kodu	Akma Dayanımı (MPa)		Çekme Dayanımı (MPa)		Kopma Uzunluğu (%)
		Çekme Donatısı	Basınç Donatısı	Çekme Donatısı	Basınç Donatısı	Çekme Donatısı
1 (Lifsiz, çekme donatılı)	1-A	469	--	590	--	17
	1-B	462	--	654	--	15
	1-C	491	--	606	--	15
	1-D	468	--	661	--	16
2 (Lifsiz, basınç donatılı)	2-A	458	473	588	554	17
	2-B	462	449	654	571	16
	2-C	492	489	606	596	16
	2-D	468	460	657	659	15
3 (Tekil lifli, çekme donatılı)	3-A	453	--	567	--	17
	3-B	463	--	613	--	16
	3-C	456	--	593	--	15
	3-D	465	--	653	--	15
4 (Tekil lifli, basınç donatılı)	4-A	453	464	567	554	17
	4-B	467	449	653	571	16
	4-C	451	473	591	584	15
	4-D	462	462	650	651	14
5 (Karma lifli, çekme donatılı)	5-A	445	--	564	--	17
	5-B	471	--	651	--	16
	5-C	460	--	586	--	15
	5-D	471	--	651	--	16
6 (Karma lifli, basınç donatılı)	6-A	445	464	564	554	17
	6-B	469	447	654	562	16
	6-C	460	473	586	584	15
	6-D	455	455	565	565	16

2.2.4 Test Düzeneği ve Ölçerlerin Yerleştirilmesi

Kirişlerin eğilme testleri, Balıkesir Üniversitesi Yapı Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan dört noktalı eğilme test düzeneği ile yapılmıştır (Şekil 2.23). Düzenekte 500 kN kapasiteli ve yerdeğiştirme kontrollü bir hidrolik yük veren bulunmaktadır. Kirişin düşey yerdeğiştirmesini 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 700 mm olan iki tekil yüke dönüştürülerek kirişe uygulanmaktadır (Şekil 2.24).

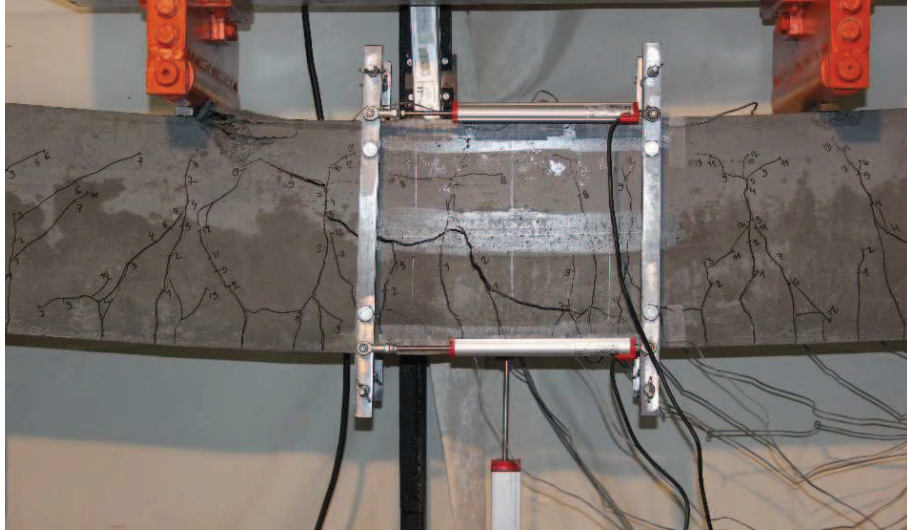


Şekil 2.23: Dört noktalı eğilme test düzeneği



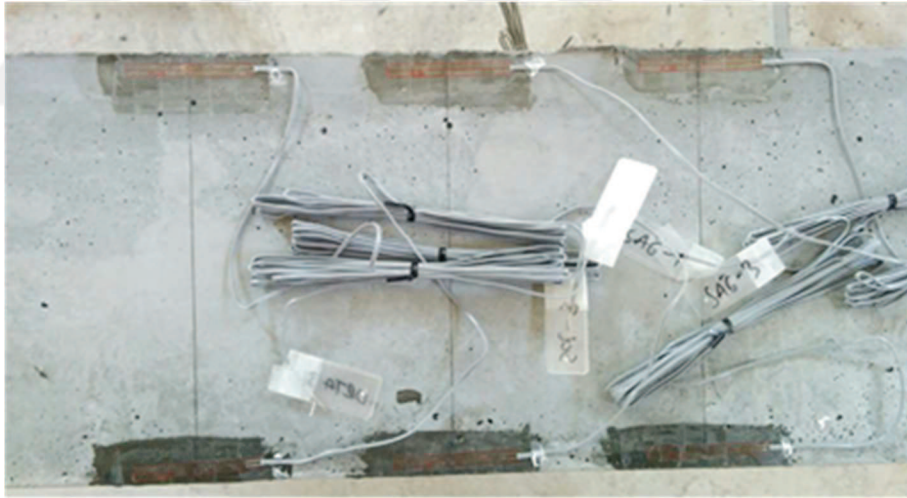
Şekil 2.24: Test kiriş ve şematik ölçüm düzeneği

Kiriş orta bölgesindeki eğrilği (birim dönmeyi) belirlemek amacıyla basınç ve çekme bölgesine iki adet potansiyometrik cetvel yerleştirilmiştir (Şekil 2.25). Bu potansiyometrik cetveller en üst ve en alt beton lifindeki yerdeğiştirmeleri ölçecek ve aralarında 300 mm'lik boşluk kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu düzenek ile elde edilen kısalma ve uzamalardan yararlanarak salt eğilme bölgesindeki 300 mm'lik bir bölgenin ortalama eğrilği belirlenmiştir.



Şekil 2.25: Eğrilik ölçüm düzeneği

Donatılardaki birim şekildeğiştirmelerin yanı sıra, betonun alt ve üst liflerindeki birim şekildeğiştirmeleri ölçmek amacıyla her bir kiriş yüzeyine toplam 6 adet şekildeğiştirme ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 2.26).



Şekil 2.26: Betona yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerler

Test süresince belirli düşey yerdeğiştirme değerleri için kiriş üzerinde oluşan çatlaklar işaretlenmiş ve çatlak mikroskobu yardımıyla çatlak genişlikleri ölçülmüştür. Testler süresince kirişlerdeki yük, şekildeğiştirme ve yerdeğiştirmeler 24 kanallı veri toplama cihazı ile kaydedilmiştir (Şekil 2.27).



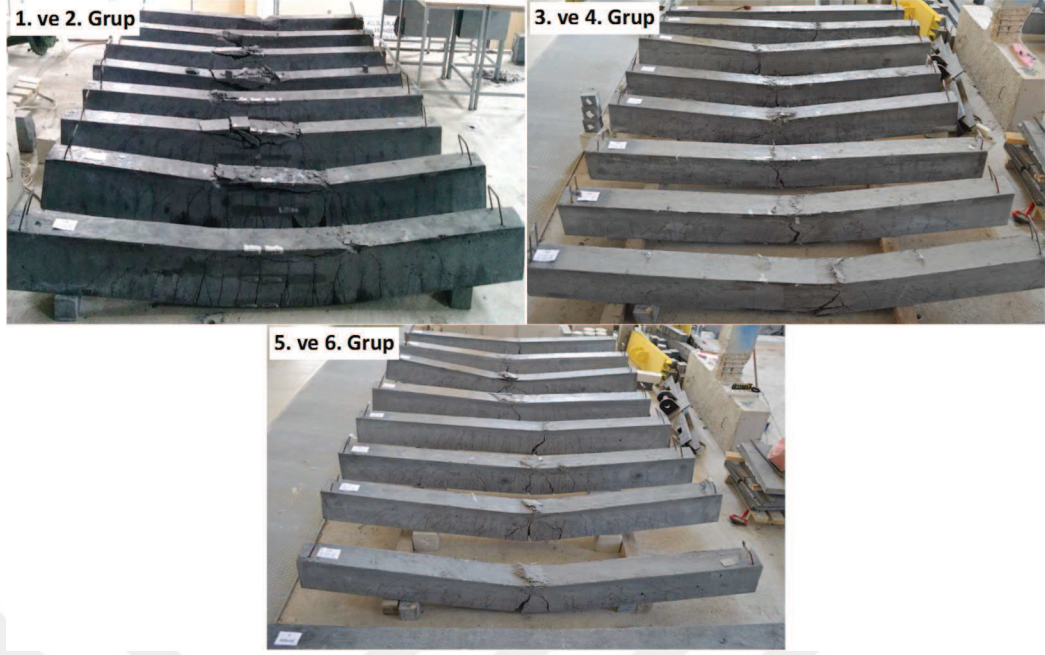
Şekil 2.27: Veri toplama sistemi

2.2.5 Betonarme Kirişlerin Eğilme Testleri ve Sonuçların Karşılaştırılması

Lifsiz kirişler ile tekil ve karma çelik lifli UYPLB'lu betonarme kirişlerin eğilme testlerinden elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmış ve lif içeriğinin betonarme kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Eğilme testleri tamamlanmış kirişler Şekil 2.28'de toplu olarak gösterilmiştir. Çalışmada, eğilme davranışı ile ilgili olarak aşağıda belirtilen parametreler esas alınmıştır. Bunlar;

- a) Yük-düşey yerdeğiştirme davranışları
- b) Yerdeğiştirme süneklikleri (Δ_u/Δ_y)
- c) Yük taşıma kapasiteleri (P_{maks}) ve artık yük oranları (P_u/P_{maks})
- d) Eğrilik süneklikleri (ϕ_u/ϕ_y) ve çatlama kesit eğilme rijitlikleri (EI_ϕ)
- e) Belirli düşey yerdeğiştirme değerlerindeki ($L/250$ ve $L/70$) çatlak genişlikleri ve dağılımları

Çalışmada ayrıca, donatılardaki ve beton yüzeyindeki şekildeğiştirme ölçerlerden elde edilen sonuçlardan yararlanarak çelik lifli betonun şekildeğiştirme kapasitesi ve lifli beton içindeki donatının davranışı da değerlendirilmiştir. Her bir kiriş için beton basınç bölgesindeki ve donatılardaki *şekildeğiştirme-düşey yerdeğiştirme* davranışları EK-A'da verilmiştir.



Şekil 2.28: Eğilme testleri tamamlanan kirişlerin toplu gösterimi

2.2.5.1 Yük-Düşey Yerdeğiştirme Davranışlarının Karşılaştırılması

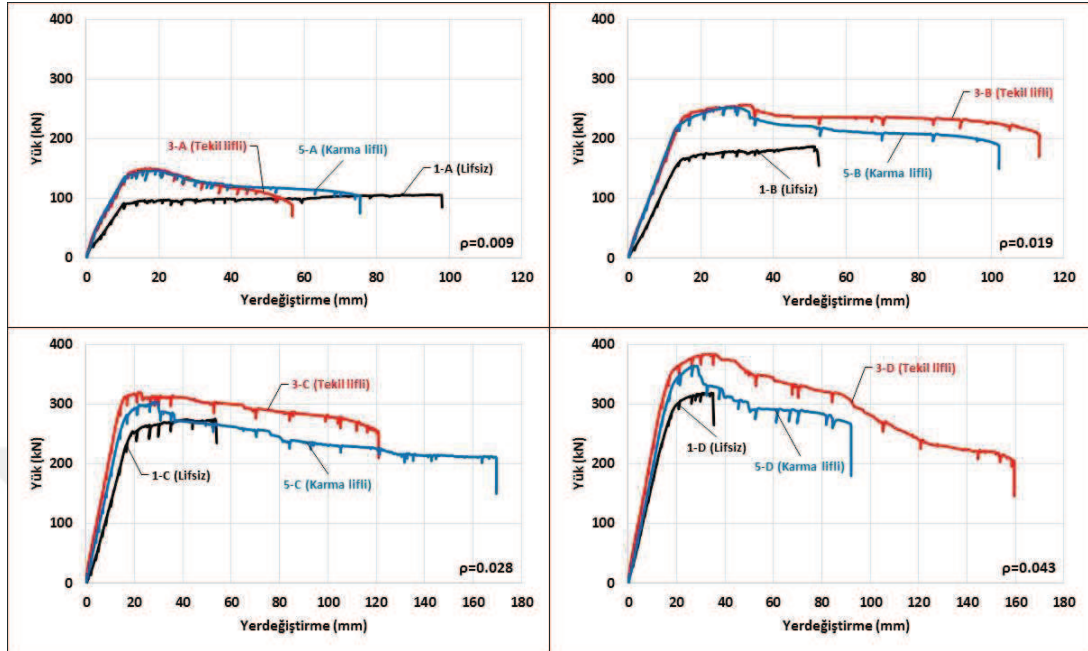
UYPLB'lu betonarme kirişlerde çelik lif içeriğinin kiriş eğilme davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla lifsiz, tekil ve karma lifli kirişlerden elde edilen *yük-düşey yerdeğiştirme* davranışları salt çekme donatılı ve basınç donatılı kirişler için Şekil 2.29 ve 2.30'da verilmiştir.

Kirişlerde sadece lif kullanımının etkinliğini belirleyebilmek ve ayrıca, geleneksel donatı kullanımı ile karşılaştırmak amacıyla tekil ve karma lif içeren donatısız kirişlerin *yük-düşey yerdeğiştirme* davranışları, en düşük donatı oranına sahip ($\rho = 0.009$) lifsiz ve tekil lifli betonarme kiriş davranışıyla Şekil 2.31'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

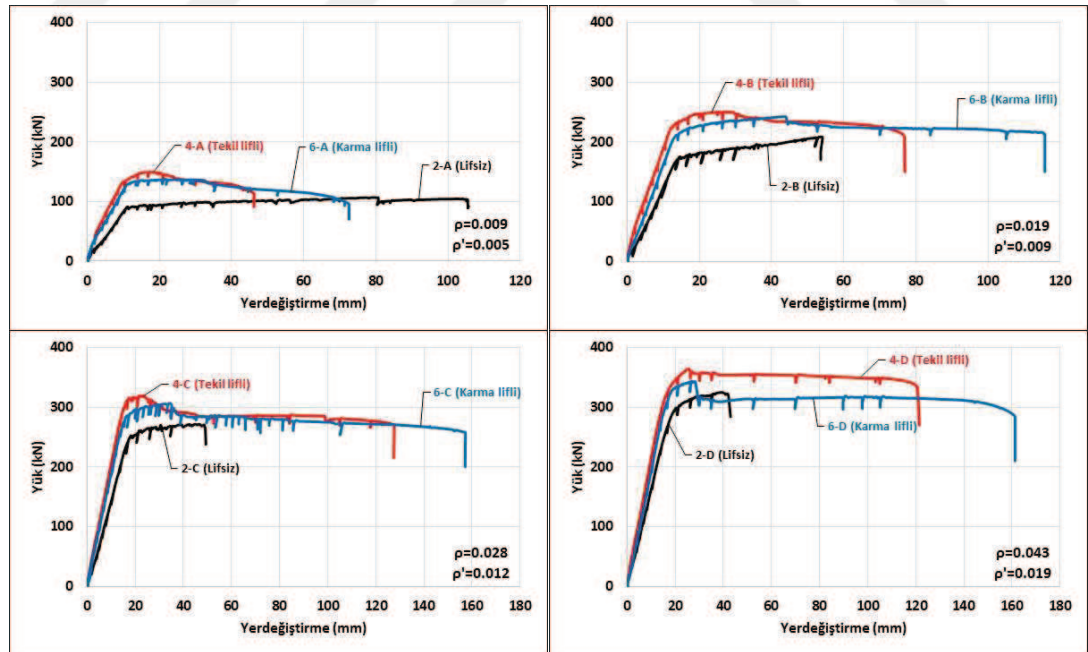
Farklı donatı oranlarına sahip lifsiz ve lifli betonarme kirişlerin eğilme testleri sonucunda;

- Lifsiz kirişlerde donatıda akma sonrası rijitlik azalmakta ve hafif düzeyde pekleşme etkisi ile maksimum yüke ulaşılmaktadır. Maksimum yük sonrası tüm lifsiz kirişlerde kırılma (göçme) durumu beton ezilmesi ile meydana gelmektedir (Şekil 2.32-2.39). Kırılma sırasında beton basınç bölgesinde elde

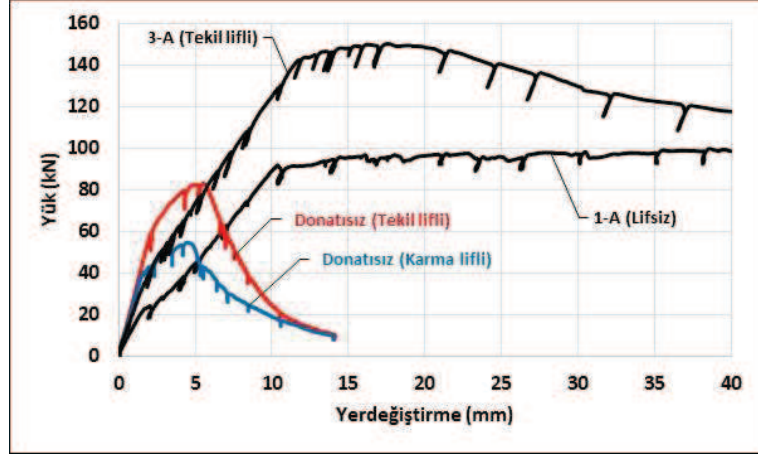
edilen maksimum birim kısalma değerleri 0.0041-0.0052 arasında elde edilmiştir (EK-A).



Şekil 2.29: Salt çekme donatılı kirişlere ait (1., 3. ve 5. grup) yük-düşey yerdeğiştirme davranışları



Şekil 2.30: Basınç donatılı kirişlere ait (2., 4. ve 6. grup) yük-düşey yerdeğiştirme davranışları

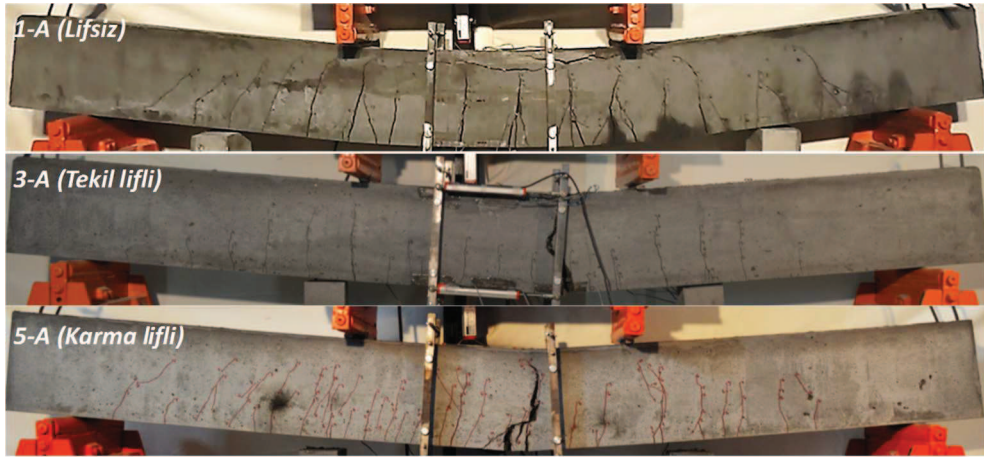


Şekil 2.31: Salt çelik lifli kirişler ile donatılı (lifli ve lifsiz) kirişlerin davranışlarının karşılaştırılması

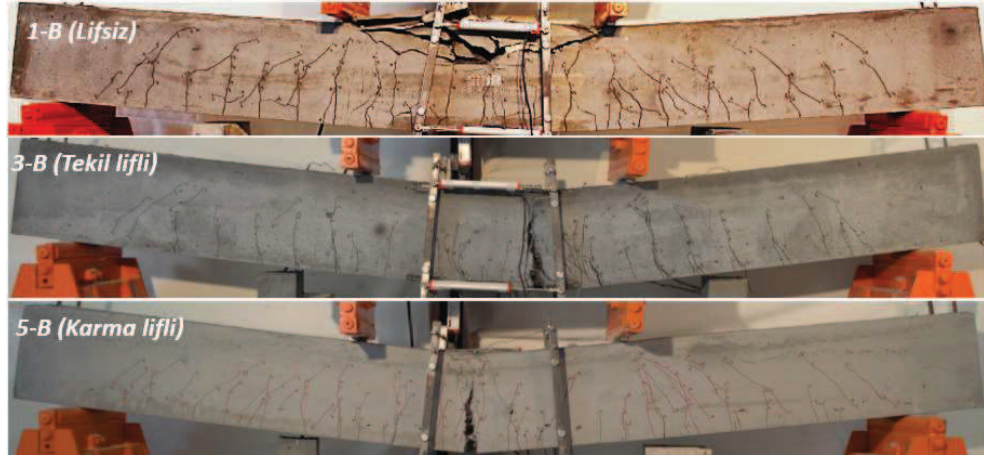
- Çelik lif içeren UYPLB'lu kirişlerde, çekme bölgesindeki liflerin ilave donatı etkisi yaparak başlangıç yerdeğiştirme rijitliğini ve yük taşıma kapasitesini lifsiz kirişlere göre belirgin şekilde arttırdığı görülmüştür. Genel olarak tekil lif kullanımının, karma life kıyasla bu parametreler bakımından daha etkili olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, çekme bölgesindeki lifler küçük çatlakları sınırlamakta ve uzama şekildeğiştirmelerinin en büyük olduğu bölgede çatlakların birleşerek bir veya birkaç adet büyük çatlak haline gelmesine sebep olmaktadır. Bu da yüksek donatı oranlarına sahip UYPLB'lu kirişlerde dahi kırılma şeklinin donatı kopması ile gerçekleşmesine sebep olmuştur (Şekil 2.32-2.39).
- UYPLB'lu kirişlerin tümünde çekme donatılarının akmasından sonraki aşamada bir pekleşme davranışı gözlenmektedir (Şekil 2.29-2.30). Bu davranış UYPLB'lu prizma numunelerinin ilk çatlak sonrası eğilme davranışı ile benzer karakteristiktir. Bununla birlikte, kirişlerdeki donatı oranı arttıkça pekleşme bölgesi uzunluğunun azaldığı görülmüştür. Pekleşme davranışı basınç bölgesindeki betonun ezilmesi ile sonlanmakta ve bu noktadan sonra, dayanım azalmalarının gözlemlendiği yumuşama davranışı başlamaktadır (Şekil 2.29-2.30).
- UYPLB'lu kirişlerde basınç bölgesindeki lifler beton ezilmelerine rağmen çok büyük dayanım azalmaları oluşmadan elemanın büyük yerdeğiştirme yapmasına olanak sağlamaktadır. Burada, çelik liflerin basınç bölgesinde sargı etkisi oluşturarak basınç donatısının etkin çalışmasını sağlamış ve beton ezilmeleri nedeniyle oluşan dayanım azalmalarını azaltıcı etki yapmıştır. İlk önemli dayanım kaybının olduğu yerdeğiştirme seviyesinde, kirişler için en

dış beton basınç lifinde şekildeğiştirme değerleri 0.0018-0.0044 arasında ölçülmüştür (EK-A). Kırılma durumunda ise, en dış beton basınç lifinde 0.016-0.14 arasında değişen şekildeğiştirme değerleri elde edilmiştir.

