

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



BETONARME UYPLB'LU ETRİYESİZ KİRİŞLERİN
DAVRANIŞINDA KESME AÇIKLIĞININ ETKİSİNİN
DENEYSEL İRDELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MÜCAHİT İNCE

BALIKESİR, EYLÜL - 2019

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



BETONARME UYPLB'LU ETRİYESİZ KİRİŞLERİN
DAVRANIŞINDA KESME AÇIKLIĞININ ETKİSİNİN
DENEYSEL OLARAK İRDELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MÜCAHİT İNCE

Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Baki ÖZTÜRK
Dr. Öğr. Üyesi Altuğ YAVAŞ (Tez Danışmanı)
Dr. Öğr. Üyesi Tamer BİROL

BALIKESİR, EYLÜL - 2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

Mücahit İNCE tarafından hazırlanan “**BETONARME UYPLB’LU ETRİYESİZ KİRİŞLERİN DAVRANIŞINDA KESME AÇIKLIĞININ ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İRDELENMESİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 13 Eylül 2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

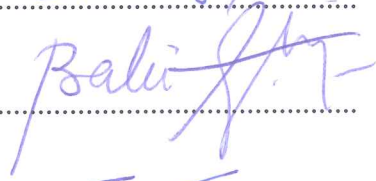
Dr. Öğr. Üyesi Altuğ YAVAŞ

Üye

Doç