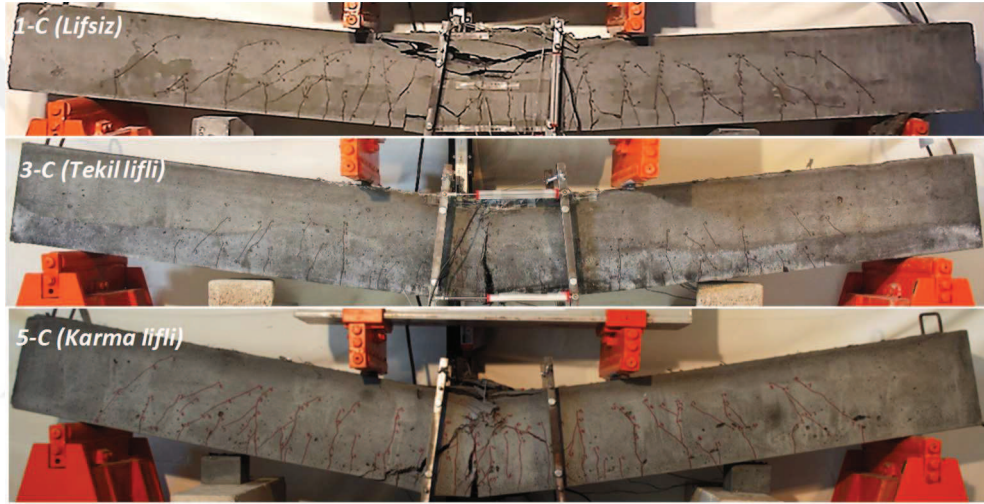
- Salt UYPLB kullanılması durumunda (donatısız), tekil lifin karma life göre yük taşıma kapasitesi ve süneklik bakımından daha iyi performans gösterdiği söylenebilir. Tekil lifli donatısız kirişin yük taşıma kapasitesi, %0.9'lık donatı oranına sahip lifsiz betonarme kirişin taşıma kapasitesine yaklaşmıştır (Şekil 2.31). Buna karşın, salt UYPLB'lu kirişlerde, çekme bölgesindeki liflerin sıyrılması sonucunda kirişler yük taşıma kapasitelerini kaybettiğinden, beklendiği gibi, süneklik oranları donatılı kirişlere göre çok daha düşük seviyede kalmaktadır.
- Gerek tekil gerekse karma çelik liflerle birlikte donatının kullanılması durumunda, çekme bölgesindeki liflerin katkısıyla yük taşıma kapasitesi artmakta, lifler devreden çıktıktan sonra ise çekme donatısı gerilmelerini karşılayabildiği için lifli betonun basınç sünekliği de etkin olarak kullanılabilir. Bu sayede, UYPLB'lu kirişlerde daha sünek bir davranış elde edilmektedir.



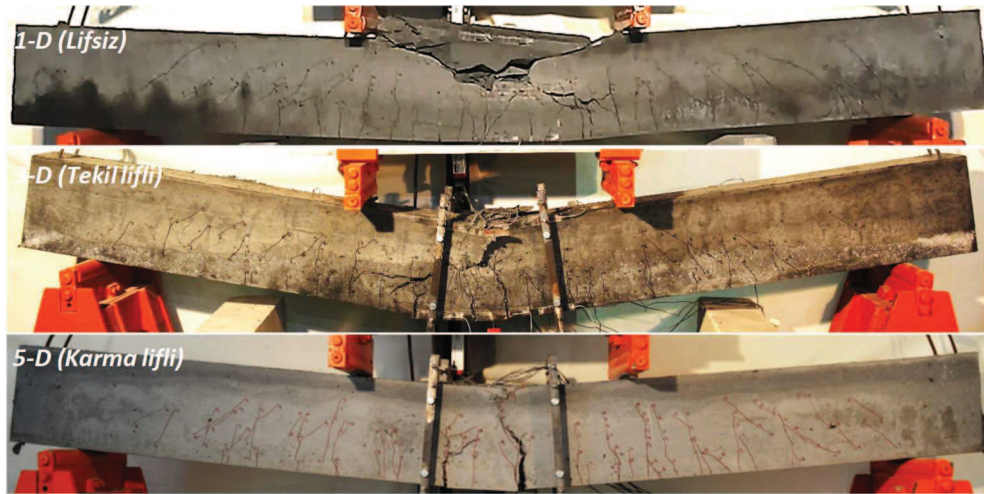
Şekil 2.32: Salt çekme donatılı kirişlere ($\rho = 0.009$) ait kırılma şekilleri



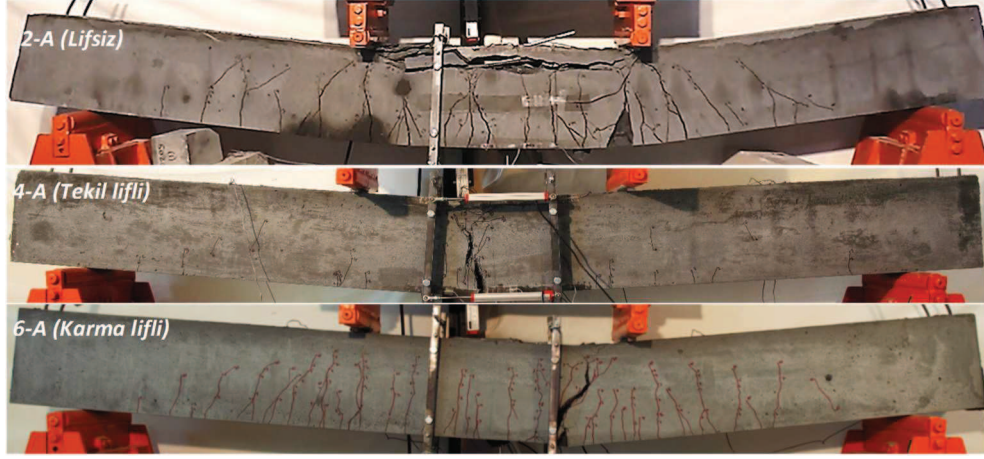
Şekil 2.33: Salt çekme donatılı kirişlere ($\rho = 0.019$) ait kırılma şekilleri



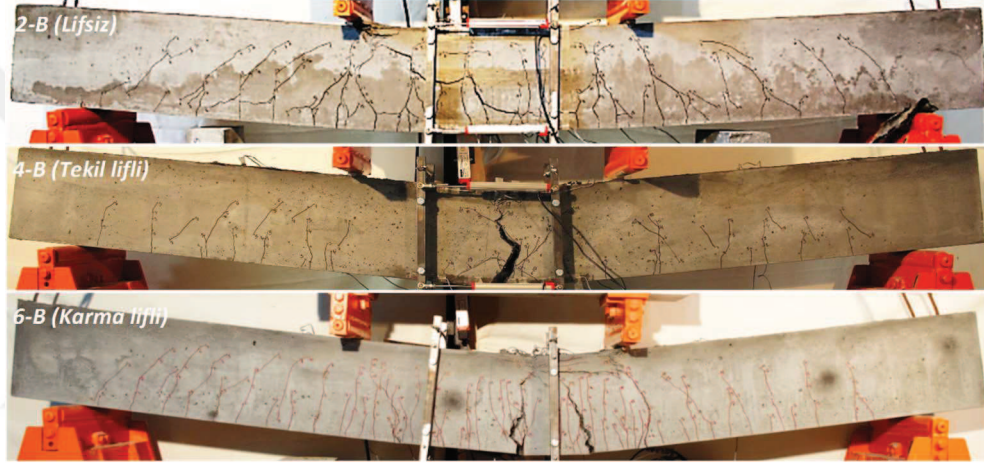
Şekil 2.34: Salt çekme donatılı kirişlere ($\rho = 0.028$) ait kırılma şekilleri



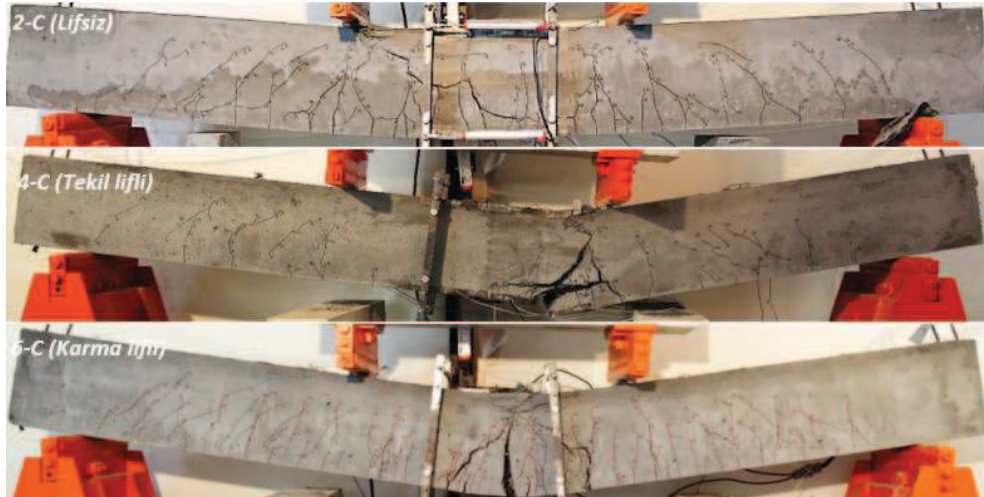
Şekil 2.35: Salt çekme donatılı kirişlere ($\rho = 0.043$) ait kırılma şekilleri



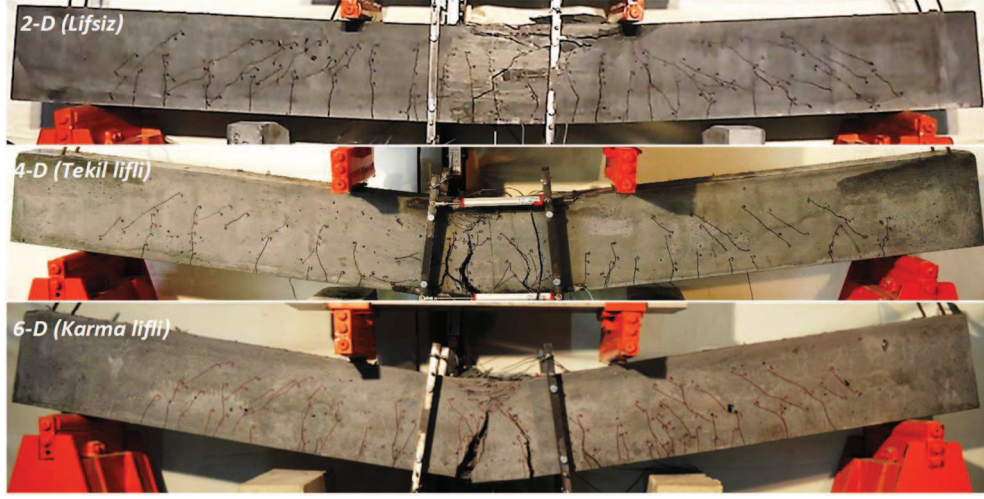
Şekil 2.36: Basınç donatılı kirişlere ($\rho = 0.009$) ait kırılma şekilleri



Şekil 2.37: Basınç donatılı kirişlere ($\rho = 0.019$) ait kırılma şekilleri



Şekil 2.38: Basınç donatılı kirişlere ($\rho = 0.028$) ait kırılma şekilleri



Şekil 2.39: Basınç donatılı kirişlere ($\rho = 0.043$) ait kırılma şekilleri

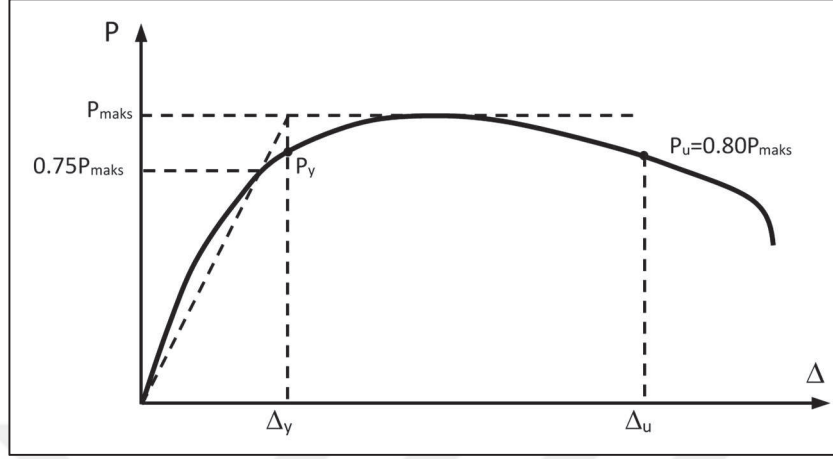
2.2.5.2 Yerdeğiştirme Sünekliklerinin (Δ_u/Δ_y) Karşılaştırılması

UYPLB'lu betonarme kirişlerde çelik lif içeriğinin yerdeğiştirme sünekliği üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla, lifsiz, tekil ve karma lifli kirişlere ait yerdeğiştirme süneklikleri belirlenmiştir. Bunun için öncelikle, eğilme testlerinden elde edilen *yük-düşey yerdeğiştirme davranışları* kullanılarak akma yükü (P_y), akma yerdeğiştirmesi (Δ_y), maksimum yerdeğiştirmeye karşılık gelen yük taşıma kapasitesi (P_u) ve maksimum yerdeğiştirme (Δ_u) değerleri elde edilmiştir.

Akma yerdeğiştirmesinin (Δ_y) belirlenmesinde, *ideal elasto-plastik* davranıştaki akmayı esas alan Park (1988)'deki azaltılmış rijitlik yaklaşımı esas alınmıştır. Bu yaklaşımda akma yerdeğiştirmesi, kirişin maksimum yük taşıma kapasitesinin (P_{maks}) %75'ine karşılık gelen nokta ile eğrinin başlangıcını birleştiren bir doğru yardımıyla geometrik olarak belirlenmektedir (Şekil 2.40).

Lifsiz kirişlerden farklı olarak UYPLB'lu kirişlerde, maksimum yük sonrası dayanım azalmaları oluşmakta, ancak lifler sayesinde kırılma yüküne (P_u) kadar büyük yerdeğiştirmeler meydana gelmektedir. Çalışmada, bu dayanım azalmalarını sınırlamak amacıyla Şekil 2.40'da gösterildiği gibi en fazla %20'lik yük düşüşü gözönüne alınmış ve maksimum yerdeğiştirmeler buna bağlı olarak belirlenmiştir (Park, 1988).

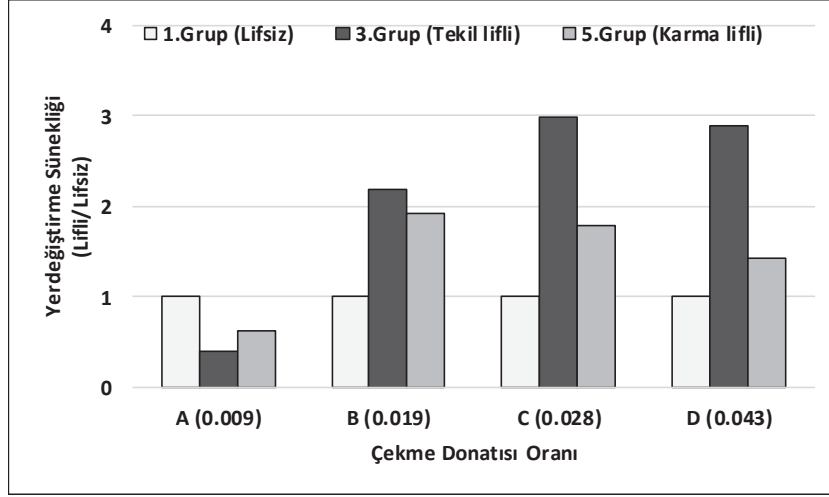
İncelenen test kirişleri için yerdeğiştirme süneklikleri ve diğer karakteristik değerler Tablo 2.10'da verilmiştir. Lifli kirişler için hesaplanan süneklik değerleri lifsiz kirişlerden elde edilenlere oranlanarak Şekil 2.41 ve 2.42'de verilmiştir.



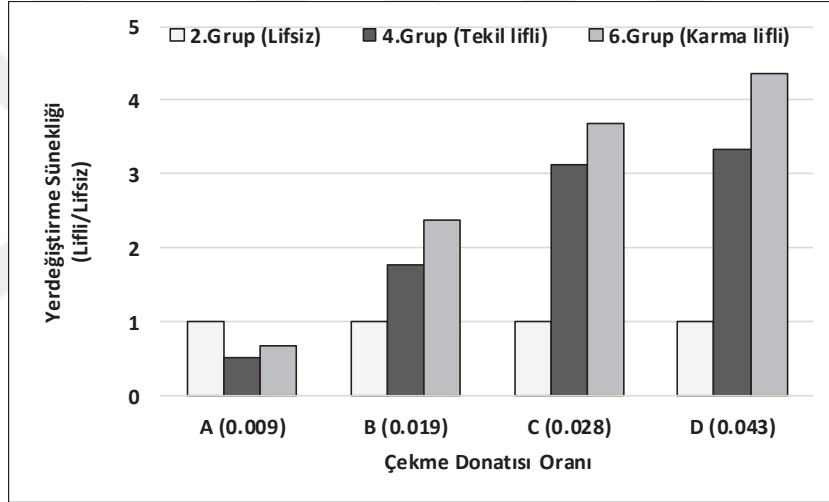
Şekil 2.40: Yük-düşey yerdeğiştirme davranışına ait karakteristik değerler (Park, 1988)

Tablo 2.10: Lifsiz, tekil ve karma lifli kirişlerin yerdeğiştirme sünekliklerine ait oranlar

Grup No	Kiriş kodu	Δ_y (mm)	P_u (kN)	Δ_u (mm)	P_{maks} (kN)	Δ_u/Δ_y	P_u/P_{maks}
1 (Lifsiz, çekme donatılı)	1-A	12.05	105.81	97.87	107.13	8.12	0.99
	1-B	16.00	177.49	52.13	187.19	3.26	0.95
	1-C	19.80	273.33	53.65	275.32	2.71	0.99
	1-D	19.10	309.91	35.01	318.88	1.83	0.97
2 (Lifsiz, basınç donatılı)	2-A	12.96	102.31	105.49	106.8	8.14	0.96
	2-B	16.66	206.14	54.15	208.65	3.25	0.99
	2-C	18.57	270.31	48.68	271.39	2.62	1.00
	2-D	19.89	320.93	42.00	324.81	2.11	0.99
3 (Tekil lifli, çekme donatılı)	3-A	11.81	120.20	37.22	150.25	3.15	0.80
	3-B	15.91	205.16	113.26	256.45	7.12	0.80
	3-C	14.83	255.78	119.80	319.73	8.08	0.80
	3-D	17.34	307.09	91.72	383.86	5.29	0.80
4 (Tekil lifli, basınç donatılı)	4-A	10.22	120.69	36.13	150.78	3.54	0.80
	4-B	13.28	208.99	76.83	250.58	5.79	0.83
	4-C	15.63	266.92	127.70	319.16	8.17	0.84
	4-D	17.16	333.48	120.70	363.93	7.03	0.92
5 (Karma lifli, çekme donatılı)	5-A	10.74	117.28	54.00	146.59	5.03	0.80
	5-B	15.00	202.50	93.30	253.16	6.22	0.80
	5-C	16.68	242.90	80.50	303.68	4.83	0.80
	5-D	18.88	303.69	48.96	364.55	2.59	0.83
6 (Karma lifli, basınç donatılı)	6-A	11.78	110.66	65.64	137.58	5.57	0.80
	6-B	14.98	212.23	115.76	242.33	7.73	0.88
	6-C	16.28	257.71	157.25	306.37	9.66	0.84
	6-D	17.54	284.06	161.18	343.38	9.19	0.83



Şekil 2.41: Salt çekme donatılı kirişlerde çelik lifin yerdeğiştirme sünekliği üzerindeki etkisi



Şekil 2.42: Basınç donatılı kirişlerde çelik lifin yerdeğiştirme sünekliği üzerindeki etkisi

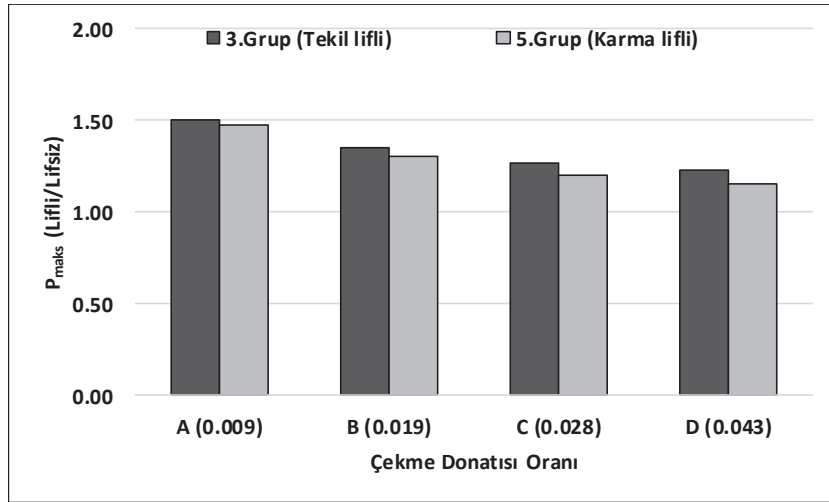
Farklı donatı oranlarına sahip lifsiz ve UYPLB'lu kirişlerin yerdeğiştirme süneklikleri değerlendirildiğinde (Tablo 2.10, Şekil 2.41 ve 2.42);

- Lifsiz kirişlerde, beklendiği gibi, çekme donatısı oranı arttıkça yerdeğiştirme sünekliği azalım yönünde bir eğilim göstermektedir. Elde edilen süneklik oranları 1.83-8.14 arasında değişmektedir (Tablo 2.10).
- En düşük donatı oranına ($\rho = 0.009$) sahip olan kirişlerde UYPLB kullanımı sonucu yerdeğiştirme sünekliğinin lifsiz kirişlere göre önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Bu değişim tekil lifli kirişlerde karma liflilere göre daha belirgindir.

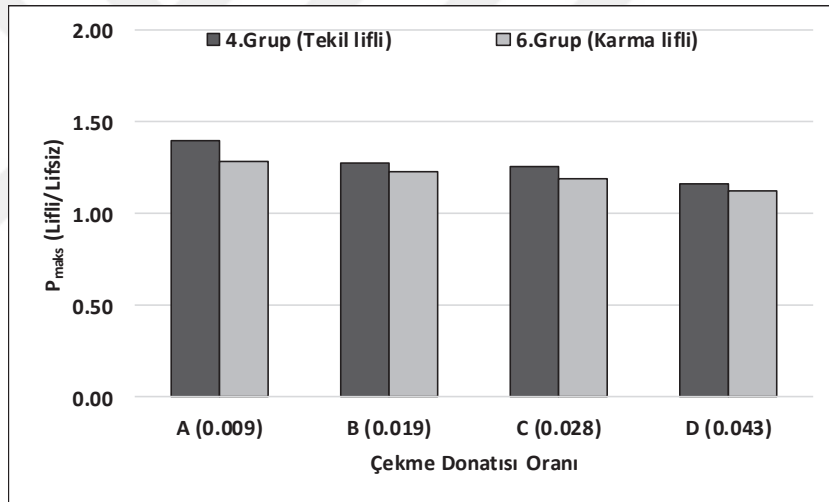
- UYPLB'lu kirişler için TS 500 (2000)'de öngörülen maksimum donatı oranı ($\rho = 0.019$) ve daha yüksek donatı oranları kullanılmasına rağmen, lifsiz kirişlere göre süneklik oranları 1.42-4.36 kat arasında artış göstermiştir.
- UYPLB için kullanılan her iki lif içeriği için basınç donatılı kirişlerde hesaplanan süneklik oranlarının, salt çekme donatılılara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu sonuç, çelik liflerin basınç donatısı için sargı etkisini sağlayabildiğini göstermektedir.
- Salt çekme donatısına sahip UYPLB'lu kirişlerde tekil lif kullanıldığında, basınç donatılılarda ise karma lif kullanıldığında daha yüksek süneklik değerleri elde edilmiştir.
- Salt çekme donatılı UYPLB'lu kirişlerde, maksimum süneklik değeri tekil lif için $\rho = 0.028$ 'lik donatı oranı için sahip kirişte, karma lif için ise $\rho = 0.019$ 'luk donatı oranına sahip kirişte elde edilmiştir. Basınç donatılı kirişlerde ise, her iki lif içeriği için de en büyük donatı oranına sahip kirişlerde maksimum süneklik elde edilmiştir.

2.2.5.3 Yük Taşıma Kapasitelerinin (P_{maks}) ve Artık Yük Oranlarının (P_{maks}/P_u) Karşılaştırılması

UYPLB'lu betonarme kirişlerde çelik lif içeriğinin yük taşıma kapasitesine olan etkisini belirleyebilmek amacıyla, lifli kirişler için elde edilen yük taşıma kapasiteleri lifsiz kirişlerde elde edilenlere oranlanmış ve karşılaştırılmalı olarak Şekil 2.43 ve 2.44'te verilmiştir. Burada, lifli ve lifsiz kirişler için elde edilen kapasiteler oranlanırken, çekme donatılarına ait akma dayanımları aynı olmadığından çelik liflerin kapasiteye olan etkisi tam olarak belirlenememektedir. Bunun için, her bir kirişin mevcut donatıları ile uyumlu olacak şekilde lifsiz durumdaki kapasitelerin teorik olarak belirlenmesinin daha uygun olacağı düşünülmektedir. Bu amaçla, Bölüm 3'te esasları verilen ve eğilme kapasitelerinin yeter derecede yakınlıkla belirlenebildiği sayısal hesap prosedürü kullanılarak kirişlerin yük taşıma kapasiteleri elde edilmiştir. Son olarak, her bir kiriş için elde edilen deneysel yük taşıma kapasitesi teorik lifsiz kapasite değerine oranlanmıştır. Böylece, donatılardaki farklı akma dayanımlarından kaynaklanan etkileri ortadan kaldırarak sadece çelik liflerin taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi ortaya konulmaya çalışılmıştır.



Şekil 2.43: Salt çekme donatılı kirişlerde çelik lifin yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi



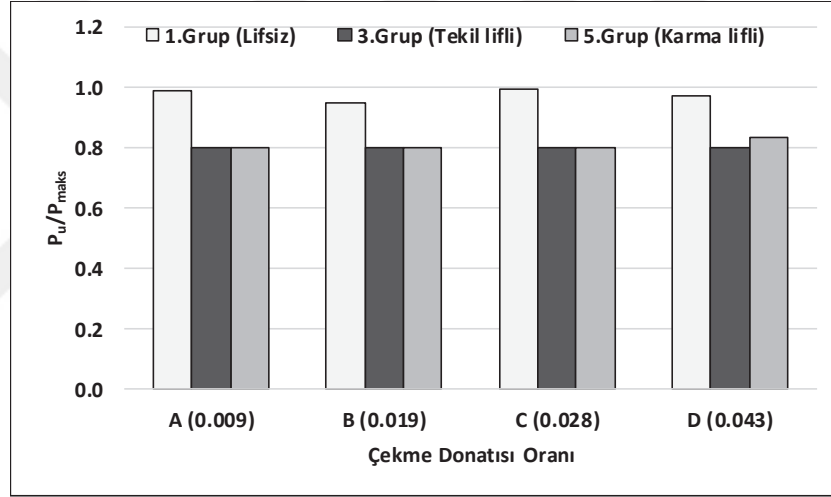
Şekil 2.44: Basınç donatılı kirişlerde çelik lifin yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi

Farklı donatı oranları için lifsiz ve UYPLB'lu kirişlerin yük taşıma kapasiteleri değerlendirildiğinde (Tablo 2.10, Şekil 2.43 ve 2.44);

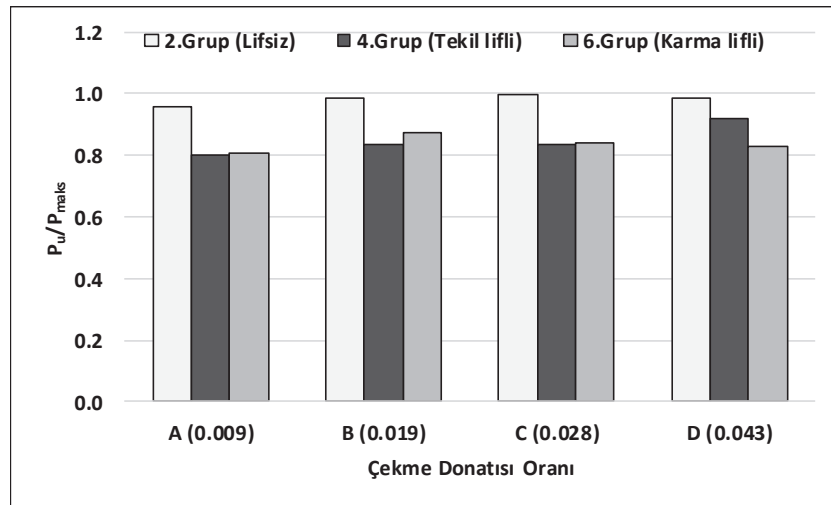
- UYPLB'lu kirişlerde çekme bölgesindeki liflerin katkısıyla lifsiz kirişlere göre yük taşıma kapasitesinde %12-%50 arasında artışlar sağlanmıştır. Yük taşıma kapasitelerindeki en büyük artış en düşük donatı oranına sahip kirişlerde ($\rho = 0.009$) elde edilmiş ve ayrıca, donatı oranı arttıkça liflerin sağladığı kapasite artışı azalım eğilimi göstermiştir.

- Aynı hacimsel lif oranına sahip tekil lifli UYPLB kirişlerde karma liflere göre % 2-%11 arasında değişen oranda daha büyük kapasite artışı sağlanmıştır.
- Salt çekme donatılı (1., 3. ve 5. grup) kirişlerde elde edilen kapasite artışı basınç donatılı olanlara (2., 4. ve 6. grup) göre %1-%19 arasında daha büyük olduğu belirlenmiştir.

UYPLB'lu kirişlerde liflerin sağladığı beton sünekliği sayesinde maksimum yük sonrasında önemli şekildeğiştirme kapasitesi bulunmakla birlikte, bu bölgede dayanım azalmaları oluşmaktadır. Lif içeriğinin bu dayanım azalmaları üzerindeki etkisini belirleyebilmek amacıyla maksimum şekildeğiştirmeye karşılık gelen yükün maksimum yüke oranı olarak ifade edilen artık yük oranları belirlenmiş, farklı çekme donatısı ve lif içeriği açısından karşılaştırılmıştır (Şekil 2.45 ve 2.46).



Şekil 2.45: Salt çekme donatılı kirişlerde belirlenen artık yük oranları



Şekil 2.46: Basınç donatılı kirişlerde belirlenen artık yük oranları

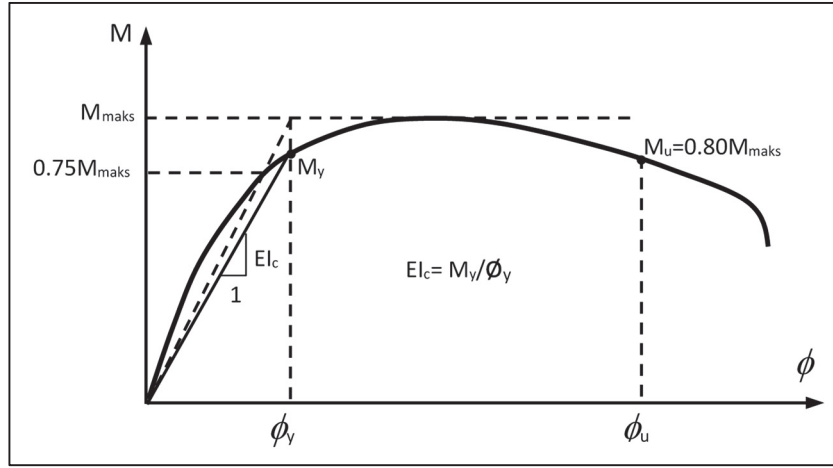
Farklı donatı oranları için lifsiz ve UYPLB'lu kirişlerin artık yük oranları (P_u/P_{maks}) değerlendirildiğinde (Tablo 2.10, Şekil 2.45 ve 2.46);

- Lifsiz tüm kirişlerde kırılma durumunun yaklaşık olarak maksimum yüke ulaşılması sonucu beton ezilmesi ile oluştuğu belirlenmiştir.
- Salt çekme donatısına sahip UYPLB'lu kirişlerde, genel olarak, maksimum yük sonrası %20'lik bir dayanım azalması gözlenmiştir. Bununla birlikte, bu kirişlerin çoğunda süneklik hesaplarında göz önüne alınandan daha fazla yerdeğiştirme kapasitesi bulunmasına karşın, dayanım azalmaları kabul edilen sınırı aştığı için hesaplarda kullanılmamıştır.
- Yüksek oranda çekme donatısına sahip UYPLB'lu kirişlerde, basınç donatısının artık yük oranlarını bir miktar arttırdığı gözlenmiştir. Bu durum, elemanların şekildeğiştirme kapasitelerini daha etkin kullanmalarını sağlamış ve süneklikleri arttırmıştır. Buna göre, çelik liflerin sargı etkisi yaparak basınç donatılarının burkulmasını engellediği söylenebilmektedir.

2.2.5.4 Eğrilik Sünekliklerinin ve Çatlamış Kesit Eğilme Rijitliklerinin Belirlenmesi

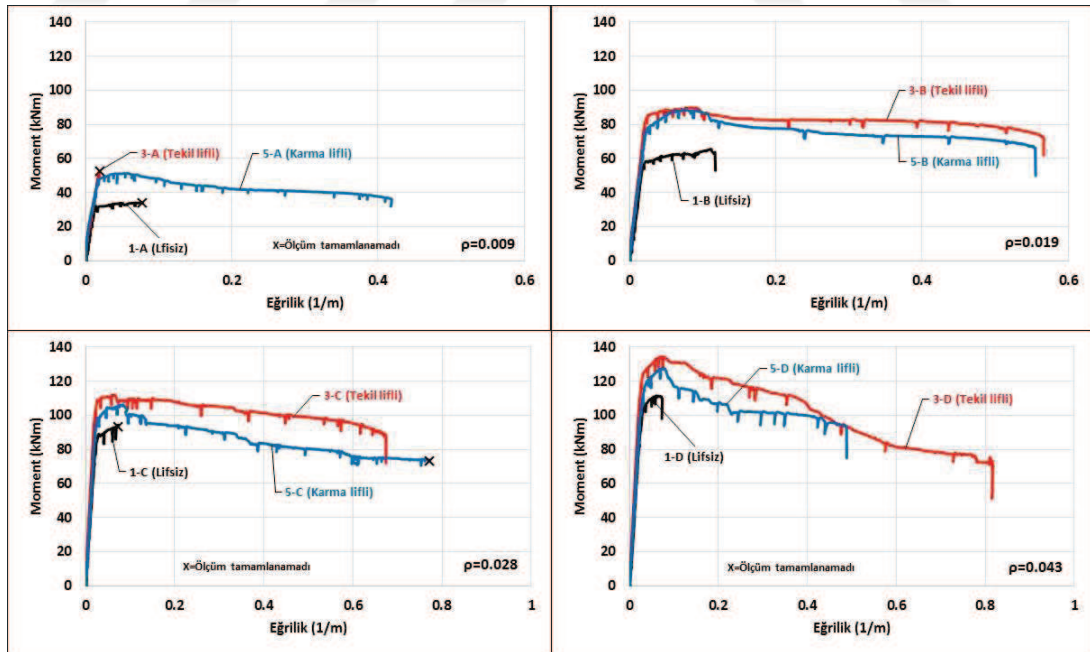
UYPLB'lu betonarme kirişlerde çelik lif içeriğinin eğrilik (birim dönme) sünekliğine ve çatlamış kesit eğilme rijitliğine olan etkilerini belirlemek amacıyla, lifsiz, tekil lifli ve karma lifli kirişlere ait deneysel *moment-eğrilik* grafiklerinden yararlanılarak eğrilik süneklikleri ve rijitlikleri belirlenmiştir.

Bunun için öncelikle, kiriş orta bölgesi için elde edilen *moment-eğrilik* grafikleri kullanılarak akma momenti (M_y), maksimum yerdeğiştirmeye karşılık gelen moment taşıma kapasitesi (M_u), akma eğriliği (θ_y) ve maksimum eğrilik (θ_u) değerleri elde edilmiştir. Bu karakteristik değerlerin belirlenmesi için yerdeğiştirme sünekliklerinin hesabında kullanılan prosedür esas alınmıştır (Park, 1988). Kirişlerde çatlamış kesit eğilme rijitlikleri (EI_c), moment-eğrilik davranışındaki idealleştirme sonucunda elde edilen akma momenti (M_y)'nin akma eğriliğine (θ_y)'ne bölünmesiyle belirlenmiştir (Şekil 2.47).

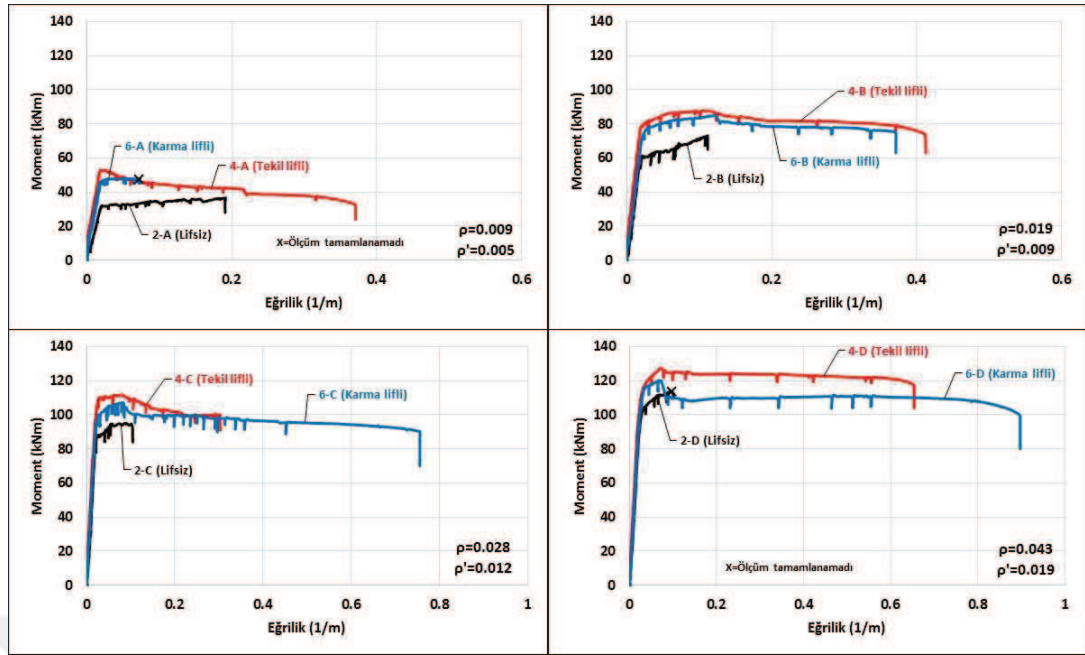


Şekil 2.47: Moment- eğrilik davranışına ait karakteristik değerler (Park, 1988)

Eğrilik sünekliğinin belirlenmesi için yukarıda belirtilen prosedür, lifsiz ve UYPLB'lu betonarme kirişlerin *moment-eğrilik* grafikleri için uygulanmış ve buna ait sonuçlar Tablo 2.11'de özetlenmiştir. Bazı test kirişlerinde oluşan çatlakların ölçüm düzeneğine zarar vermesi veya lifli numunelerde büyük çatlak oluşumunun ölçüm aralığının dışında kalması gibi sebeplerle ölçümler erken sonlanmış ve moment-eğrilik grafikleri elde edilememiştir (Şekil 2.48 ve 2.49).



Şekil 2.48: 1.,3. ve 5. grup salt çekme donatılı kirişlere ait moment-eğrilik davranışları



Şekil 2.49: 2.,4. ve 6. grup basınç donatılı kirişlere ait moment-eğrilik davranışları

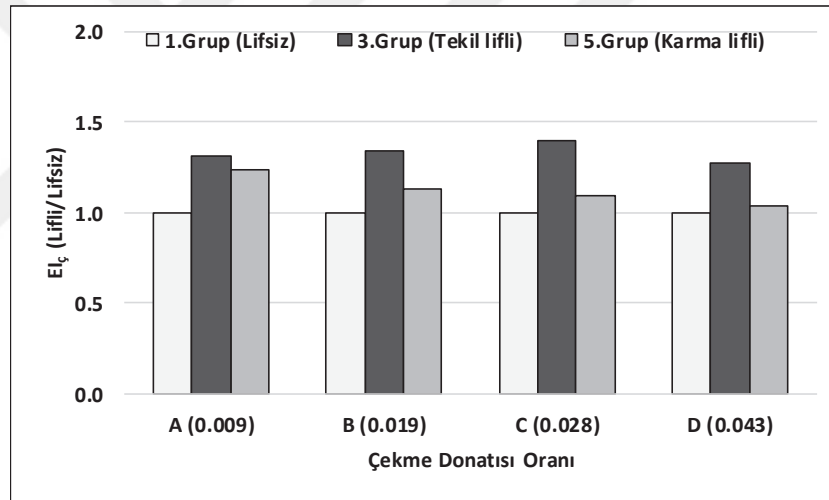
Tablo 2.11: Eğrilik (birim dönme) süneklikleri ile ilgili karakteristik değerler

Grup adı	Kiriş adı	ϕ_y (1/m)	M_u (kNm)	ϕ_u (1/m)	M_{maks} (kNm)	ϕ_u/ϕ_y	EI_c (kNm ²)
1 (Lifless, çekme donatılı)	1-A	0.0144	*	*	*	*	2201
	1-B	0.0209	63.69	0.1168	65.52	5.59	2762
	1-C	0.0254	*	*	*	*	3385
	1-D	0.0285	109.84	0.0734	111.61	2.58	3542
2 (Lifless, basınç donatılı)	2-A	0.0231	35.53	0.1909	37.38	8.26	1371
	2-B	0.0227	78.81	0.1117	73.03	4.92	2692
	2-C	0.0223	92.72	0.1041	94.99	4.67	3869
	2-D	0.0260	*	*	*	*	3683
3 (Tekil lifli, çekme donatılı)	3-A	0.0174	*	*	*	*	2880
	3-B	0.0225	71.13	0.5667	89.76	25.19	3698
	3-C	0.0215	89.94	0.6654	111.90	30.95	4740
	3-D	0.0268	107.48	0.3532	134.35	13.18	4513
4 (Tekil lifli, basınç donatılı)	4-A	0.0171	42.22	0.1946	52.77	11.38	2949
	4-B	0.0207	73.38	0.4122	87.70	19.91	3788
	4-C	0.0216	99.98	0.3013	111.71	13.95	4694
	4-D	0.0261	116.95	0.6540	127.37	25.06	4221
5 (Karma lifli, çekme donatılı)	5-A	0.0176	41.08	0.2784	51.31	15.82	2720
	5-B	0.0249	70.88	0.4965	88.61	19.94	3118
	5-C	0.0240	85.03	0.3644	106.29	15.18	3696
	5-D	0.0299	106.08	0.2198	127.59	7.35	3656
6 (Karma lifli, basınç donatılı)	6-A	0.0184	*	*	*	*	2460
	6-B	0.0248	74.47	0.3715	84.81	14.98	3045
	6-C	0.0230	90.20	0.7555	107.23	7.04	4186
	6-D	0.0271	99.32	0.8974	120.18	*	3931
* : Ölçüm tamamlanamadı							

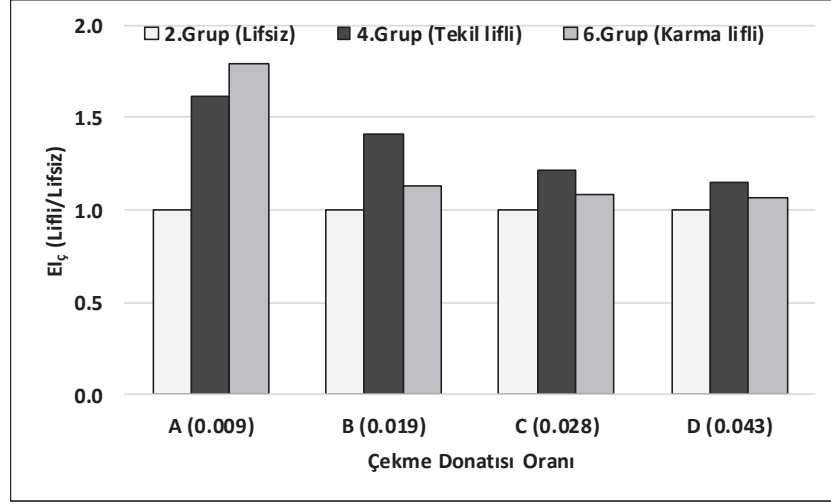
Farklı donatı oranları için lifsiz ve UYPLB'lu kirişlerin elde edilebilen eğrilik süneklikleri değerlendirildiğinde (Tablo 2.11):

- UYPLB'lu kirişlerde lifsiz kirişlere daha yüksek eğrilik sünekliği değerleri elde edilmiştir. Lifsiz kirişlerde eğrilik sünekliklerinin 2.58-8.26 arasında, UYPLB'lu kirişlerde ise 7.04-30.95 arasında değiştiği belirlenmiştir.
- Tekil lifli UYPLB'lu kirişlerin genel olarak karma lifli kirişlere göre daha yüksek süneklik değerleri verdiği belirlenmiştir.

UYPLB'lu betonarme kirişlerde lif içeriğinin eğilme rijitliğine olan etkisini belirleyebilmek amacıyla, *moment-eğrilik* davranışındaki idealleştirme sonucunda elde edilen çatlamış kesit eğilme rijitlikleri (EI_{ϕ}) lifsiz kirişlerden elde edilenlere oranlanmış ve Şekil 2.50 ve 2.51'de karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



Şekil 2.50: Salt çekme donatılı kirişlerde çelik liflerin eğilme rijitliği üzerindeki etkisi



Şekil 2.51: Basınç donatılı kirişlerde çelik liflerin eğilme rijitliği üzerindeki etkisi

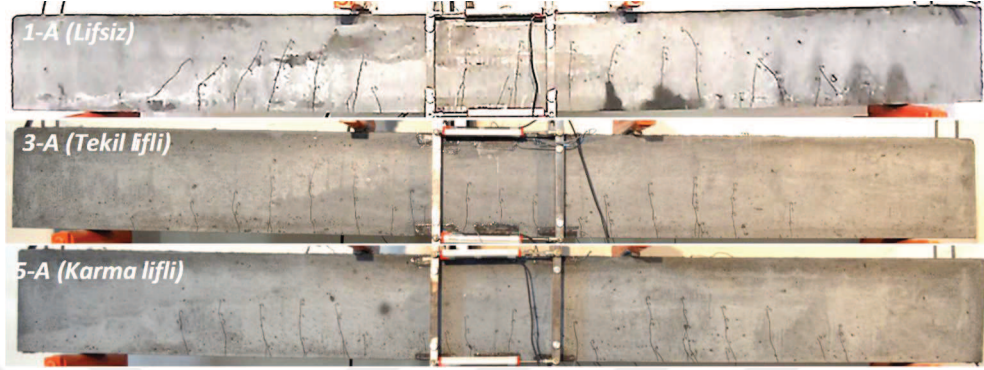
Farklı donatı oranları için lifsiz ve UYPLB'lu kirişlerin elde edilen çatlamış kesit eğilme rijitlikleri değerlendirildiğinde (Tablo 2.11, Şekil 2.50 ve 2.51);

- Tüm kirişlerde, beklenildiği gibi, donatı oranının artmasına bağlı olarak eğilme rijitliğinin arttığı görülmüştür.
- UYPLB'lu kirişlerde eğilme rijitliğinin lifsiz kirişlere göre tekil liflilerde 1.15-2.15, karma liflilerde ise 1.03-1.79 kat arasında arttığı belirlenmiştir. Eğilme rijitliğindeki en büyük artış en düşük donatı oranına sahip kirişlerde ($\rho = 0.009$) gerçekleşmiş, donatı oranı arttıkça her iki lif içeriği için de liflerin sağladığı rijitlik artışı azalım eğilimi göstermiştir.
- UYPLB'lu kirişler eğilme rijitliği açısından kendi aralarında değerlendirildiğinde, tekil lifli kirişlerde karma liflilere göre %6-%22 arasında daha fazla artış sağlandığı belirlenmiştir.

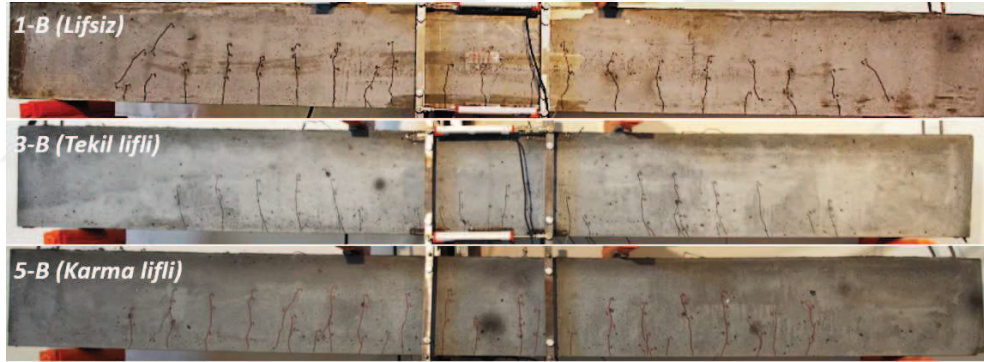
2.2.5.5 Çatlak Davranışlarının Karşılaştırılması

UYPLB'lu betonarme kirişlerde kullanılan çelik liflerin çatlak davranışına olan etkisini ortaya koymak amacıyla, kiriş testleri esnasında işaretlenen çatlak dağılımları ve ölçülen çatlak genişlikleri karşılaştırılmıştır. Çatlak incelemeleri, $L/250$ 'lik ve $L/70$ 'lik düşey yerdeğiştirme değerlerinde yapılmıştır. Burada $L/250$ değeri tüm kirişler için elastik bölgeye karşılık gelirken $L/70$ değeri önemli plastik şekildeğiştirmelerin olduğu plastik bölgeye karşılık gelmektedir. Çalışmada, bu iki

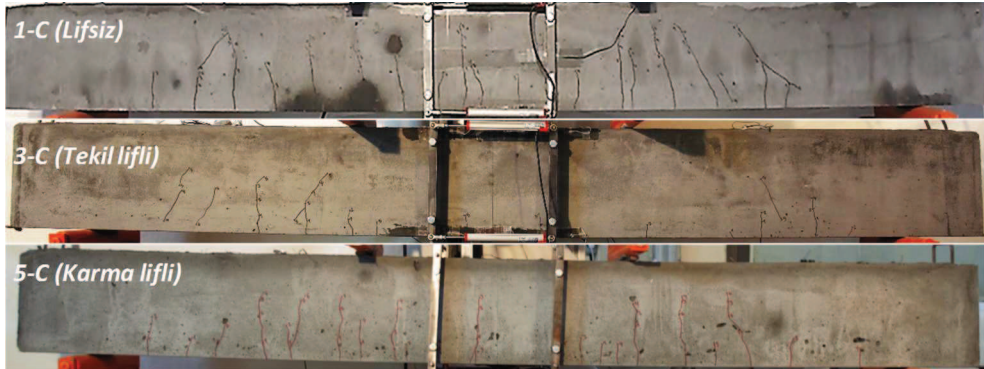
yerdeşiştirme değerinin *kullanılabilirlik* ve *taşıma gücü* durumlarına ait çatlak davranışlarını temsil ettiği varsayılmıştır. Lifsiz, tekil ve karma lifli kirişlere ait çatlak dağılımları şekil 2.52-2.67’de, çatlak genişliklerine ait karşılaştırmalar şekil 2.68 ve 2.69’da verilmiştir.



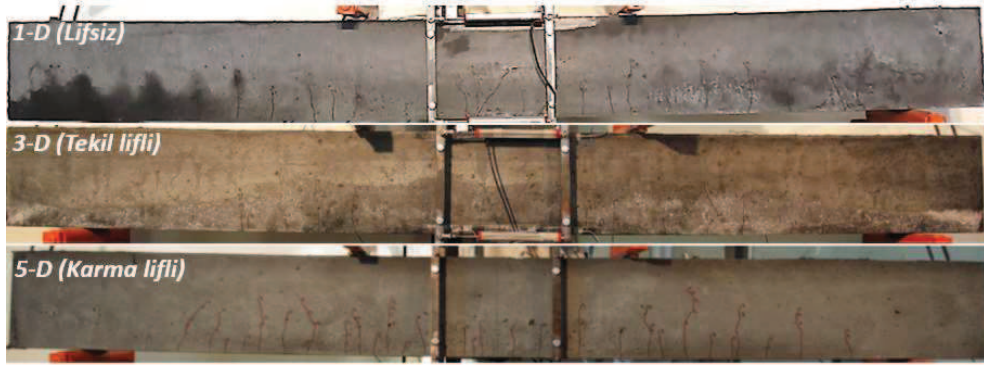
şekil 2.52: Salt  ekme donatılı kirişlerin ($\rho = 0.009$) $L/250$ yerdeğiştirmesi i in  atlak dağılımları



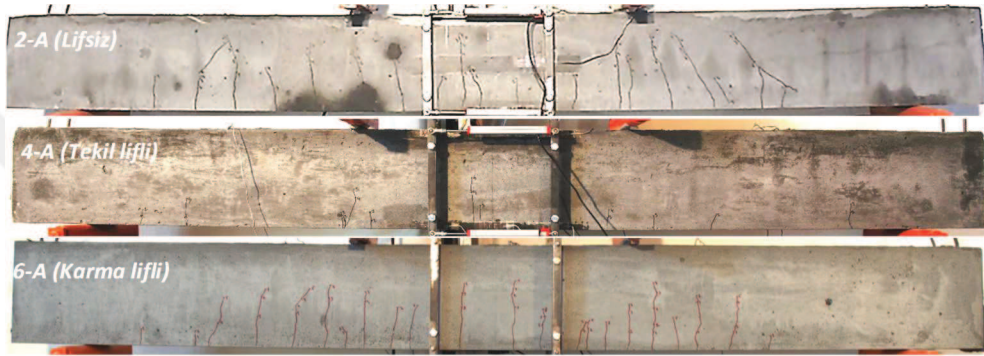
şekil 2.53: Salt  ekme donatılı kirişlerin ($\rho = 0.019$) $L/250$ yerdeğiştirmesi i in  atlak dağılımları



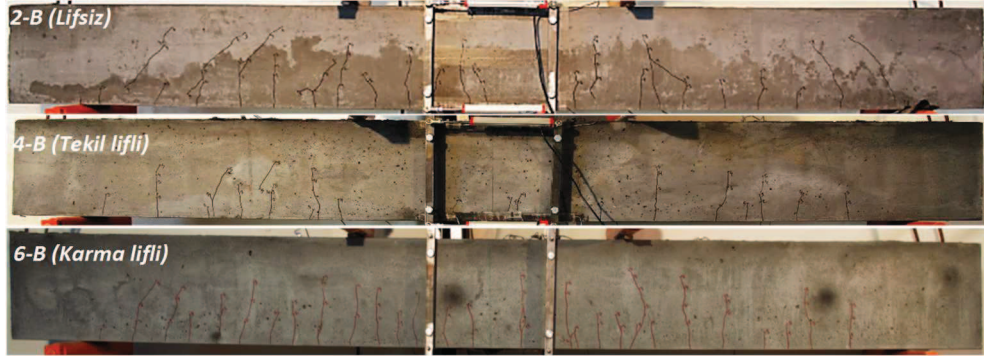
şekil 2.54: Salt  ekme donatılı kirişlerin ($\rho = 0.028$) $L/250$ yerdeğiştirmesi i in  atlak dağılımları



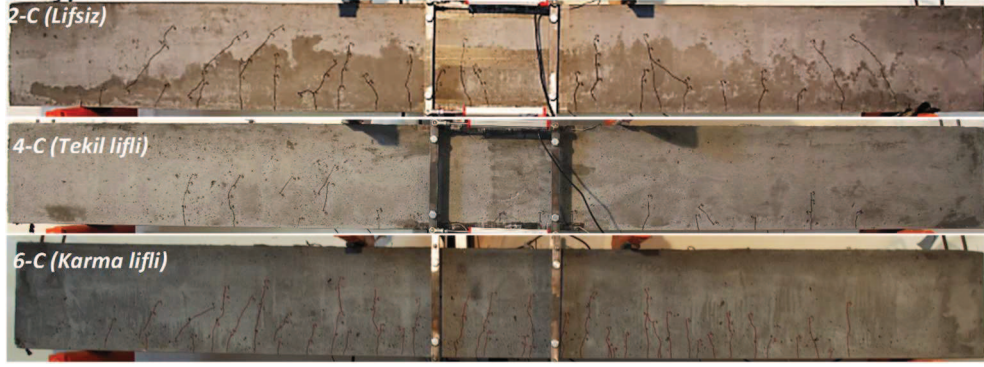
Şekil 2.55: Salt çekme donatılı kirişlerin ($\rho = 0.043$) $L/250$ yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları



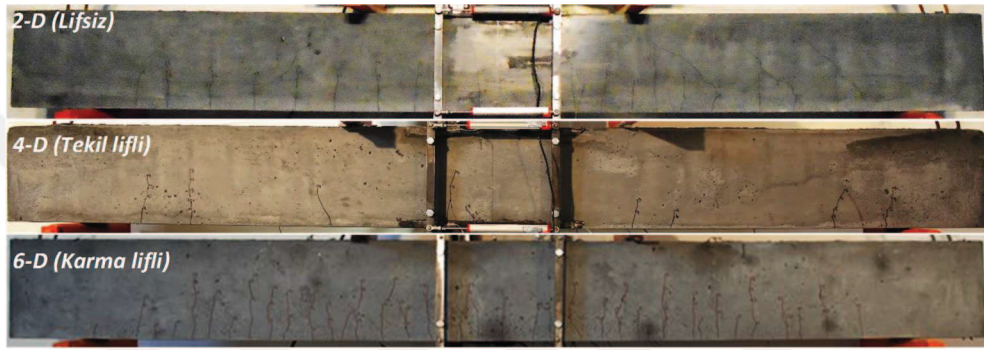
Şekil 2.56: Basınç donatılı kirişlerin ($\rho = 0.009$) $L/250$ yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları



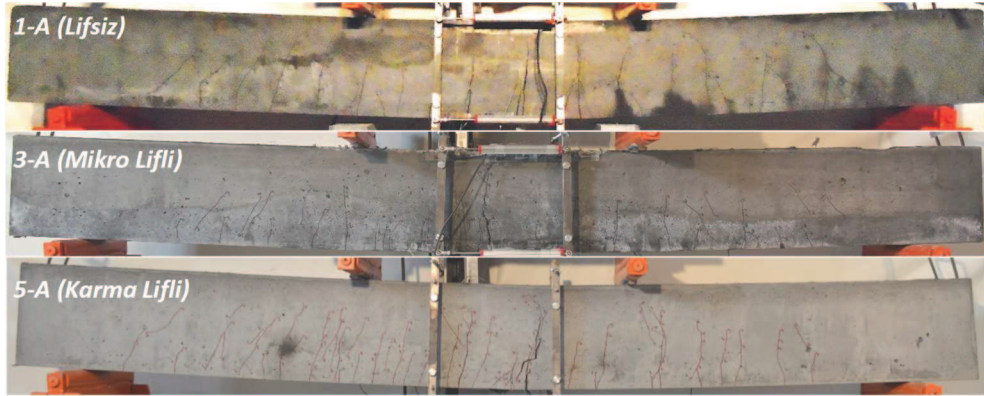
Şekil 2.57: Basınç donatılı kirişlerin ($\rho = 0.019$) $L/250$ yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları



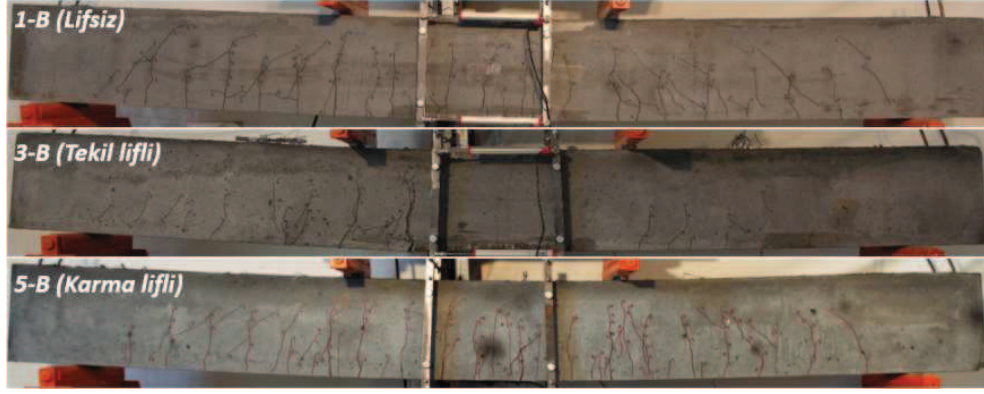
Şekil 2.58: Basınç donatılı kirişlerin ($\rho = 0.028$) $L/250$ yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları



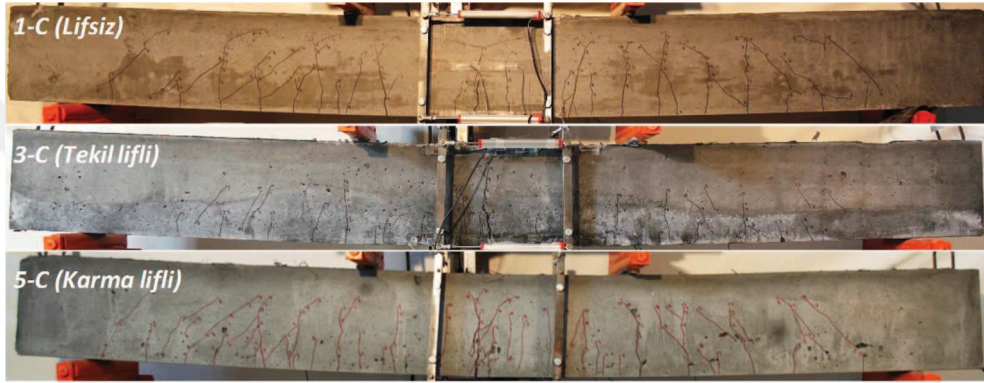
Şekil 2.59: Basınç donatılı kirişlerin ($\rho = 0.043$) $L/250$ yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları



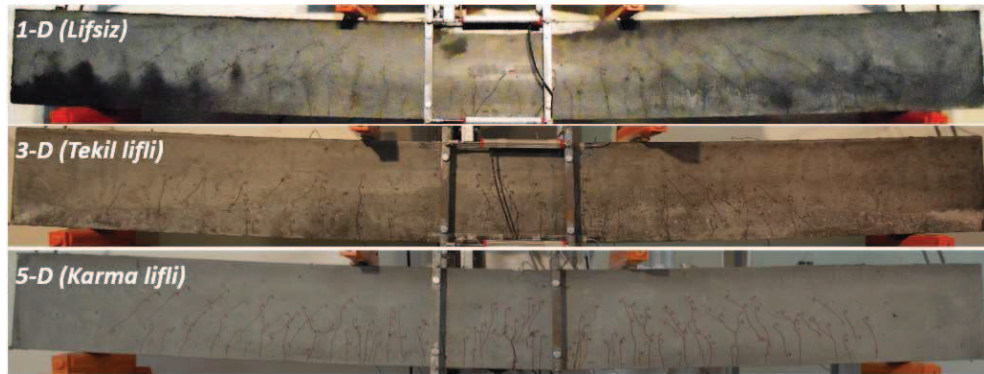
Şekil 2.60: Salt çekme donatılı kirişlerin ($\rho = 0.009$) $L/70$ yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları



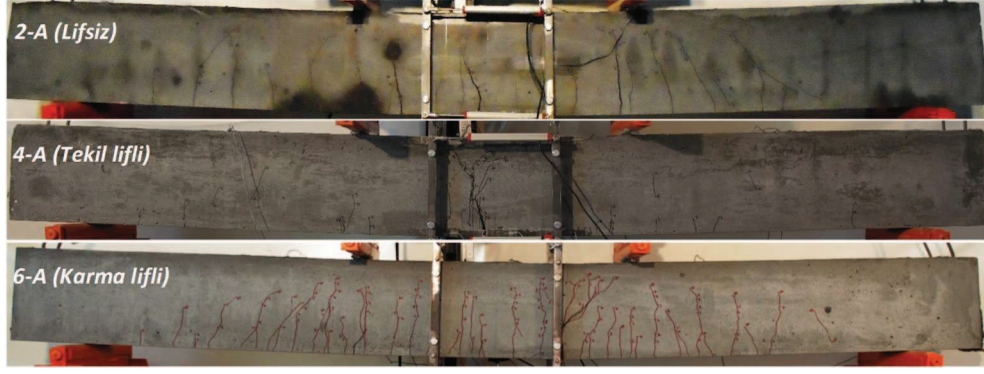
Şekil 2.61: Salt çekme donatılı kirişlerin ($\rho = 0.019$) $L/70$ yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları



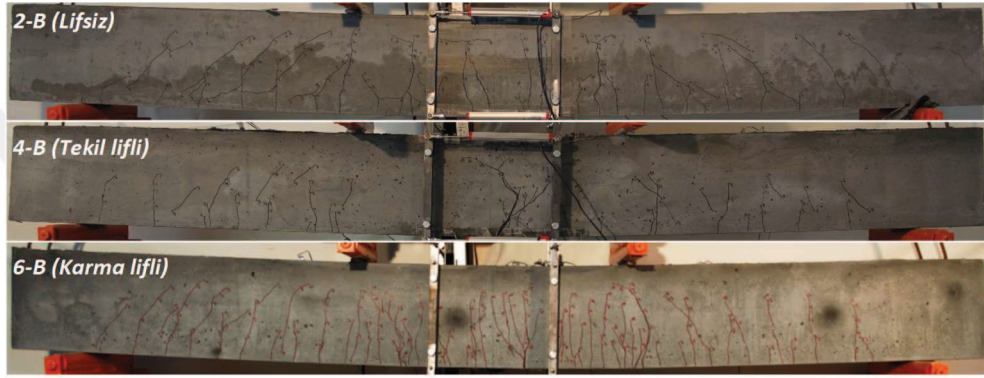
Şekil 2.62: Salt çekme donatılı kirişlerin ($\rho = 0.028$) $L/70$ yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları



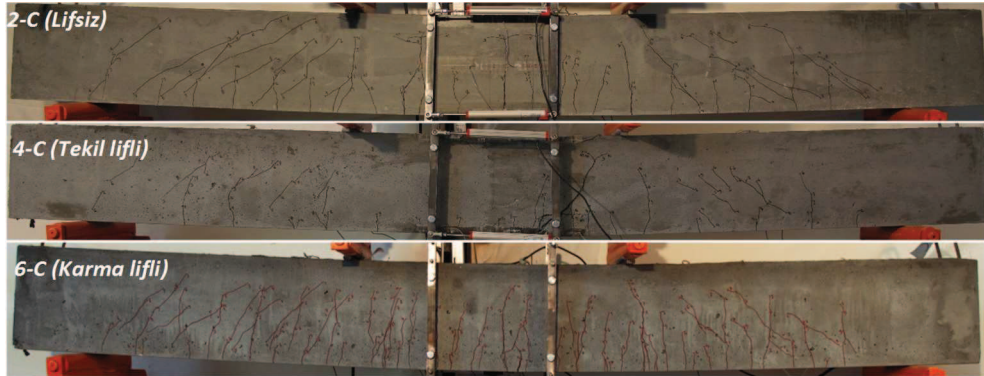
Şekil 2.63: Salt çekme donatılı kirişlerin ($\rho = 0.043$) $L/70$ yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları



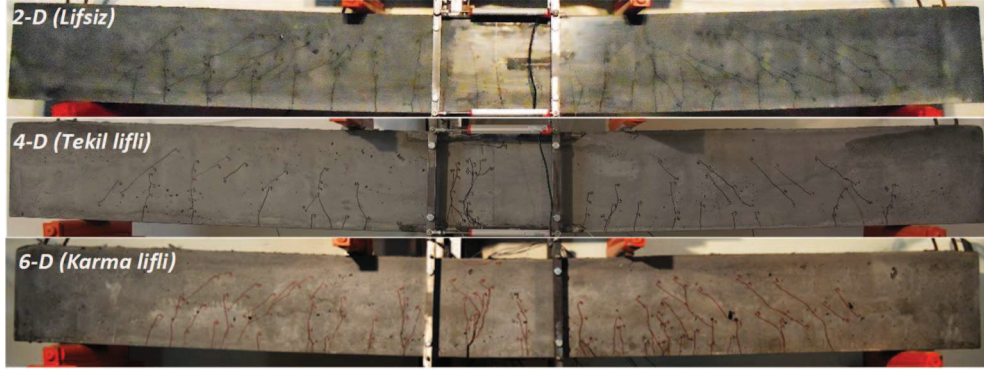
Şekil 2.64: Basınç donatılı kirişlerin ($\rho = 0.009$) $L/70$ yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları



Şekil 2.65: Basınç donatılı kirişlerin ($\rho = 0.019$) $L/70$ yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları



Şekil 2.66: Basınç donatılı kirişlerin ($\rho = 0.028$) $L/70$ yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları

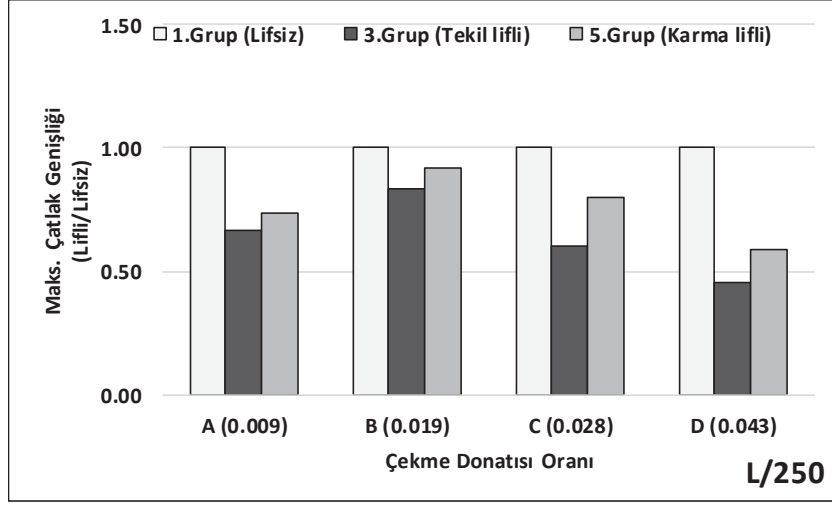


Şekil 2.67: Basınç donatılı kirişlerin ($\rho = 0.043$) $L/70$ yerdeğiştirmesi için çatlak dağılımları

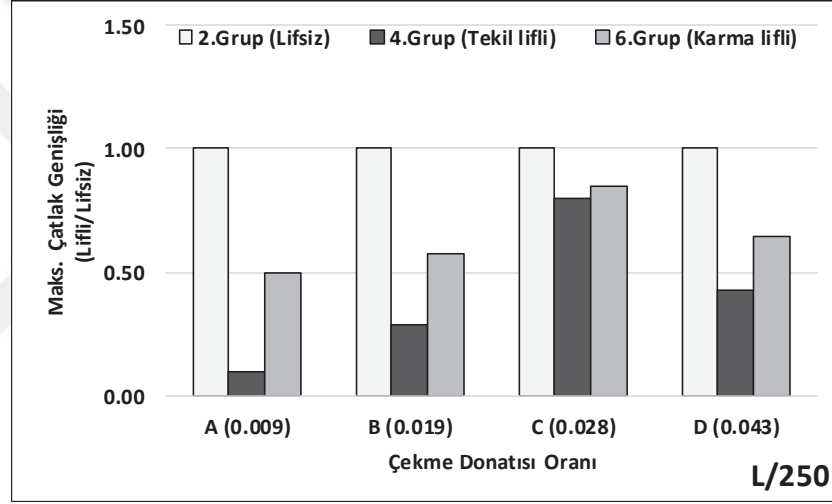
Farklı donatı oranları için lifsiz ve UYPLB'lu kirişlerde çatlak dağılımları değerlendirildiğinde (Şekil 2.52-2.67);

- Genel olarak tekil lifli kirişlerde çatlak sayısının ve derinliğinin hem *kullanılabilirlik* ($L/250$) hem de *taşıma gücü* durumu ($L/70$) için karma lifli ve lifsiz duruma göre belirgin şekilde daha az olduğu görülmüştür. Karma lifli kirişlerde özellikle *taşıma gücü* durumu için lifsiz kirişlere göre daha fazla sayıda çatlak meydana geldiği belirlenmiştir.
- Kirişlerdeki donatı oranı arttıkça lifsiz ve karma lifli kirişlerdeki çatlak sayısı, tekil lifli kirişlerdekine oranla artış göstermiştir.

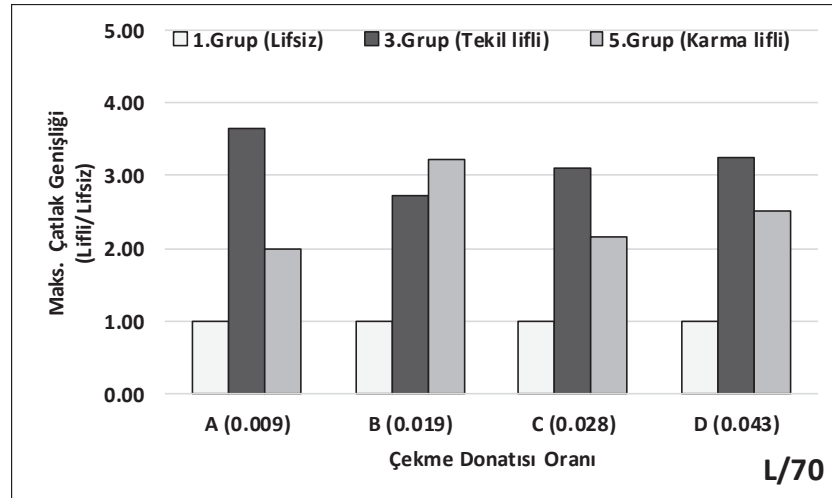
UYPLB'lu betonarme kirişlerde lif içeriğinin çatlak genişliklerine olan etkisini belirleyebilmek amacıyla, *kullanılabilirlik* durumunu temsil eden $L/250$ ve *taşıma gücü* durumunu temsilen $L/70$ yerdeğiştirmeleri için ölçülen maksimum çatlak genişlikleri lifsiz kirişlerden elde edilenlere oranlanarak Şekil 2.68-2.71'de karşılaştırılmıştır.



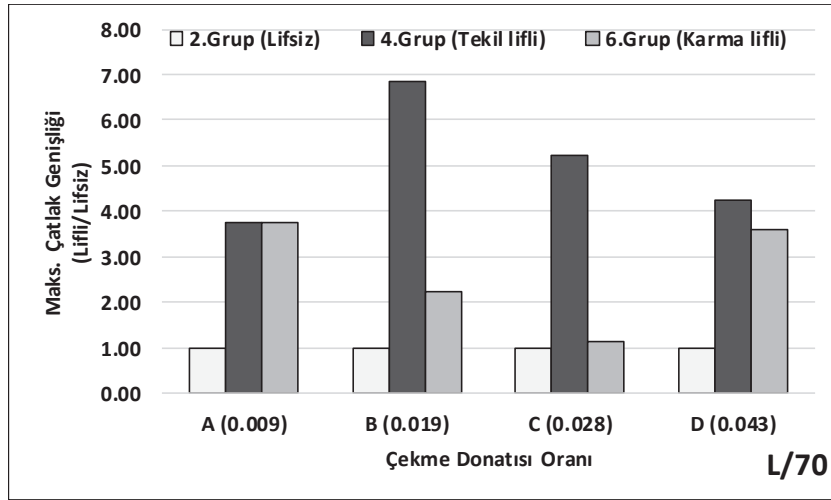
Şekil 2.68: Salt çekme donatılı kirişlerin $L/250$ yerdeğiştirmesi için çatlak genişliklerinin karşılaştırılması



Şekil 2.69: Basınç donatılı kirişlerin $L/250$ yerdeğiştirmesi için çatlak genişliklerinin karşılaştırılması



Şekil 2.70: Salt çekme donatılı kirişlerin $L/70$ yerdeğiştirmesi için çatlak genişliklerinin karşılaştırılması



Şekil 2.71: Basınç donatılı kirişlerin $L/70$ yerdeğiştirmesi için çatlak genişliklerinin karşılaştırılması

Farklı donatı oranları için lifsiz ve UYPLB’lu kirişlerin çatlak genişlikleri değeriendirildiğinde (Şekil 2.68-2.71):

- *Kullanılabilirlik* durumunda ($L/250$) tüm kirişlerde, orta ve kenar bölgelerde benzer genişlikte çatlaklar gözlenirken, *taşıma gücü* durumunda ($L/70$) ise UYPLB’lu kiriş orta bölgesinde büyük tek bir çatlak oluşumu gözlenmiştir. Bu aşamada diğer bölgelerdeki çatlakların genişlikleri ise bir miktar azalmış veya sabit kalmıştır.
- *Kullanılabilirlik* durumunda, tekil lif kullanımı sonucu çatlak genişliklerinin lifsiz duruma göre %17-%90 arasında değışen oranlarda azaldığı, basınç donatılı kirişlerde bu davranışın salt çekme donatılı kirişlere göre daha etkin olduğu görülmüştür. Karma lif kullanımının ise, benzer şekilde lifsiz duruma göre çatlak genişliklerini %8-%50 arasında azalttığı görüldürken *kullanılabilirlik* durumu için tekil lifin daha etkin olduğu belirlenmiştir.
- *Taşıma gücü* durumunda, UYPLB’lu kirişlerin orta bölgesinde oluşan büyük ve tek bir çatlak nedeniyle lifsiz kirişlere göre oldukça büyük çatlak genişlikleri elde edilmiştir. Bu aşamada tekil lifli kirişlerdeki çatlak genişliklerinin, karma liflilere göre daha büyük olduğu belirlenmiştir.
- Lifsiz kirişlerde kırılma yüküne ulaşıldığında kiriş orta bölgesinde yaklaşık aynı genişlikte çatlaklar gözlenmiştir. Buna karşın, tüm UYPLB’lu kirişlerde orta bölgede oluşan büyük çatlakta çekme donatısı sınır değere ulaşmış ve koparak kirişin kırılmasına sebep olmuştur.

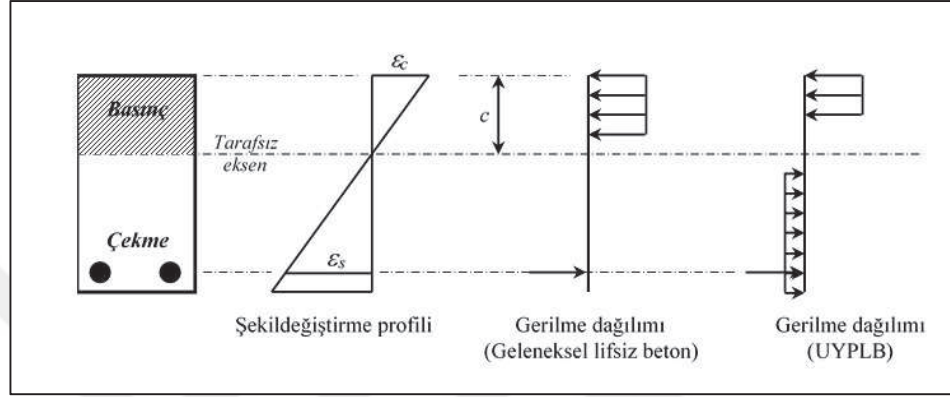
3. ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI LİFLİ BETON İLE ÜRETİLEN BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME KAPASİTELERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Literatürde, sünek çekme kırılması davranışı gösteren ve sadece çekme donatısı bulunan Yüksek Dayanımlı Lifli Beton (YDLB) ve Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) ile üretilmiş betonarme kirişlerin eğilme momenti kapasitelerinin teorik hesabına yönelik farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Bu yaklaşımlarda genel olarak, betonarme kirişlerin geleneksel hesap esasları (eşdeğer gerilme bloğu vb.) korunmakta ancak, ilave olarak, çekme bölgesindeki çelik liflerin katkısı da hesaplarda gözönüne alınmaktadır. Bu durumda kullanılan yaklaşımlar, beton karışımında çelik liflerin kullanılmaması halinde bilinen taşıma gücü yöntemine karşılık gelmektedir.

UYPLB ile üretilmiş betonarme kirişlerin eğilme kapasitelerinin teorik olarak belirlenmesi için literatürdeki çalışmalarda, beton basınç bölgesindeki gerilme dağılımı, en dış beton basınç lifindeki maksimum şekildeğiştirme değeri, çelik liflerin en/boy oranı, dağılımı ve hacimsel oranı ile çekme bölgesindeki gerilme dağılımını etkileyen diğer parametreler göz önüne alınarak, deneysel sonuçlarla uyumlu teorik hesap modelleri elde edilmeye çalışılmıştır.

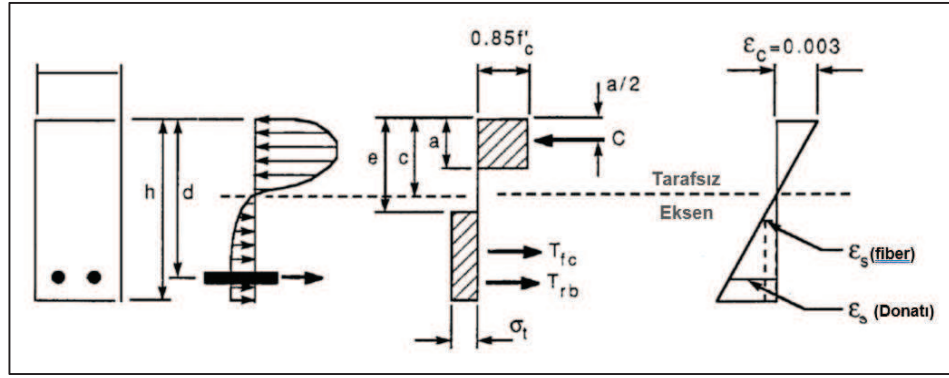
Şekil 3.1’de, geleneksel liffsiz beton ve UYPLB ile üretilmiş betonarme bir enkesite ait gerilme durumları görülmektedir. İki blok arasındaki fark, çekme bölgesindeki gerilme bloğunun hesaba katılması ve eşdeğer gerilme bloğunun uzunluğudur. Enkesitin eğilme momenti taşıma kapasitesinin (nominal moment) hesabında kullanılan bu yaklaşım, beton basınç bölgesindeki gerilme dağılımının betonun basınç dayanımına bağlı değişim göstermesi ve çekme gerilmesi dağılımının Şekil 3.1’de gösterilenden daha karmaşık olması nedeniyle yaklaşık sonuç vermektedir. Enkesitin eğilme kapasitesinin daha kesin elde edilmesi istendiğinde, lifli betonun basınç ve çekme bölgesinde gerçek *gerilme-şekildeğiştirme* bağıntıları kullanılarak *moment-eğrilik* analizinin yapılması gerekmektedir. Bu analizin yapılabilmesi için prizma boyutunda elemanlar kullanarak (100x100x400 mm gibi)

ilave malzeme testleri ve çekme bölgesindeki çatlak davranışının belirlenmesi gerekmektedir. JSCE (2008), AFGC (2013) ve Fehling vd. (2014)'te betonun çekme bölgesindeki gerilme bloğunun belirlenmesi ile ilgili farklı test prosedürleri sunulmuştur. Her ne kadar ayrıntılı *moment-eğrilik* analizine dayalı sonuçların daha kesin olduğu bilinse de tasarım uygulamaları için daha basit yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 3.1: Geleneksel lifsiz beton ve UYPLB ile üretilmiş betonarme bir enkesite ait şekil değiştirme profili ve gerilme durumları (Bae vd., 2016)

ACI 544.4R-88 (2009)'da, çelik lifli geleneksel beton ile üretilmiş betonarme kirişlerin eğilme momenti kapasitelerinin hesabı için literatürde yer alan çalışmalar değerlendirilerek, ACI 318 (2008)'deki tasarım esasları ile uyumlu bir yeni bir yaklaşım önerilmiştir (Şekil 3.2). Önerilen yaklaşım Henager ve Doherty (1976)'daki temel tasarım varsayımlarını esas almaktadır. ACI 544'te tek donatılı betonarme kirişlerin eğilme momenti kapasitesi (nominal moment), çekme donatısının aktığı varsayımı altında (3.1) ve (3.3) bağıntılarından yararlanarak doğrudan belirlenebilmektedir. İlgili yönetmelikte, en dış beton basınç lifindeki maksimum birim şekil değiştirme değeri $\epsilon_c = 0.003$ esas alınmıştır. Buna karşın, bu değer güvenli tarafta sonuç vereceği ve %1.0-%3.0 arasında lif oranına sahip elemanlar için $\epsilon_c = 0.004$ alınabileceği belirtilmiştir.



Şekil 3.2: Çelik lif içeren betonarme kirişlerin tasarıma esas şekildeğiştirme ve gerilme durumları (ACI 544.4R-88, 2009)

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) + \sigma_t b (h - e) \left(\frac{h}{2} + \frac{e}{2} - \frac{a}{2} \right) \quad (3.1)$$

$$\sigma_t = 0.00772 (l / d_f) \rho_f F_{be} \quad (\text{MPa}) \quad (3.2)$$

$$e = [\varepsilon_s(\text{fibers}) + 0.003] c / 0.003 \quad (3.3)$$

Burada,

σ_t : lifli betonun çekme dayanımını,

l : çelik lifin boyunu,

d_f : çelik lifin çapını,

ρ_f : hacimsel çelik lif oranını,

F_{be} : çelik lifin karakteristiğine bağlı olarak 1.0-1.2 arasında değişen aderans katsayısını, (kancalı çelik lifler için $F_{be} = 1.2$, düz lifler için $F_{be} = 1.0$ alınabilmektedir.)

a : eşdeğer dikdörtgen bloğun derinliğini ($a = \beta_1 * c$), (β_1 katsayısı, 30 ile 100 MPa arasındaki beton basınç dayanımları için 0.85-0.65 arasında interpolasyon yapılarak hesaplanabilir, 100 MPa üzerindeki basınç dayanımları için $\beta_1 = 0.65$ değeri alınmaktadır.)

b : kirişin enkesit genişliğini,

c : tarafsız eksen derinliğini,

d : en dış beton basınç lifinden donatı merkezine olan etkin yüksekliği,

e : en dış beton basınç lifinden çekme gerilmesi bloğunun üst sınırına olan uzaklığı,

ε_s : çekme donatısındaki birim şekildeğiştirme değerini,

- ε_c : en dış beton basınç lifindeki birim şekildeğiştirme değerini,
 f_c' : lifli betonun basınç dayanımını,
 f_y : çekme donatısının akma dayanımını,
 A_s : çekme donatısının enkesit alanını,
 h : kiriş enkesit yüksekliğini ifade etmektedir.

Imam vd., (1995) ve Imam vd., (1997)'de, çelik lif içeren YDLB ile üretilmiş betonarme kirişlerin eğilme momenti kapasiteleri, ACI 544'te önerilen yaklaşım esas alınarak ve bazı uyarlamalar yapılarak belirlenmiştir. Çalışmada, YDLB'un aderans dayanımı geleneksel betona göre daha fazla olduğundan lifli betonun çekme dayanımı σ_t için önerilen (3.2) bağıntısındaki 0.00772 katsayısı değiştirilmiştir. ACI 544'teki ilgili katsayı, beton ile çelik lif arasındaki aderans gerilmesinin $\tau_f = 2.3$ MPa değerini esas almaktadır. Yazarların çalışmasında YDLB için bu değer $\tau_f = 4.15$ MPa olarak belirlenmiş ve lifli betonun çekme dayanımı (3.4) ve (3.5) bağıntılarında verildiği formda basitleştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşım ile yüksek dayanımlı ve çelik lif içeren betonarme kirişlerin eğilme momenti kapasitesi, ACI 544'te verilen birim şekildeğiştirme sınırları ve gerilme durumu esas alınarak belirlenmektedir (Şekil 3.2).

$$\sigma_t = 2F \quad (\text{MPa}) \quad (3.4)$$

$$F = \frac{L_f}{D_f} V_f d_f \quad (3.5)$$

Burada,

- σ_t : lifli betonun çekme dayanımını,
 L_f : çelik lifin boyunu,
 D_f : çelik lifin çapını,
 V_f : hacimsel çelik lif oranını ($\rho_f/100$)
 d_f : çelik lifin aderans katsayısını ifade etmektedir.
 (kancalı lifler için $d_f = 1.0$, dalgalı lifler için $d_f = 0.9$, düz lifler için $d_f = 0.5$)

Beshara vd., (2012)'de, YDLB ile üretilmiş betonarme kirişlerin eğilme momenti kapasitelerinin hesabı için, Lim vd., (1987)'de geleneksel normal dayanımlı

lifli betonun çekme testlerinden elde edilen çekme dayanımına ait (3.6) bağıntısı esas alınmıştır.

$$f_{pp} = 2\eta_{lt}\eta_{ot}v_f(l_f/\Phi)\tau_u \quad (3.6)$$

Burada,

f_{pp} : lifli betonun basınç dayanımını,

η_{lt} : lifli betonun çekme dayanımında lif boyuna ait etkinlik çarpanını,

η_{ot} : lifli betonun çekme dayanımında lif yönelmesine ait etkinlik çarpanını,

V_f : hacimsel çelik lif oranını,

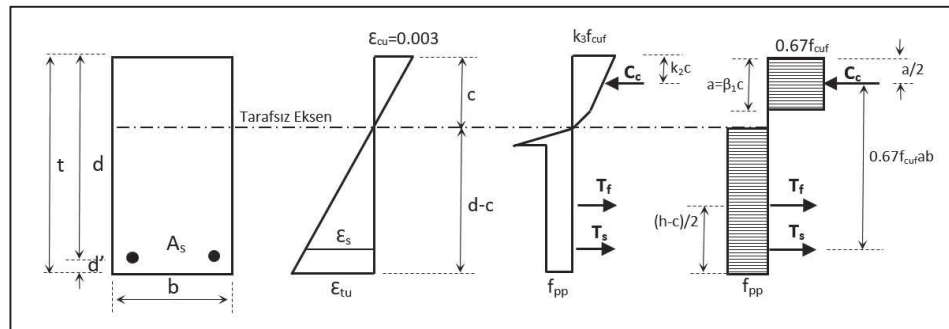
(l_f / Φ) : çelik lifin en/boy oranını,

τ_u : lifli betonun aderans dayanımını ifade etmektedir.

Bir seri deneysel çalışmadan elde edilen veriler ışığı altında ($\eta_{li} = 0.5$, $\eta_{oi} = 0.41$ ve $\tau_u = 4$ MPa), YDLB'un çekme dayanımı (3.7) bağıntısı şeklinde basitleştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşım ile betonarme kirişlerin eğilme momenti kapasitesi Şekil 3.3'teki gerilme durumu esas alınarak belirlenmektedir. Bu hesap modelinde, eşdeğer gerilme bloğu için beton basınç dayanımı çarpanı 0.85 yerine 0.67 kullanılmıştır (Şekil 3.3). Ayrıca, eşdeğer gerilme bloğunun derinliği ($\beta_1 = a/c$), (3.8) bağıntısı ile hesaplanmaktadır.

$$f_{pp} = 1.64\nu_f(l_f/\Phi) \quad (\text{MPa}) \quad (3.7)$$

$$\beta_1 = 1.05 - 0.05(f_{cut}/6.9) \quad (0.85 \geq \beta_1 \geq 0.65) \quad (3.8)$$



Şekil 3.3: YDLB kirişe ait şekildeğiştirme ve gerilme durumları (Beshara vd., 2012)

Khalil ve Tayfur (2013)'te, Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) ile üretilmiş betonarme kirişlere ait eğilme momenti kapasitesinin belirlenmesinde, normal dayanımlı lifli betondaki çelik liflerin yönelmesini, boyunu ve aderans karakteristiklerini gözönüne alan Hannant (1978)'deki çekme dayanımı bağıntısı (3.9) esas alınmıştır.

$$\sigma_c = 2\eta_o\eta_b\eta_l V_f \tau_f (l_f/d_f) \quad (\text{MPa}) \quad (3.9)$$

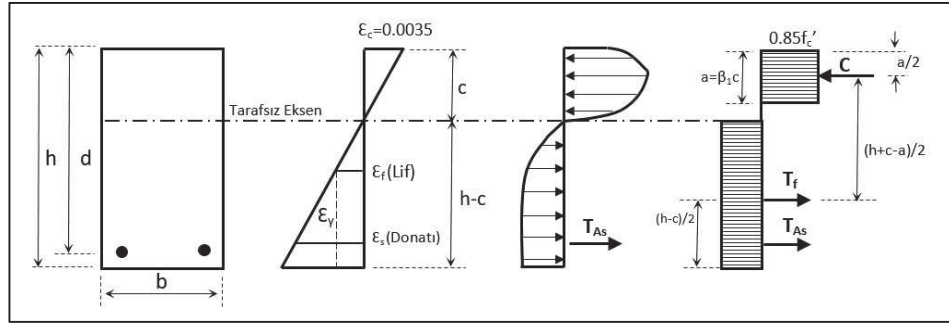
Burada,

- σ_c : çelik lifli betonun çekme dayanımını,
- η_o : çelik liflerin yönelmesi ile ilişkili etkinlik çarpanını,
- η_b : çelik liflerin aderansı ile ilişkili etkinlik çarpanını,
- η_l : çelik liflerin uzunluğu ile ilişkili etkinlik çarpanını,
- V_f : hacimsel çelik lif oranını,
- (l_f / d_f) : çelik lifin en / boy oranını,
- τ_f : çelik lif ile betona arasındaki aderans dayanımını ifade etmektedir.

Yazarlar tarafından yapılan deneysel incelemelerden elde edilen veriler ışığı altında ($\eta_b = 0.86$, $\eta_o = 0.41$ ve $\eta_l = 1.2$) ve aderans gerilmesi (τ_f) olarak (3.10) bağıntısı (Henager ve Doherty, 1976) kullanılarak, UYPLB'un çekme dayanımı (3.11) bağıntısında verilen hale dönüşmüştür. Geliştirilen yaklaşım ile betonarme kirişlerin eğilme momenti kapasitesi, Şekil 3.4'deki şekiştirme ve gerilme durumu esas alınarak belirlenmektedir. Burada en dış beton basınç lifindeki maksimum birim şekil değiştirme değeri $\varepsilon_c = 0.0035$ esas alınmıştır. Ayrıca, eşdeğer gerilme bloğunun derinliği $\beta_1 (a/c)$, 0.65 değerinden küçük olmamak koşulu ile 30 MPa üzerindeki her 7 MPa'lık basınç dayanımı için 0.05 oranında azaltılmaktadır.

$$\sigma_c = 0.85 V_f \tau_f (l_f/d_f) \quad (\text{MPa}) \quad (3.10)$$

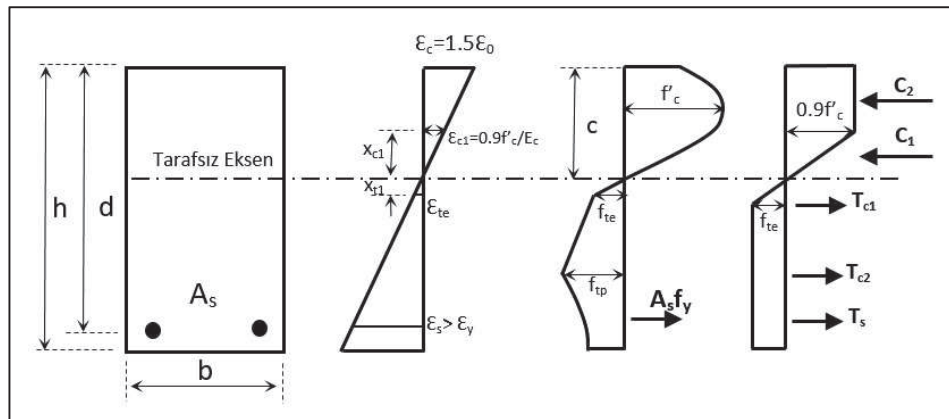
$$\tau_f = 0.66 \sqrt{f'_c} \quad (\text{MPa}) \quad (3.11)$$



Şekil 3.4: UYPLB ile üretilmiş tek donatılı bir kiriş enkesitine ait şekildeğiştirme ve gerilme durumları (Khalil ve Tayfur, 2013)

Al-Hassani vd., (2015)'te, çelik lif içeren Reaktif Pudra Betonu (RPB) ile üretilmiş betonarme kirişlere ait eğilme momenti kapasitesinin belirlenmesinde, yazarlar tarafından daha önce yapılan deneysel sonuçlar kullanılmış ve Şekil 3.5'teki gerilme durumu esas alınmıştır. Önerilen hesap modelinde, boyuna donatıdaki pekleşme durumu ihmal edilmiş ve en dış beton basınç lifindeki maksimum birim şekildeğiştirme değeri olarak $\varepsilon_{cu} = 1.5\varepsilon_{co}$ esas alınmıştır.

Çalışmada, çelik lif içeren kiriş enkesitlerinin çekme davranışı *bi-linear* gerilme bloğu şeklinde tanımlanmış ve lifli betonun çekme dayanımı (3.12) bağıntısı ile hesaplanmıştır. (3.12) bağıntısından görüleceği üzere, çelik lifli RPB'na ait çekme dayanımının belirlenmesinde lif tipinin (kancalı, kancasız, burgulu gibi) ve lif boyutlarının etkisi dikkate alınmamaktadır. Bunun nedeni, ilgili çalışmada farklı hacimsel oranlarda tek tip mikro lifin kullanılmış olmasıdır. Çelik lifli RPB ile üretilen elemanların eğilme kapasitelerinin belirlenmesindeki ilgili parametreler, deneysel sonuçlarla uyumlu bir sonuç denkleminin yakıştırılması şeklinde olduğu görülmektedir (3.24-3.26) (Al-Hasani vd., 2015).



Şekil 3.5: Tek donatılı bir RPB kiriş enkesitine ait şekildeğiştirme ve gerilme durumları (Al-Hasani vd., 2015)

$$f_{te} = 0.0243(f_c') + 0.0243(V_f) \quad (3.12)$$

Burada,

f_{te} : çelik lifli betonun çekme dayanımını,

V_f : hacimsel çelik lif oranını (%),

f_c' : lifli betonun basınç dayanımını ifade etmektedir.

Çalışmada, çelik lifli RPB ile üretilen kirişlerin eğilme momenti kapasitesinin hesabında kullanılacak basınç ve çekme bölgesindeki kuvvetler (C ve T) için (3.13-3.26) bağıntıları elde edilmiştir (Şekil 3.5).

$$C = C_1 + C_2 \quad (3.13)$$

$$C_1 = 0.45 f_c' b x_{c1} \quad (3.14)$$

$$C_2 = 0.9 f_c' b (c - x_{c1}) \quad (3.15)$$

$$T = T_{c1} + T_{c2} + T_s \quad (3.16)$$

$$T_{c1} = 0.5 f_{te} b x_{t1} \quad (3.17)$$

$$T_{c2} = f_{te} b (h - c - x_{t1}) \quad (3.18)$$

$$T_s = A_s f_y \quad (3.19)$$

$$x_{c1} = \frac{\varepsilon_{c1}}{\varepsilon_{cu}} c \quad (3.20)$$

$$x_{t1} = \frac{\varepsilon_{te}}{\varepsilon_{cu}} c \quad (3.21)$$

$$\varepsilon_{c1} = \frac{0.9 f_c'}{E_c} \quad (3.22)$$

$$\varepsilon_{cu} = 1.5 \varepsilon_o \quad (3.23)$$

$$E_c = 113.43(f_c') + 31126.74 \quad (3.24)$$

$$\varepsilon_o = 1.17 \times 10^{-5}(f_c') + 4.59 \times 10^{-4}(V_f) + 1.92 \times 10^{-3} \quad (3.25)$$

$$\varepsilon_{te} = 2.17 \times 10^{-5}(f_{te}) + 1.75 \times 10^{-5} \quad (3.26)$$

Burada,

- b : kiriş genişliğini,
- h : kiriş yüksekliğini,
- c : tarafsız eksen derinliğini,
- ε_{cu} : lifli betona ait maksimum birim şekildeğiştirme değerini,
- ε_o : lifli betonda f_c ' basınç dayanımına karşı gelen birim şekildeğiştirme değerini,
- ε_e : çekme bölgesindeki ilk çatlağa karşı gelen çekme birim şekildeğiştirme değerini,
- E_c : lifli betonun elastisite modülünü ifade etmektedir.

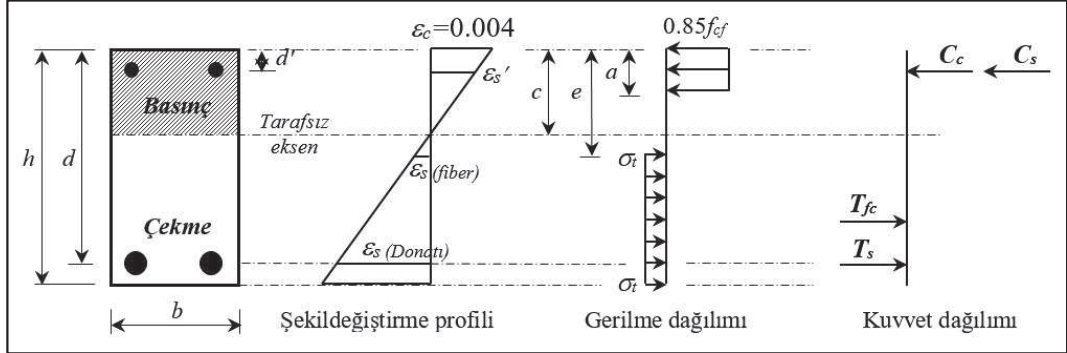
3.1 UYPLB ile Üretilmiş Betonarme Kirişlerin Eğilme Momenti Kapasitesinin Hesabı için Sayısal Bir Yöntem Önerisi

Bu çalışma kapsamında Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) ile üretilmiş betonarme kirişlere ait eğilme momenti kapasitesinin teorik olarak belirlenebilmesi için, ACI 544.4R-88 (2009)'da geleneksel lifli beton için önerilen yaklaşım üzerinde bazı uyarlamalar yapılmış ve deneysel sonuçlarla uyumlu bir hesap modeli oluşturulmuştur.

ACI 544'te en dış beton basınç lifindeki maksimum birim şekildeğiştirme değeri $\varepsilon_c = 0.003$ esas alınmasına karşın, %1.0-%3.0 arasındaki çelik lif oranına sahip elemanlar için $\varepsilon_c = 0.004$ alınabileceği belirtilmiştir. Buna paralel olarak, betonun birim şekildeğiştirme kapasitesine ait 0.004 değerinin, çalışma kapsamında deneysel olarak incelenen kiriş elemanlara yerleştirilen şekildeğiştirme ölçer (strain-gauge) sonuçları ile daha uyumlu olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, önerilen hesap yöntemine ait şekildeğiştirme profilinde $\varepsilon_c = 0.004$ değeri esas alınmıştır. Enkesitteki çekme ve basınç donatılarına ait kuvvetlerin belirlenmesinde, ilgili denge durumuna karşı gelen birim şekildeğiştirmeler ve bunlara karşı gelen gerilmeler kullanılmıştır.

Önerilen yaklaşım ile UYPLB'lu betonarme kirişlerin eğilme momenti kapasitesi (nominal eğilme momenti), Şekil 3.6'da verilen şekildeğiştirme profili ve gerilme durumu için denge denklemlerinden yararlanılarak belirlenmektedir.

Enkesitin çekme bölgesindeki eşdeğer çekme gerilmesi değeri, çelik liflerin yönelmesini, çelik liflerin en/boy oranını ve aderans karakteristiklerini gözönüne alan (3.27) bağıntısı ile hesaplanmaktadır (Hannant, 1978).



Şekil 3.6: UYPLB ile üretilmiş betonarme enkesite ait şekildeğiştirme profili ve gerilme durumu

$$\sigma_t = 2\eta_o\eta_b\eta_l V_f \tau_f (l_f/d_f) \quad (\text{MPa}) \quad (3.27)$$

$$e = [\varepsilon_s(\text{fiber}) + 0.003] c / 0.003 \quad (3.28)$$

Burada,

- σ_t : lifli betonun çekme dayanımını,
- a : eşdeğer dikdörtgen bloğun derinliğini ($a = \beta_1 * c$),
(UYPLB ile üretilmiş elemanların basınç dayanımları 100 MPa üzerinde olduğundan $\beta_1 = 0.65$ alınabilir.)
- b : kiriş enkesit genişliğini,
- c : tarafsız eksen derinliğini,
- d : en dış beton basınç lifinden donatı merkezine olan etkin yüksekliği,
- e : en dış beton basınç lifinden çekme gerilmesi bloğunun üst sınırına olan uzaklığı,
- h : kiriş enkesit yüksekliğini,
- l_f : çelik lifin boyunu,
- d_f : çelik lifin çapını,
- V_f : hacimsel çelik lif oranını,
- η_o : çelik liflerin yönelmesi ile ilişkili etkinlik çarpanını ($\eta_o = 0.41$),
- η_b : çelik liflerin aderansı ile ilişkili etkinlik çarpanını ($\eta_b = 0.86$),

- η_l : çelik liflerin uzunluğu ile ilişkili etkinlik çarpanını,
(kancalı çelik lifler için $\eta_l = 1.2$, kısa düz lifler için $\eta_l = 1.0$ alınabilir.)
- ε_s : çekme donatısındaki birim şekildeğiştirme değerini,
- ε_s' : basınç donatısındaki birim şekildeğiştirme değerini,
- ε_s (fiber) : eşdeğer çekme gerilme bloğunun başlamasına karşı gelen birim şekildeğiştirme değerini,
- ε_c : en dış beton basınç lifindeki birim şekildeğiştirme değerini,
- f_{cf} : lifli betonun basınç dayanımını,
- τ_f : çelik lif ile betona arasındaki aderans dayanımını ifade etmektedir.

(3.27) bağıntısı ile tanımlanan çekme dayanımının belirlenmesinde, çelik liflerin yönelmesini ve aderans karakteristiklerini temsil eden η_b ve η_o katsayıları sırasıyla 0.86 ve 0.41 alınmıştır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, bu değerlerin kirişin normal dayanımlı, yüksek dayanımlı veya ultra yüksek dayanımlı olmasından bağımsız olarak çelik liflerin karakteristiğine bağlı olduğu görülmüştür.

Bununla birlikte, lifli betonun çekme dayanımını doğrudan etkileyen aderans gerilmesi (τ_f), büyük ölçüde beton ile çelik lif arasındaki kayma gerilmelerine, karışımı oluşturan agregaya ve iç-yapıdaki boşluk oranına bağlı olduğundan gözönüne alınan betonun karışımı önem arz etmektedir. ACI 544'te geleneksel çelik lifli betonlar için bu değer $\tau_f = 2.30$ MPa alınmıştır. Bununla birlikte, geleneksel betona göre karışımda daha ince malzemenin kullanıldığı ve boşluk oranının daha az olduğu YDLB'lar için $\tau_f = 4.15$ MPa değeri kullanılmıştır (Imam vd. 1997). UYPLB'un boşluksuz iç-yapısının yanısıra karışıma eklenen silis dumanının da katkısıyla bu değerin, 3.0 ile 8.3 MPa arasında alınabileceği belirtilmektedir (Imam vd., 1997; Khalil ve Tayfur, 2013; Hannat, 1978). Bu çalışma kapsamında incelenen betonarme kirişlerin deneysel sonuçları ile uyumlu olacak şekilde parametrik bir araştırma yapılmış ve kullanılan UYPLB karışımına ait aderans gerilmesi için $\tau_f = 7$ MPa değerinin uygun olduğu belirlenmiştir.

3.2 Test Kirişlerinin Eğilme Momenti Kapasitelerinin Sayısal Yöntemlerle Belirlenmesi ve Yöntemlerin Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında deneysel olarak incelenen betonarme kirişlerin eğilme momenti kapasiteleri, önerilen hesap yöntemi ve ayrıca, literatürde çelik lif içeren yüksek ve ultra yüksek dayanımlı betonlar için önerilen dört farklı yaklaşım ile belirlenmiştir. Her bir hesap yöntemi için elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak teorik yöntemlerin tasarım uygulamalarında kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Detayları Bölüm 2.2’de verilen ve farklı donatı oranları özelliklerine sahip betonarme kirişlerin enkesit boyutları, boyuna donatıları ve bunlara ait mekanik özellikler, beton basınç dayanımları ile karışımında kullanılan çelik liflerin özellikleri Tablo 3.1’de özetlenmiştir.

UYPLB ile üretilmiş betonarme kirişlere ait eğilme momenti kapasitelerinin önerilen yöntem ile hesabı için bir bilgisayar programı oluşturulmuştur. Hazırlanan programda, (3.27) bağıntısı yardımıyla UYPLB’un çekme dayanımı hesaplandıktan sonra tarafsız eksen derinliği c değeri tahmin edilmektedir. Şekil 3.6’daki şekildeğiştirme profili ve gerilme durumuna bağlı olarak basınç ve çekme bölgesindeki kuvvetlerin dengesi kontrol edilmektedir. Denge denkleminin sağlanmaması halinde tarafsız eksen değiştirilerek yeni bir denge durumu yazılmaktadır. Son olarak, yatay dengenin sağlandığı durum için tarafsız eksene göre moment alınarak enkesitin eğilme momenti taşıma kapasitesi hesaplanmaktadır. Hazırlanan bu program, karşılaştırmalarda kullanılmak amacıyla gözönüne alınan diğer teorik hesap modelleri için de kodlanmıştır.

En az iki farklı özellikte çelik liflerin kullanıldığı karma lifli UYPLB kirişlere ait kapasitelerin teorik hesabı ile ilgili literatürde bir yaklaşıma rastlanmamıştır. Bu nedenle, çalışma kapsamında ele alınan karma lifli test kirişlerine ait moment kapasitelerinin teorik olarak belirlenmesinde, lifli betonun çekme dayanımını (σ_l) belirleyen parametreler (lif boyu l_f , lif çapı d_f ve lifin etkinlik çarpanı η_l) karışımındaki çelik liflerin hacimsel oranı ile orantılı olarak tekrar hesaplanmıştır. Örneğin, %1.0 hacimsel oranında 13/0.16 mikro ve %0.5 hacimsel oranında 60/0.75 mm makro

liflerin kullanıldığı UYPLB karışımı için çekme dayanımını belirleyen ilgili parametreler aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$l_f = 13 * 0.67 + 60 * 0.33 = 28.51 \text{ mm}$$

$$d_f = 0.16 * 0.67 + 0.75 * 0.33 = 0.3547 \text{ mm}$$

$$\eta_l = 1.0 * 0.67 + 1.2 * 0.33 = 1.066$$

Tablo 3.1: Çelik lifli/lifsiz betonarme test kirişlerinin enkesit, boyuna donatı ve lif özellikleri

Grup No	Kiriş Kodu	d (mm)	A_s (mm ²)	A_s' (mm ²)	f_c' (MPa)	f_y (MPa)	f_{su} (MPa)	f_y' (MPa)	f_{su}' (MPa)	Çelik Lif
1 (Lifsiz, çekme donatılı)	1-A	223	308	---	137	469	590	---	---	Yok
	1-B	220	628	---	133	462	654	---	---	
	1-C	218	904	---	135	491	606	---	---	
	1-D	220	2x628	---	146	468	661	---	---	
2 (Lifsiz, basınç donatılı)	2-A	223	308	157	149	458	588	473	554	Yok
	2-B	220	628	308	145	462	654	449	571	
	2-C	218	904	402	139	492	606	489	596	
	2-D	220	2x628	628	152	468	657	460	659	
3 (Tekil lifli, çekme donatılı)	3-A	223	308	---	157	453	567	---	---	Tekil %1.5(13/0.16)
	3-B	220	628	---	167	463	613	---	---	
	3-C	218	904	---	157	456	593	---	---	
	3-D	220	2x628	---	166	465	653	---	---	
4 (Tekil lifli, basınç donatılı)	4-A	223	308	157	148	453	567	464	554	Tekil %1.5(13/0.16)
	4-B	220	628	308	164	467	653	449	571	
	4-C	218	904	402	160	451	591	473	584	
	4-D	220	2x628	628	161	462	650	462	651	
5 (Karma lifli, çekme donatılı)	5-A	223	308	---	169	445	564	---	---	Karma %1.0(13/0.16) %0.5(60/0.75)
	5-B	220	628	---	150	471	651	---	---	
	5-C	218	904	---	164	460	586	---	---	
	5-D	220	2x628	---	167	471	651	---	---	
6 (Karma lifli, basınç donatılı)	6-A	223	308	157	163	445	564	464	554	Karma %1.0(13/0.16) %0.5(60/0.75)
	6-B	220	628	308	166	469	654	447	562	
	6-C	218	904	402	164	460	586	473	584	
	6-D	220	2x628	628	162	455	565	455	565	

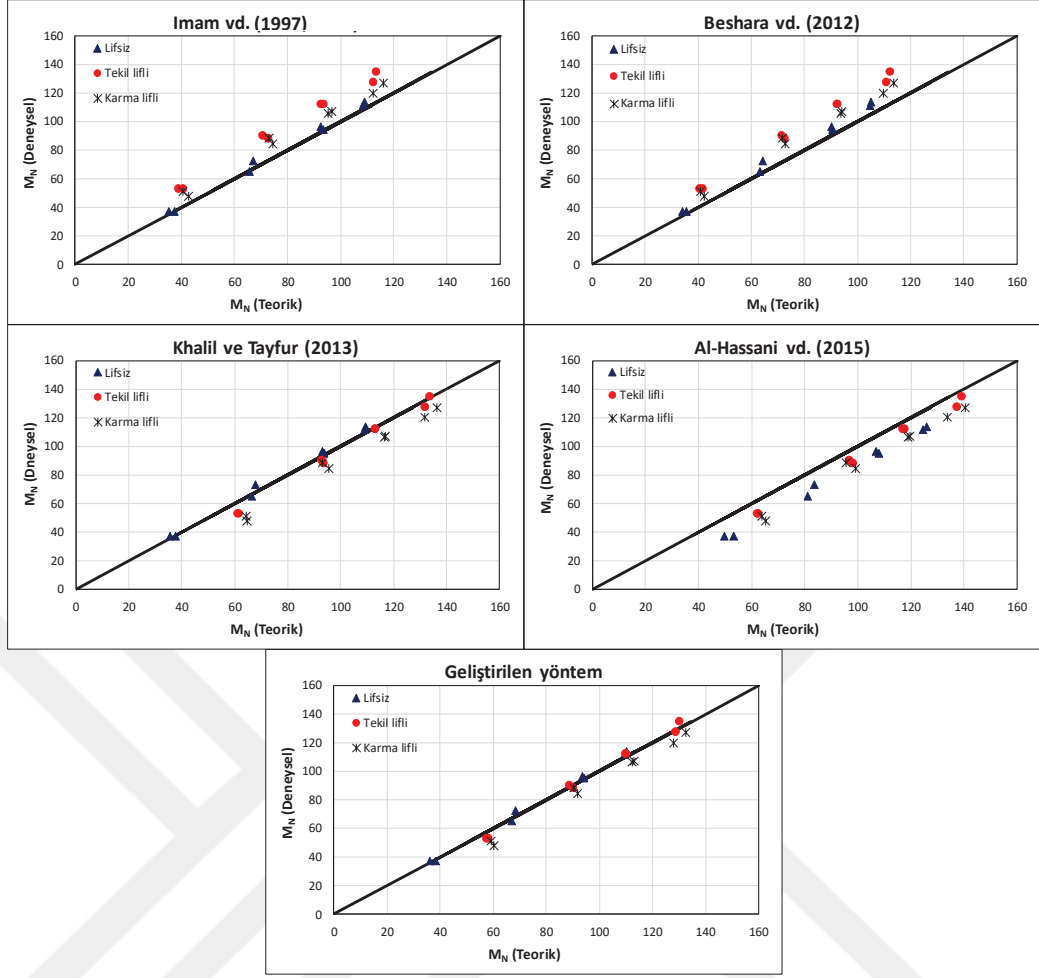
UYPLB ile üretilmiş test kirişlerinin eğilme momenti kapasiteleri, yukarıda esasları verilen dört farklı yöntem ve önerilen yaklaşım ile hesaplanmış Tablo 3.2’de verilmiştir. Ayrıca, sayısal yöntem sonuçları deneysel sonuçlara oranlanarak, teorik yöntemlerin deneysel sonuçlara yakınlıkları oransal olarak sunulmuştur (Tablo 3.2). Sonuçların istatistiksel değerlendirmesi de yapılarak Tablo 3.3’te sunulmuştur. Sayısal yöntemlerin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Şekil 3.7’de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Tablo 3.2: Farklı hesap modelleri için teorik eğilme moment kapasiteleri ve deneysel sonuçlara oranları

Grup No	Deneysel Eğilme Momenti Kapasitesi (M_n^{exp}) (kNm)	Teorik Eğilme Momenti Kapasitesi (M_n^{teo})									
		Imam vd. (1997)		Beshara vd. (2012)		Khalil ve Tayfur (2013)		Al-Hasani vd. (2015)		Önerilen model	
		M_n^{teo} (kNm)	$\frac{M_n^{teo}}{M_n^{exp}}$	M_n^{teo} (kNm)	$\frac{M_n^{teo}}{M_n^{exp}}$	M_n^{teo} (kNm)	$\frac{M_n^{teo}}{M_n^{exp}}$	M_n^{teo} (kNm)	$\frac{M_n^{teo}}{M_n^{exp}}$	M_n^{teo} (kNm)	$\frac{M_n^{teo}}{M_n^{exp}}$
1-A	37.50	35.17	0.94	34.18	0.91	35.69	0.95	49.99	1.33	36.18	0.96
1-B	65.52	65.43	1.00	63.26	0.97	66.36	1.01	81.16	1.24	67.24	1.03
1-C	96.36	92.48	0.96	90.02	0.93	93.04	0.97	106.95	1.11	93.58	0.97
1-D	111.61	108.19	0.97	104.91	0.94	108.97	0.98	124.68	1.12	109.75	0.98
2-A	37.38	37.28	1.00	35.64	0.95	37.91	1.01	53.53	1.43	38.48	1.03
2-B	73.03	67.05	0.92	64.42	0.88	67.93	0.93	83.86	1.15	68.75	0.94
2-C	94.99	93.28	0.98	90.43	0.95	93.83	0.99	108.04	1.14	94.36	0.99
2-D	113.68	108.78	0.96	105.21	0.93	109.60	0.96	126.13	1.11	110.41	0.97
3-A	52.59	39.07	0.74	41.02	0.78	61.91	1.18	62.68	1.19	58.07	1.10
3-B	89.78	70.89	0.79	71.60	0.80	93.21	1.04	97.03	1.08	89.18	0.99
3-C	111.91	92.81	0.83	92.79	0.83	113.44	1.01	117.33	1.05	110.36	0.99
3-D	134.35	113.57	0.85	112.50	0.84	133.97	1.00	139.50	1.04	130.402	0.97
4-A	52.77	40.82	0.77	41.98	0.80	61.57	1.17	63.07	1.20	58.75	1.11
4-B	87.70	72.80	0.83	72.67	0.83	93.88	1.07	98.61	1.12	90.38	1.03
4-C	111.71	93.60	0.84	92.58	0.83	113.46	1.02	118.05	1.06	110.33	0.99
4-D	127.38	112.63	0.88	111.16	0.87	132.13	1.04	137.60	1.08	129.04	1.01
5-A	51.31	40.47	0.79	40.84	0.80	64.47	1.26	64.10	1.25	59.35	1.16
5-B	88.61	72.81	0.82	71.85	0.81	93.17	1.05	95.86	1.08	90.44	1.02
5-C	106.29	95.10	0.89	93.79	0.88	116.48	1.10	118.93	1.12	112.508	1.06
5-D	127.24	116.08	0.91	113.69	0.89	136.58	1.07	140.59	1.10	132.67	1.04
6-A	48.15	42.49	0.88	42.13	0.87	64.63	1.34	65.26	1.36	60.38	1.25
6-B	84.82	74.45	0.88	72.95	0.86	95.75	1.13	99.21	1.17	91.85	1.08
6-C	107.23	96.51	0.90	94.20	0.88	116.76	1.09	119.83	1.12	113.05	1.05
6-D	120.18	112.25	0.93	109.75	0.91	131.94	1.10	133.98	1.11	128.26	1.07

Tablo 3.3: Teorik/deneysel eğilme momenti kapasitelerine ait istatistiksel sonuçlar

Parametre	Teorik / Deneysel Eğilme Momenti Kapasitesi (M_n)				
	Imam vd. (1997)	Beshara vd. (2012)	Khalil ve Tayfur (2013)	Al-Hasani vd. (2015)	Önerilen model
Ortalama	0.87	0.89	1.06	1.16	1.03
Ortanca değer	0.88	0.89	1.04	1.12	1.02
Standart	0.055	0.072	0.097	0.098	0.069
Varyans	0.0031	0.0052	0.0093	0.0097	0.0048



Şekil 3.7: Farklı hesap modelleri için elde edilen kapasitelerin karşılaştırılması

Literatürde YDLB'lar için önerilen Imam vd. (1997) ve Beshara vd. (2012)'deki hesap modellerinin lifsiz kirişlerin eğilme kapasitelerini belirli bir yaklaşıklıkla ($M_n^{teo} / M_n^{exp} = 0.91 \sim 1.00$) belirlemesine karşın, hacimsel olarak %1.5 oranında mikro (13/0.16 mm) ve karma (13/0.16 mm ve 60/0.75 mm) çelik lif bulunduran betonarme kirişlerin teorik kapasitelerinin belirlenmesinde oldukça yetersiz olduğu görülmektedir (Tablo 3.2-3.3 ve Şekil 3.7).

UYPLB ile üretilmiş betonarme kirişlerin eğilme kapasitesinin teorik hesabı için Khalil ve Tayfur (2013)'te geliştirilen hesap modelinin, lifsiz kirişlerin eğilme kapasitelerini oldukça iyi belirlediği ($M_n^{teo} / M_n^{exp} = 0.93 \sim 1.01$), buna karşın %1.5 oranında mikro lifin kullanıldığı kirişlerde bir miktar daha fazla sonuç verdiği ($M_n^{teo} / M_n^{exp} = 1.00 \sim 1.18$) görülmektedir (Tablo 3.2-3.3 ve Şekil 3.7). Karışımda karma lif kullanılması halinde bu fark daha da artmaktadır ($M_n^{teo} / M_n^{exp} = 1.07 \sim 1.34$). Bunun nedeni, çelik lif içeren UYPLB karışımlarına ait beton basınç dayanımları lifsiz

karşıma göre çok daha büyük olduğundan, bu yaklaşımla hesaplanan aderans dayanımı (τ_f) ile buna bağlı lifli betonun çekme dayanımının büyük değerler almasıdır.

Daha önce de belirtildiği üzere, tek tip çelik lif içeren çok sayıdaki betonarme kirişlerin istatistiksel sonuçlarını esas alan Al-Hasani vd. (2015)'deki hesap modelinin lifsiz, tekil ve karma lifli betonarme kirişlerin eğilme kapasitelerini sırasıyla %43, %20 ve %36'ya ulaşan oranda fazla belirlediği görülmektedir (Tablo 3.2-3.3 ve Şekil 3.7). Bu nedenle, ilgili hesap modelinin UYPLB'lu kirişlerin eğilme momenti kapasitelerinin teorik olarak belirlenmesinde uygun bir yaklaşım olmadığı düşünülmektedir.

Çalışma kapsamında deneysel incelemeleri yapılan UYPLB'lu test kirişlerinin sonuçları kullanılarak ve ACI 544'te verilen şekildeğiştirme ve gerilme durumları esas alınarak geliştirilen teorik hesap yönteminin sonuçlarına göre (Tablo 3.2-3.3 ve Şekil 3.7);

- Lifsiz betonarme kirişlerin eğilme kapasiteleri $M_n^{teo} / M_n^{exp} = 0.94\sim1.03$ arasında değişen oranlarda belirlenebilmiştir.
- %1.5 13/0.16 mm'lik tekil lif içeren kirişlerde ise $M_n^{teo} / M_n^{exp} = 0.97\sim1.11$ arasında değişen oranlarda belirlenebilmiştir.
- %1.0 oranında 13/0.16 mm'lik mikro ve %0.5 oranında 60/0.75 mm'lik makro lif içeren karma lifli kirişler için teorik eğilme momenti kapasitelerinin bir miktar fazla sonuç verdiği ($M_n^{teo} / M_n^{exp} = 1.02\sim1.25$) görülmektedir.
- Geliştirilen teorik hesap modeline ait ortalama ve ortanca (median) değerlerin deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu ve sayısal yöntemin %6.9'luk bir standart sapma değerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Sonuç olarak, önerilen yöntem ile farklı tipte çelik lif içeren / içermeyen ve farklı çekme / basınç donatılarına sahip kirişlerin eğilme momenti kapasitelerinin pratik olarak belirlenebildiği ve yöntemin literatürdeki diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada, kolay uygulanabilir Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) üretimi gerçekleştirilmiş ve bu betonu içeren betonarme kirişlerin eğilme davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, UYPLB'lu betonarme kirişlerin eğilme kapasitelerinin belirlenmesi için sayısal bir yöntem önerilmiş ve bu yöntemin sonuçları deneysel sonuçlar ve literatürdeki mevcut yaklaşımlar kullanılarak değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşama, kolay uygulanabilir ve eğilme davranışı bakımından uygun çelik lif içeriklerine sahip UYPLB karışımlarının belirlendiği malzeme çalışmasıdır. Bu aşamada yapılan incelemeler salt UYPLB içeren prizma numunelerin (100x100x4000 mm) eğilme testlerini içermektedir. Eğilme davranışı için etkin lif içeriğinin belirlenmesi amacıyla biri mikro (13/0.16), ikisi makro boyutta (30/0.55 ve 60/0.75) olmak üzere üç farklı lif tipi, tek başına (tekil) ve farklı oranlarda birleştirilerek (karma) UYPLB karışımlar hazırlanmıştır. Lifsiz ve farklı lif içeriklerine sahip UYPLB'lu toplam 18 adet prizma numunesi için ASTM C 1609'a uygun olarak dört noktalı eğilme testleri yapılmıştır. Eğilme davranışı için etkin lif içerikleri, testlerden elde edilen eğilme dayanımı ve tokluk değerlerine göre belirlenmiştir. Bununla birlikte, hazırlanan beton karışımlarının işlenebilirlikleri de değerlendirilmiştir.

Deneysel çalışmanın birinci aşamasının sonucunda;

- Standart kür koşulları ve standart karıştırıcılar ile işlenebilirliği yüksek ve 138 MPa ortalama basınç dayanımına sahip UYPLB üretilmiştir. Kendiliğinden yerleşen özellikte olan beton, kolaylıkla uygulanabilir bir nitelikte olmuştur.
- Eğilme davranışı ve işlenebilirlik bakımından etkin lif içerikleri olarak tekil lif için; %1.5 hacimsel oranda 13/0.16 mm mikro lif ile karma lif için; %1.0 oranında 13/0.16 mm mikro ve %0.5 oranında 60/0.75 mm makro lifler seçilmiştir.

Deneyisel çalışmanın ikinci aşaması, birinci aşamada belirlenen iki farklı çelik lif içeriği ile üretilen betonarme kirişlerin eğilme davranışlarının incelendiği yapısal eleman çalışmasıdır. Bu çalışma, çekme ve basınç donatısı oranları bakımından farklılıklar içeren 24 adet 150x250x2500 mm boyutlarında betonarme kiriş üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kirişlerde dört farklı çekme donatısı oranı kullanılmıştır. Bunların ikisi TS 500’de yer alan maksimum çekme donatısı oranı sınırının ($\rho = 0.02$) altında, diğer ikisi UYPLB’un yüksek basınç dayanımını kullanmak amacıyla bu sınırın üzerinde seçilmiştir. Bu çekme donatısı oranlarının yaklaşık yarısı kullanılarak basınç donatılı kirişler üretilmiştir. Ayrıca, salt çelik lifin eğilme davranışına olan etkisini inceleyebilmek için sadece tekil ve karma lif içeren (donatısız) kirişler de üretilmiştir. Kirişlerin dört noktalı eğilme testleri gerçekleştirilmiş ve eğilme davranışlarını değerlendirmek amacıyla, yük-düşey yerdeğiştirme davranışları, kırılma şekilleri, yerdeğiştirme süneklikleri, yük taşıma kapasiteleri, artık yük oranları, eğrilik süneklikleri, çatlamış kesit eğilme rijitlikleri, kullanılabilirlik ve taşıma gücü durumları için belirli düşey yerdeğiştirme değerlerindeki ($L/250$ ve $L/70$ yerdeğiştirmesi) maksimum çatlak genişlikleri ve çatlak dağılımları belirlenmiştir.

Deneyisel çalışmanın ikinci aşamasında aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır;

- Lifsiz kirişlerde donatıda akma sonrası rijitlik azalmakta ve hafif düzeyde pekleşme etkisi ile maksimum yüke ulaşılmaktadır. Maksimum yük sonrası tüm lifsiz kirişlerde kırılma (göçme) durumu beton ezilmesi ile gerçekleşmektedir.
- Sadece çelik lif içeren (donatısız) UYPLB’lu kirişlerde, ilk çatlama sonrası bir pekleşme etkisi gözlenmekte, maksimum yüke ulaşıldıktan sonra çekme bölgesindeki liflerin sıyrılması ve/veya kopması sonucunda kiriş yük taşıma kapasitesini tamamen kaybetmektedir. Bu kirişlerde, belirli yük kapasiteleri elde edilse de süneklikler donatılı kirişlere göre çok daha düşük olmaktadır.
- Çelik lifler ile donatının birlikte kullanıldığı UYPLB’lu betonarme kirişlerde, çekme bölgesindeki liflerin katkısıyla yük taşıma kapasitesi artmakta, lifler devreden çıktıktan sonra geleneksel donatı çekme gerilmelerini karşılamada devreye girmektedir. Böylece UYPLB’un basınç sünekliği de etkin olarak kullanılmaktadır. Lifli kirişlerde basınç bölgesindeki liflerin sağladığı

süneklik, beton ezilmelerine rağmen çok büyük dayanım azalmaları oluşmadan büyük yerdeğiştirme yapmasına olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte çekme bölgesindeki lifler küçük çatlakları sınırlamakta ve uzama şekildeğiştirmelerinin en büyük olduğu bölgede çatlakların birleşerek bir veya birkaç büyük çatlak oluşmasına sebep olmaktadır. Bu da yüksek donatı oranlarına sahip kirişlerde dahi kırılmaların donatı kopması ile gerçekleşmesine sebep olmaktadır.

- Lifsiz kirişlerde geleneksel betonarmede olduğu gibi, çekme donatısı oranı arttıkça yerdeğiştirme sünekliği azalmıştır. UYPLB’lu kirişlerde ise en büyük donatı oranına ($\rho = 0.043$) kadar yerdeğiştirme sünekliği artış eğilimi göstermiş, bu oranda ise bir miktar düşüş olduğu görülmüştür.
- Yerdeğiştirme süneklikleri, en düşük donatı oranına sahip olan UYPLB’lu kirişlerde ($\rho = 0.009$) lifsizlere göre %38-%61 oranında azalma gösterirken, yüksek donatı oranları için lifsiz kirişlere göre 1.42-4.36 kat arasında daha yüksek süneklikler elde edilmiştir. İncelenen kiriş boyutları için yerdeğiştirme sünekliği bakımından en etkin donatı oranı, basınç donatısına ve lif içeriğine bağlı olarak değişkenlik göstermekle birlikte genel olarak 0.02 ve üzeri oranların kullanılmasını göstermiştir.
- Basınç donatısı içeren UYPLB’lu kirişlerde süneklik oranları, salt çekme donatılı kirişlere göre genel olarak daha yüksek elde edilmiştir. Bu sonuç, çelik liflerin basınç donatısı için sargı etkisini sağlayabildiği ve etriye gereksinimini ortadan kaldırabilme potansiyelini göstermektedir.
- UYPLB’lu kirişlerde çekme bölgesindeki liflerin katkısıyla lifsiz kirişlere göre yük taşıma kapasitelerinde önemli artışlar (%12-%50) sağlanmıştır. Yük taşıma kapasitelerindeki en büyük artış, en düşük donatı oranına sahip kirişlerde ($\rho = 0.009$) gerçekleşmiş ve donatı oranı arttıkça liflerin sağladığı kapasite artışı azalım eğilimi göstermiştir.
- Tekil lif içeren UYPLB’lu kirişlerde, karma liflilere göre daha büyük kapasite artışı (%2-%11) sağlanmıştır. UYPLB’lu kirişlerde liflerin sağladığı beton sünekliği sayesinde maksimum yük sonrasında dayanım azalmaları olmasına rağmen önemli şekildeğiştirme kapasitesi bulunmaktadır.
- Tüm kirişlerde beklenildiği gibi, çekme donatısı oranı arttıkça çatlamış kesit eğilme rijitliği artmıştır. Eğilme rijitliği, lifsiz kirişlere göre tekil lif içeren

UYPLB'lu kirişlerde 1.15-2.15 kat, karma liflilerde ise 1.03-1.79 kat arasında artmıştır. Donatı oranı arttıkça liflerin eğilme rijitliğine katkısı azalma eğilimi göstermiştir.

- *Kullanılabilirlik* durumu için, tekil lif içeren UYPLB'lu kirişlerde oluşan çatlak sayısının ve genişliğinin karma lifli ve lifsiz kirişlere göre daha düşük olduğu görülmüştür. *Taşıma gücü* durumunda ise tüm UYPLB'lu kirişlerde çatlaklar bölgeleşerek tek bir büyük çatlak meydana getirmiş, lifsiz kirişlere göre çok büyük çatlak genişliği değerleri elde edilmiştir. Bu aşamada makro liflerin geniş çatlakları sınırlamada mikro liflere göre daha etkin olması nedeniyle karma lifli kirişler için daha küçük çatlak genişlikleri elde edilmiştir.
- Lifsiz olarak üretilen kirişlerde ilk beton ezilmesine karşılık gelen şekildeğştirmeler 0.0021-0.0038 arasında, UYPLB'lu kirişlerde ise 0.0015-0.0043 arasında elde edilmiştir. Ayrıca, UYPLB'lu kirişlerde maksimum yerdeğştirmeye karşılık gelen beton şekildeğştirmeleri ise 0.0034-0.096 arasında elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında deneysel incelemeleri yapılan test kirişlerinin sonuçları kullanılarak, ACI 544'te verilen esaslar çerçevesinde UYPLB'lu kirişlerin eğilme momenti kapasitelerinin hesabı için sayısal bir hesap yöntemi önerilmiştir.

- Önerilen yöntemde lif içeriğine bağlı olarak betonun çekme dayanımı gözönüne alınmakta ve çekme ve basınç gerilmeleri için basitleştirilmiş eşdeğer gerilme blokları kullanılarak eğilme momenti kapasitesi pratik olarak elde edilmektedir.
- Önerilen yöntemin farklı tipte çelik lif içeren/içermeyen ve farklı çekme/basınç donatılarına sahip kirişlerin eğilme momenti kapasitelerini (nominal eğilme momenti) deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olarak belirleyebildiği görülmüştür.
- Ayrıca, UYPLB'lu kirişlerin testlerinden elde edilen deneysel sonuçlar, literatürde önerilen bazı teorik hesap modellerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan istatistik değerdendirmeler sonucunda önerilen hesap yönteminin literatürdeki yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

5. KAYNAKLAR

Abbas, S., Soliman, A. M. and Nehdi, M. L. (2015). Exploring Mechanical and Durability Properties of Ultra-High Performance Concrete Incorporating Various Steel Fiber Lengths and Dosages. *Constr Build Mater*, 75, 429-441.

ACI Committee 544. (2009). Design Consideration for Steel Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.4R-88), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

ACI Committee 318. (2008). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary,” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

AFGC/SETRA. (2002). *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes*. Interim recommendations, Bagneux, France: SETRA.

AFGC. (2013). Recommendation: *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes, revised ed.* Association Française de Génie Civil; Service d’études techniques des routes et autoroutes.

Alaee, F. J. (2003). Retrofitting of Reinforced Concrete Beams with CARDIFRC. *J Compos Constr*, 7, 174.

Akçay, B. and Tasdemir, M. A. (2012). Mechanical Behaviour and Fibre Dispersion of Hybrid Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete. *Constr Build Mater*, 28, 287-293.

Al-Hassani, H. M., Khalil, W. I. and Danha, L. S. (2015). Prediction of The Nominal Bending Moment Capacity for Plain and Singly Reinforced Rectangular RPC Beam Sections. *Eng Tech J*, 33 (5), 1113-1130.

Ashour, S. A. and Wafa, F. F. (1993). Flexural Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams. *ACI Struct J*, 90 (3), 279-287.

ASTM C1609 / C1609M-12. (2012). Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C469 / C469M-14. (2014). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM C494 / C494M-15a. (2015). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Bache, H. H. (1981). Densified Cement Ultra-Fine Particle-Based Materials. *Proceedings of the 2nd international conference on superplasticizers in concrete*, Ottawa, Canada, 33.

Bae, B. I., Choi, H. K. and Choi, C. S. (2016). Flexural Strength Evaluation of Reinforced Concrete Members with Ultra High Performance Concrete. *Adv Mater Sci Eng*.

Beglarigale, A., Yalçinkaya, Ç. and Yazıcı, H. (2014). Autoclaved Reactive Powder Concrete: The Effects of Steel Micro-Fibers and Silica Fume Dosage on the Mechanical Properties. *Usak Univ J Mater Sci*, 1, 7-14.

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.

Beshara, F. B. A., Shaaban, I. G. and Mustafa, T. S. (2012). Nominal Flexural Strength of High Strength Fiber Reinforced Concrete Beams. *Arab J Sci Eng*, 37, 291-301.

Birchall, J. D., Howard, A. J. and Kendall, K. (1981). Flexural Strength and Porosity of Cements. *Nature*, 289, 388–390.

Canbolat, B. A., Parra-Montesinos, G. J. and Wight, J. K. (2005). Experimental Study on the Seismic Behavior of High-Performance Fiber Reinforced Cement Composite Coupling Beams. *ACI Struct J*, 102 (1), 159-166.

Dancygier, A. N. and Savir, Z. (2006). Flexural Behavior of HSFRC with Low Reinforcement Ratios. *Eng Struct*, 28, 1503–1512.

Farhat, F., Nicolaides, D., Kanellopoulos, A. and Karihaloo, B. (2007). High Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composite (CARDIFRC)-Performance and Application to Retrofitting. *Eng Fract Mech*, 74 (1-2), 151-167.

Federal Highway Administration. (2013). *Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community*. Publication No. FHWA-HRT-13-060, McLean, VA 22101-2296.

Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Leutbecher, T. and Frönlich, S. (2014). *Ultra-High Performance Concrete UHPC*, Betonkalender, Wilhelm Ernst & Sohn.

Graybeal, B. and Tanesi, J. (2007). Durability of an Ultrahigh-Performance Concrete. *ASCE J Mater Civil Eng*, 19 (10), 850-854.

Graybeal, B. A. (2008). Flexural Behavior of an Ultrahigh-Performance Concrete I-Girder. *J Bridge Eng*, 13 (6), 602–610.

Graybeal, B. A. (2011). *Ultra-High Performance Concrete, Federal Highway Administration Technical Report, FHWA-HRT-11-038*, McLean, VA.

Guan, Q., Zhang, P. and Xie, X. (2013). Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced High-Strength Concrete Beams. *Res J Appl Sci Eng Tech*, 6 (1), 1-6.

Habel, K. Denarie, E. and Brühwiler, E. (2007). Experimental Investigation of Composite Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete and Conventional Members. *ACI Struct J*, 104 (1).

Hannant, D. J. (1978). Fibre Cements and Fibre Concretes. *John Wiley and Sons*.

Henager, C. H. and Doherty, T. J. (1976). Analysis of Reinforced Fibrous Concrete Beams. Proceeding. *ASCE J Struct Div*, 102 (1), 177-188.

Imam, M., Vandewalle, L. and Mortelmans, F. (1995). Shear-Moment Analysis of Reinforced High Strength Concrete Beams Containing Steel Fibres. *Can J Civil Eng*, 22, 462-470.

Imam, M., Vandewalle, L., Mortelmans, F. and Van Gemert, D. (1997). Shear Domain of Fibre-Reinforced High-Strength Concrete Beams. *Eng Struct*, 19 (9), 738-747.

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 J*, 10 (1), 55-63.

Khalil, W. I. and Tayfur, Y. R. (2013). Flexural Strength of Fibrous Ultra High Performance Reinforced Concrete Beams. *ARPJ Eng Appl Sci*, 8 (3), 200-214.

Kim, D. J., Park, S. H., Ryu, G. S. and Koh, K. T. (2011). Comparative Flexural Behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with Different Macro Fibers. *Constr Build Mater*, 25, 4144-4155.

Lim, T.Y., Paramasivam, P. and Lee, S.L. (1987). Bending Behavior of Steel Fiber Concrete Beams. *ACI Struct J*, 84, 524–536.

Matte, V. and Moranville, M. (1999). Durability of Reactive Powder Composites: Influence of Silica Fume on The Leaching Properties of Very Low Water/Binder Pastes. *Cement Concrete Comp*, 21 (1), 1-9.

Naaman, A. E. (2002). Toughness, Ductility, Surface Energy and Deflection-Hardening FRC Composites. *Proceedings of the JCI international Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) - Application and Evaluation (DFRCC-02)*, Takayama, Japan, October, 33-57.

Nseir, J., Moreillon, L. and Suter, R. (2013). Flexural and Shear Behaviour of Structural Elements in UHPFRC. *RILEM-fib-AFGC Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC 2013*, Marseille, France, 489-498.

Park, R. (1988). Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing. *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, Kyoto, 8, 605-616.

Parra-Montesinos, G. J., Peterfreund, S. W. and Chao, S. H. (2005). Highly Damage-Tolerant Beam-Column Joints through Use of High- Performance Fiber-Reinforced Cement Composites. *ACI Struc. J*, 102 (3), 487-495.

Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI), Little Cedar Creek Waffle Deck Bridge[online].(December,2016),http://www.pci.org/project_resources/project_profiles/profile_pages/little_cedar_creek_waffle_deck_bridge/

Reineck, K.H., Greiner, S., Lichtenfels, A. 2003. Wasserspeicher aus UHFB – Bemessung (water reservoirs made from UHPC – design). *Innovationen im Bauwesen: Ultrahochfester Beton*, Bauwerk Verlag GmbH, Berlin, 257–268.

Resplendino, J. (2012). State of the Art of Design and Construction of UHPFRC Structures in France. *3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, Kassel University Press, Germany, 27-41.

Richard, P. and Cheyrezy, M. (1995). Composition of Reactive Powder Concretes, *Cement Concrete Res*, 25 (7), 1501–1511.

Rossi, P., Arca, A., Parant, E. and Fakhri, P. (2005). Bending and Compressive Behaviors of A New Cement Composite. *Cem Concr Res*, 35(1), 27-33.

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 Concrete Res*, 2 (3), 349–366.

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.

Schmidt, M., Bunje, K. and Dehn, F. (2008). Sachstandsbericht Ultrahochfester Beton (UHPC – state of the art report), *German Committee for Structural Concrete (DAfStb)*, No. 561, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Skazlic, M. and Bjegovic, D. (2009). Toughness Testing Of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete. *Mater Struct*, 42, 1025-1038.

Stürwald, S. and Fehling, E. (2012). Design of Reinforced UHPFRC in Flexure. *3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*, Kassel University Press, Germany, 403-410.

TS 500, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.

Wang, C., Yang, C., Liu, F., Wan, C. and Pu, X. (2012). Preparation of Ultra-High Performance Concrete with Common Technology and Materials. *Cem Concr Compos*, 34, 538-544.

Wille, K., Naaman, A. E. and Parra-Montesinos, G. J. (2011). Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way. *ACI Mater J*, 108, 46-54.

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. *Mater Struct*, 45 (3), 309–324.

Wu, Z., Shi, C., He, W. and Wu, L. (2016). Effects of Steel Fiber Content and Shape on Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete. *Constr Build Mater*, 103, 8-14.

Voo, Y. and Foster, S. (2009). *Reactive Powder Concrete: Analysis and Design of RPC Girders*. Lambert Academic Publishing.

Voo, Y. L., Poon, W. K. and Foster, S. J. (2010). Shear Strength of Steel Fiber-Reinforced Ultra-High Performance Concrete Beams without Stirrups. *J Struct Eng*, 136 (11), 1393–1400.

Yang, S. L., Millard, S. G., Soutsos, M. N., Barnett, S. J. and Le, T. T. (2009). Influence of Aggregate And Curing Regime on the Mechanical Properties of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). *Constr Build Mater*, 23, 2291-2298.

Yang, I., Joh, C. and Kim, B. (2010). Structural Behavior of Ultra High Performance Concrete Beams Subjected to Bending. *Eng Struct*, 32, 3478-3487.

Yazici. H., Yigiter, H., Karabulut, A. Ş., and Baradan, B. (2008). Utilization of Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag as an Alternative Silica Source in Reactive Powder Concrete. *Fuel*, 87, 2401-2407.

Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., Aydın, S. and Karabulut, A. Ş. (2009). Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete Containing Mineral Admixtures Under Different Curing Regimes. *Constr Build Mater*, 23, 1223-1231.

Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., Yiğiter, H., Aydın, S. and Türkel, S. (2010). Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete Containing High Volumes of Ground Granulated Blast Furnace Slag. *Cem Concr Compos*, 32, 639– 648.

Ye, Y., Hu, S., Daio, B., Yang, S. and Liu, Z. (2012). Mechanical Behavior of Ultra-High Performance Concrete Reinforced with Hybrid Different Shapes of Steel Fiber. *CICTP 2012*, 3017-3028.

Yoo, D. Y., Lee, J. H., and Yoon Y. S. (2013). Effect of Fiber Content on Mechanical and Fracture Properties of Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites. *Compos Struct*, 106, 742-753.

Yoo, D. Y., Shin, H. O., Yang, J. M. and Yoon, Y. S. (2014a). Material and Bond Properties of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with Micro Steel Fibers. *Composites Part B*, 58, 122-133.

Yoo, D. Y., Kang, S. T. and Yoon, Y. S. (2014b). Effect of Fiber Length and Placement Method on Flexural Behavior, Tension-Softening Curve, and Fiber Distribution Characteristics Of UHPFRC. *Constr Build Mater*, 64, 67-81.

Yoo, D. Y. and Yoon, Y. S. (2015). Structural Performance of Ultra-High-Performance Concrete Beams with Different Steel Fibers. *Eng Struct*, 102, 409-423.

Yoo, D. Y. and Yoon, Y. S. (2016). A Review on Structural Behavior, Design, and Application of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. *Int J Concr Struct Mater*, 10 (2), 125.-142.

Yu, R., Spiezs, P. and Brouwers, H. J. H. (2015). Development of an Eco-Friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with Efficient Cement and Mineral Admixtures Uses. *Cem Concr Compos*, 55, 383-394.

Yudenfreund, M., Odler, I., and Brunauer, S. (1972). Hardened Portland Cement Pastes of Low Porosity I. Materials and Experimental Methods. *Cement Concrete Res*, 2 (3), 313–330.

Zakariasen, D. (2005). First Use of UHPFRC in Thin Precast Concrete Roof Shell for Canadian Lrt Station. *PCI Journal* Lafarge North America, CPV Group Ltd.

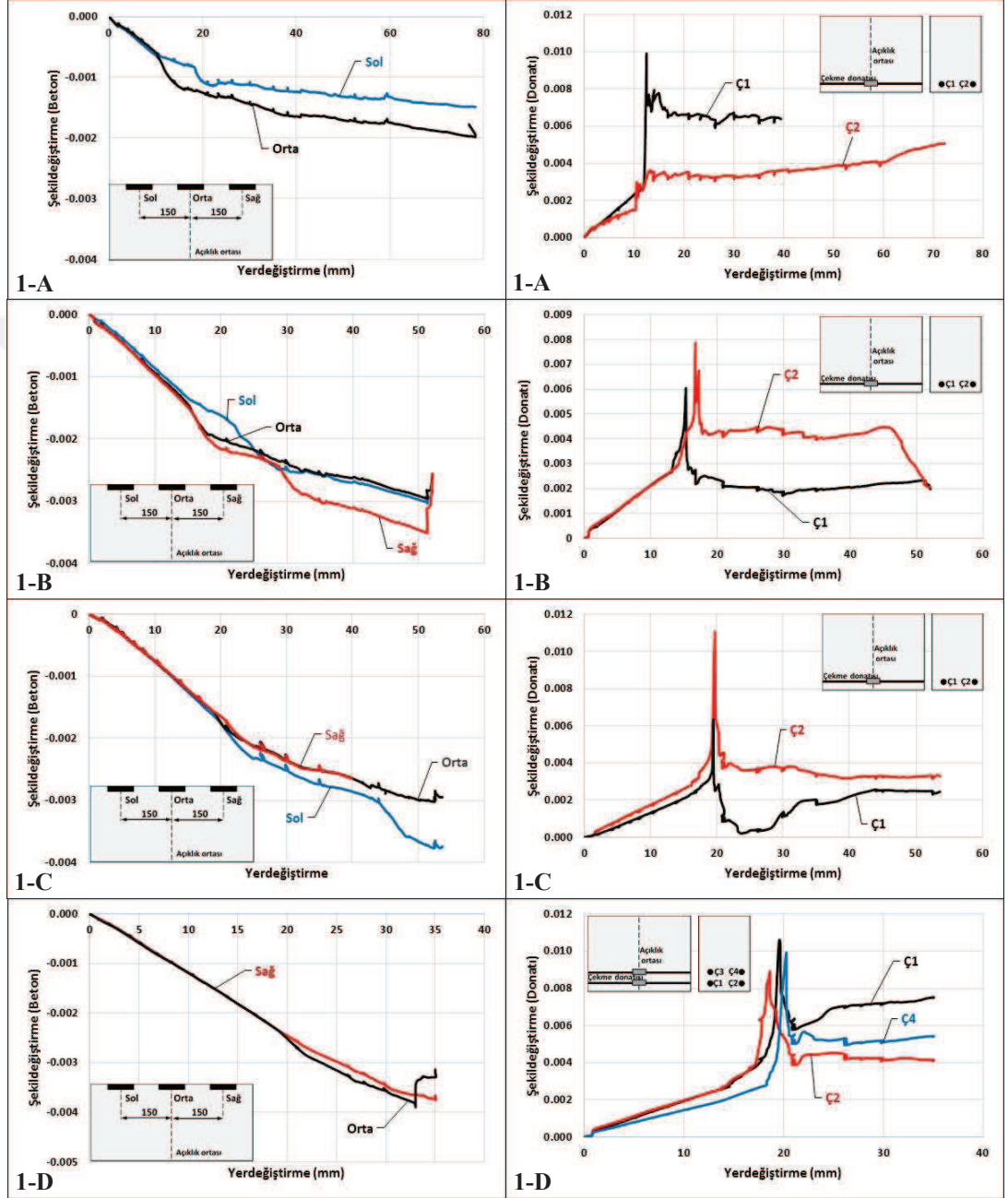




EKLER

6. EKLER

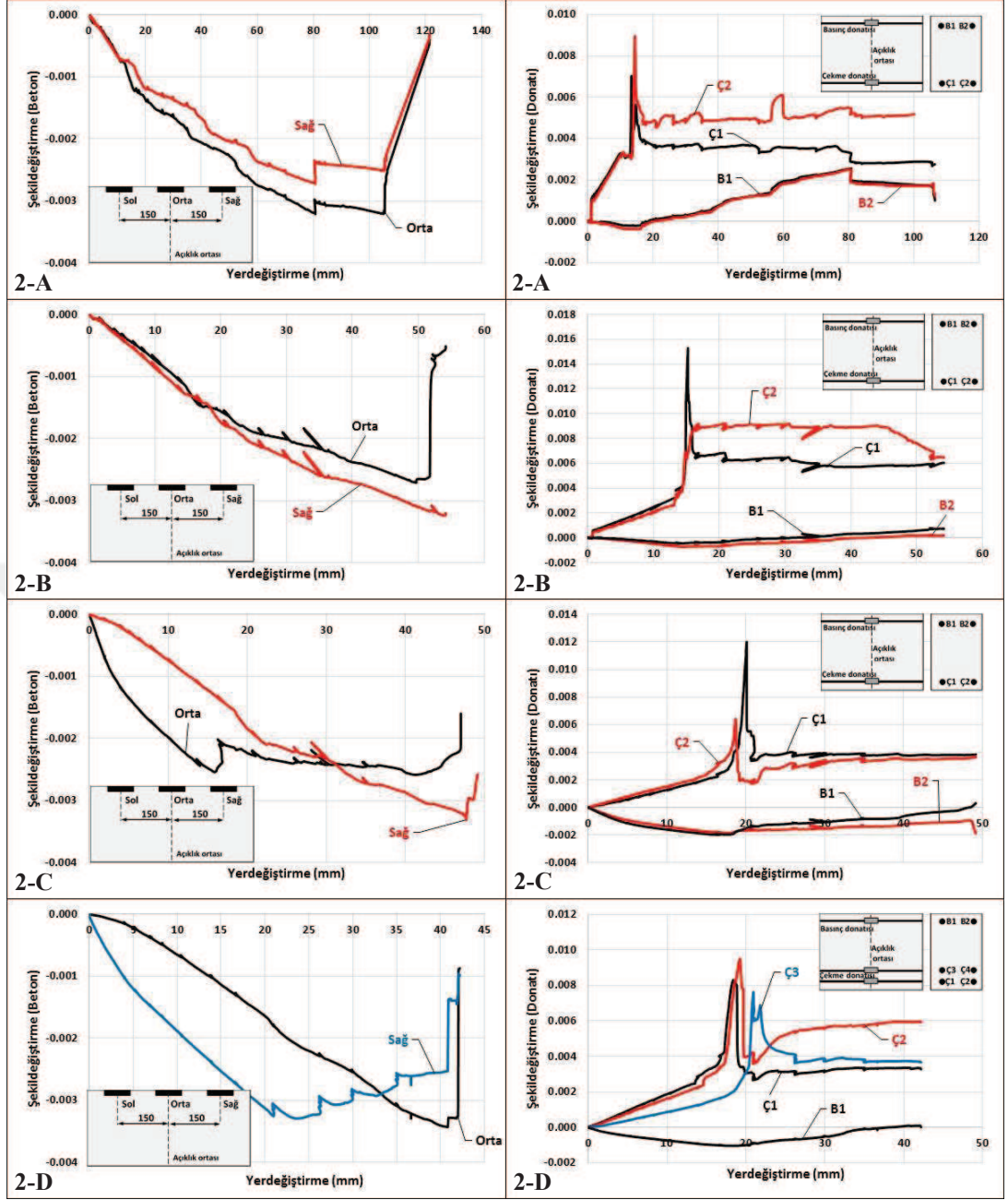
EK A Betonarme Kirişler İçin Beton ve Donatılardan Elde Edilen Şekildeğiştirme-Düşey Yerdeğiştirme Davranışları



(a)

(b)

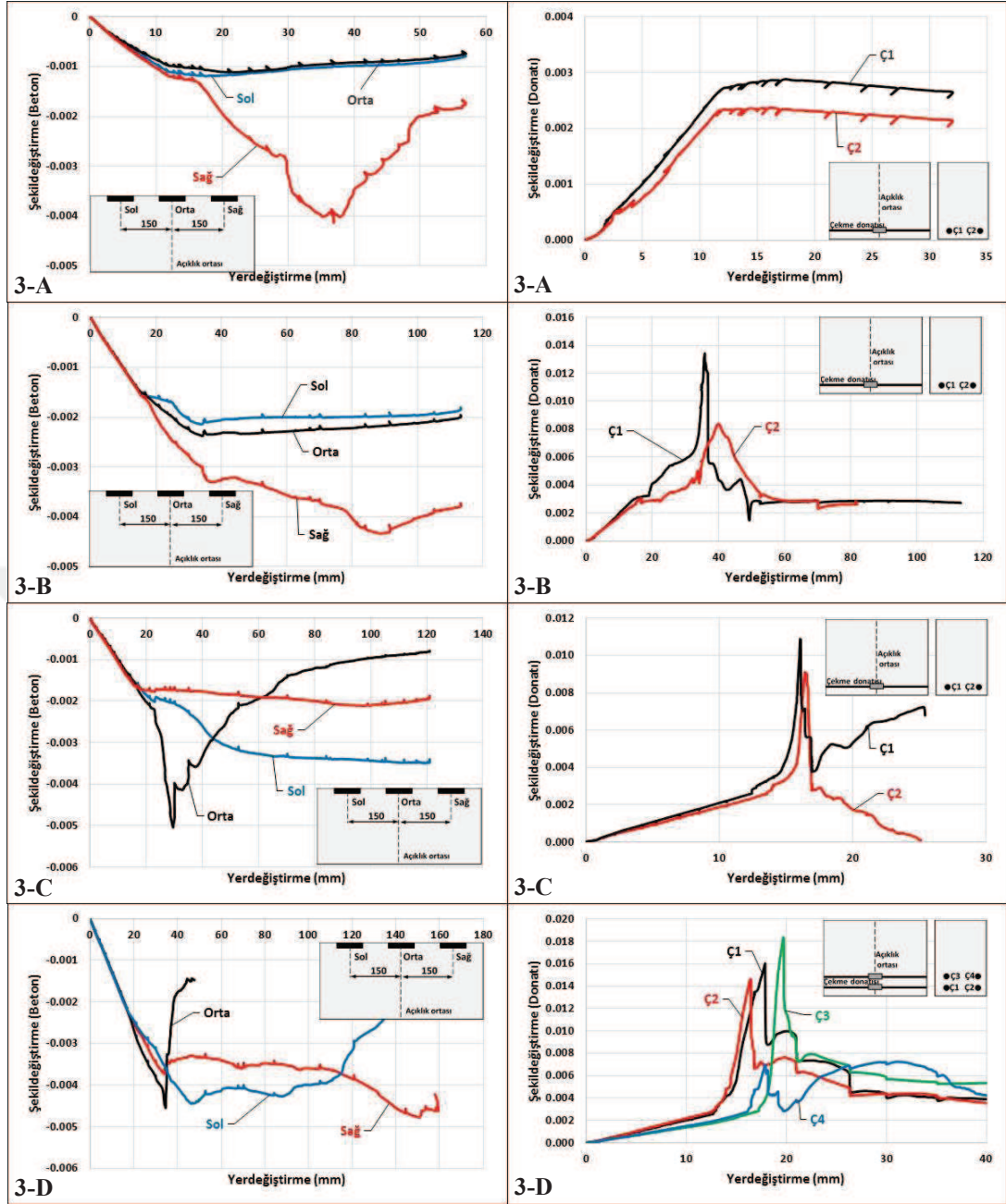
Şekil A.1: Salt çekme donatılı lifsiz kirişlerin şekildeğiştirme-düşey yerdeğiştirme davranışları; a) Beton, b) Donatı



(a)

(b)

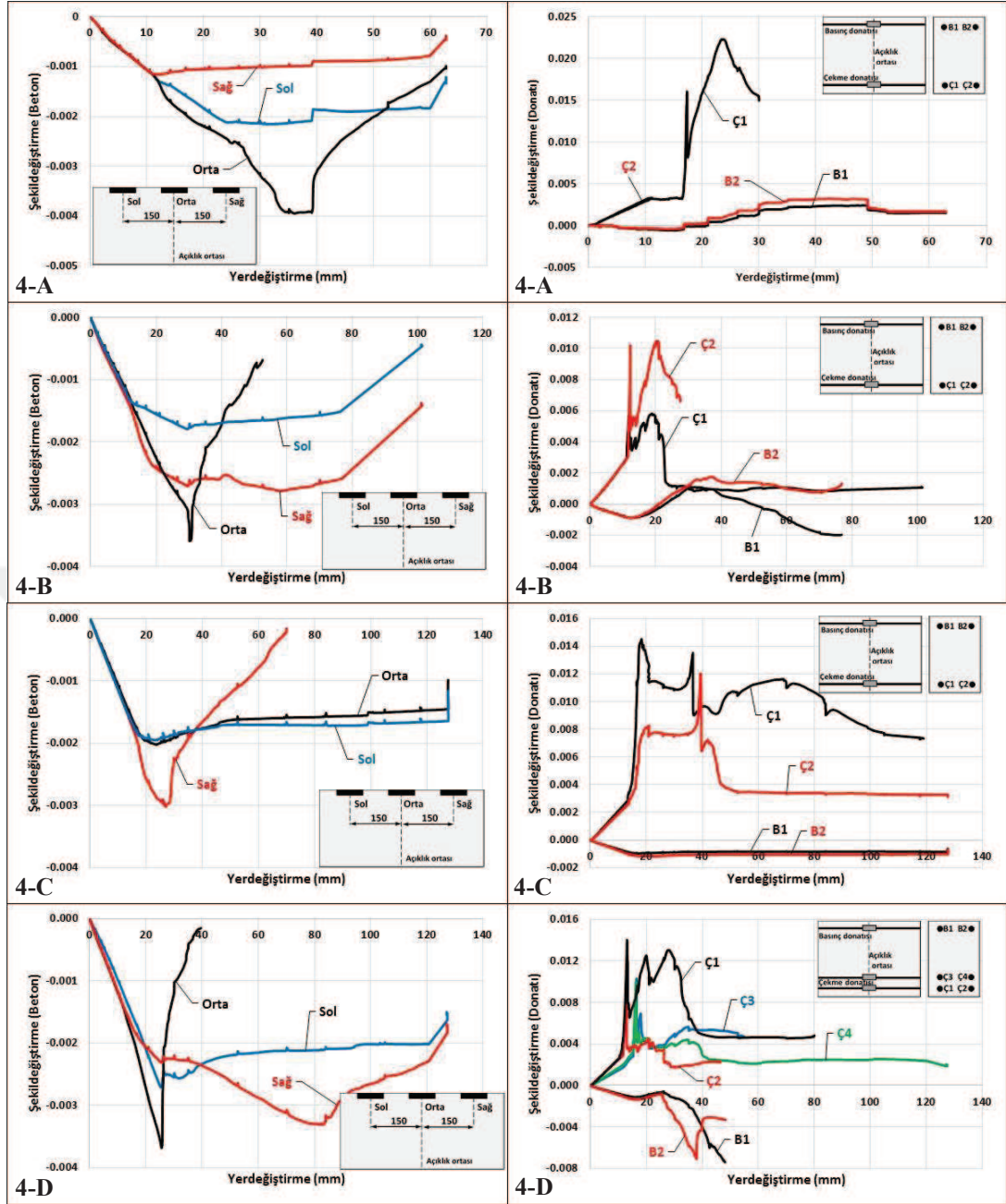
Şekil A.2: Basınç donatılı lifsiz kirişlerin şekildeğiştirme-düşey yerdeğiştirme davranışları; a) Beton, b) Donatı



(a)

(b)

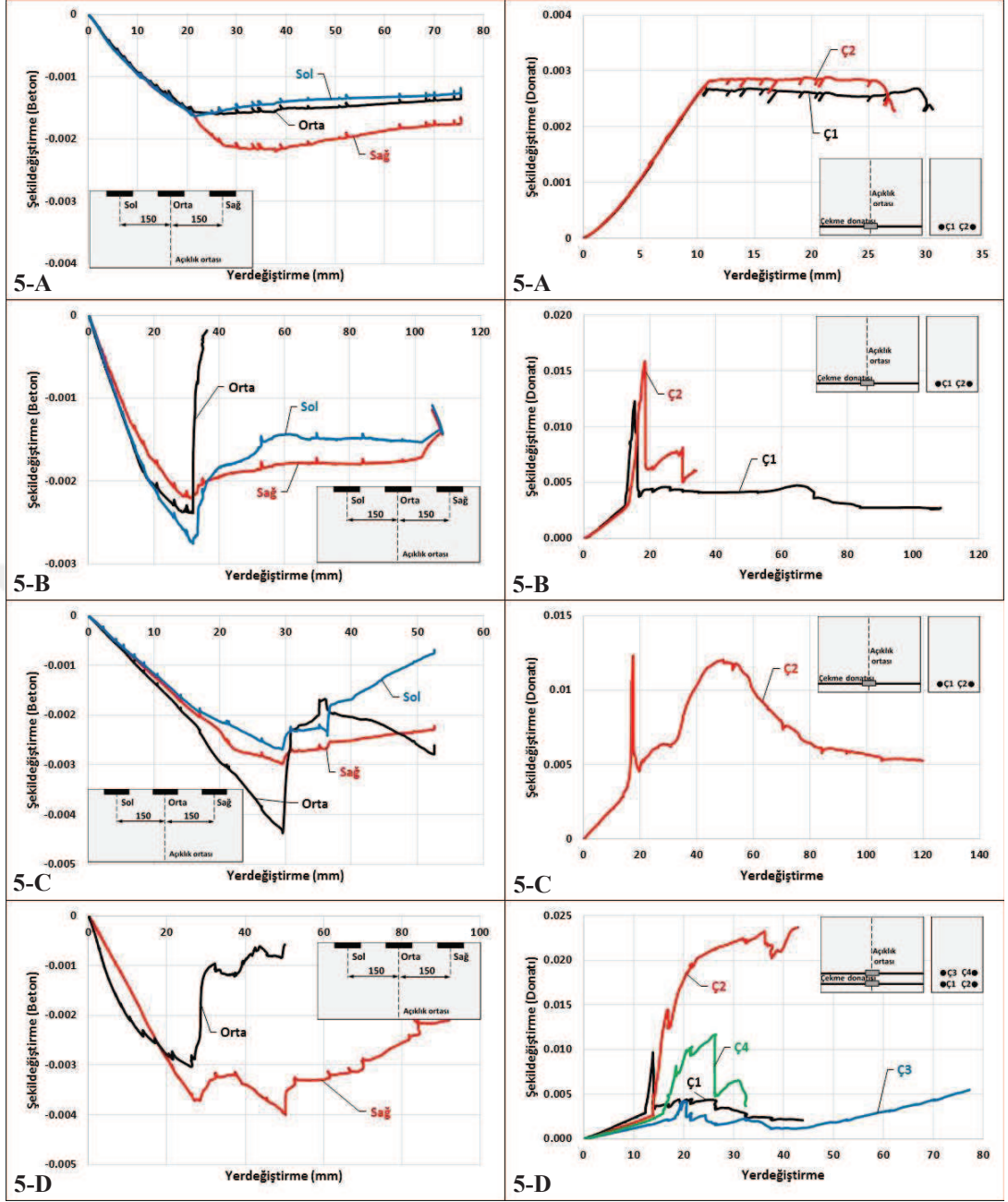
Şekil A.3: Salt çekme donatılı tekil lifli kirişlerin şekildeğiştirme-düşey yerdeğiştirme davranışları; a) Beton, b) Donatı



(a)

(b)

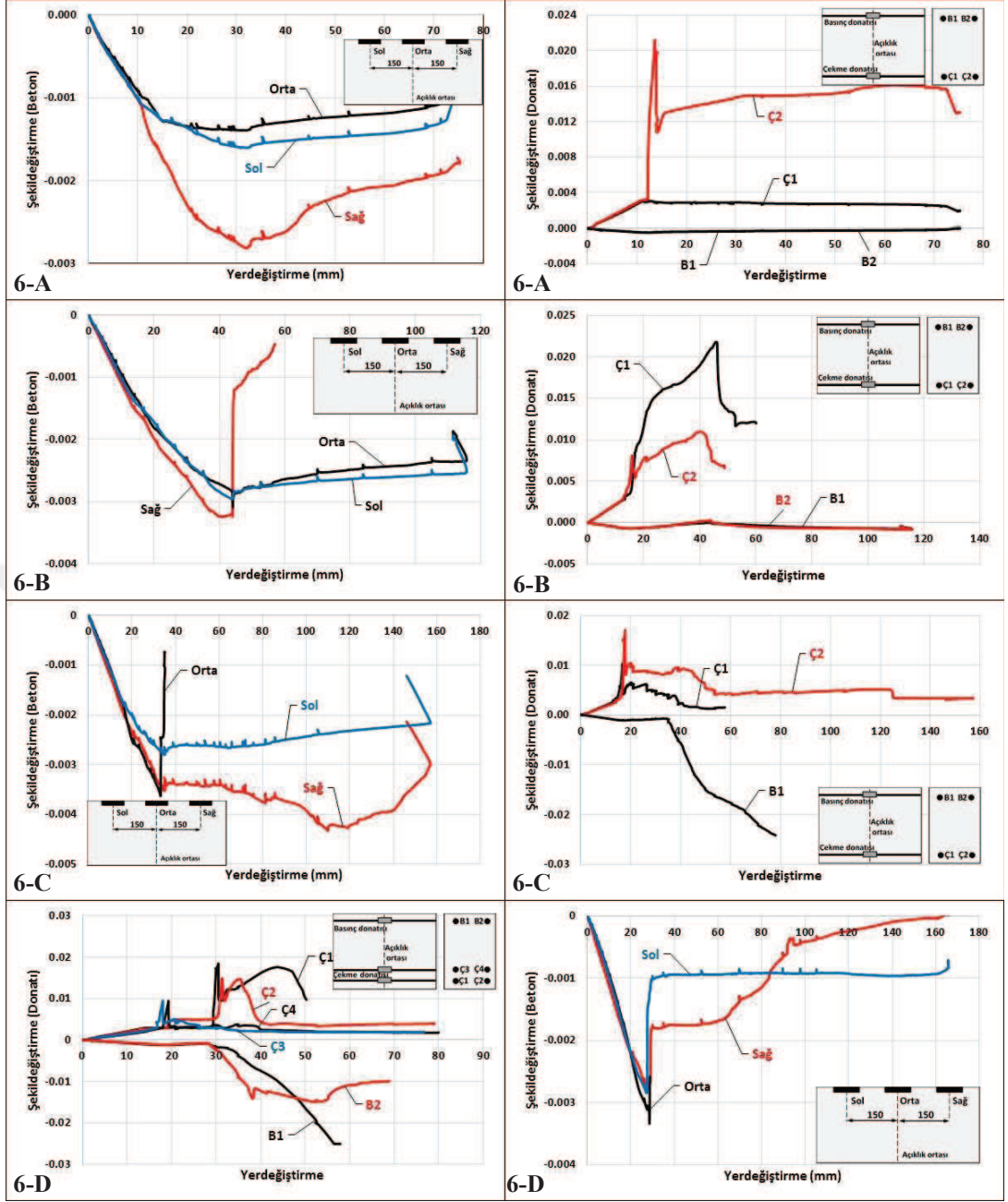
Şekil A.4: Basınç donatılı tekil lifli kirişlerin şekildeğiştirme-düşey yerdeğiştirme davranışları; a) Beton, b) Donatı



(a)

(b)

Şekil A.5: Salt çekme donatılı karma lifli kirişlerin şekildeğiştirme-düşey yerdeğiştirme davranışları; a) Beton, b) Donatı



(a)

(b)

Şekil A.6: Basınç donatılı karma lifli kirişlerin şekildeğiştirme-düşey yerdeğiştirme davranışları; a) Beton, b) Donatı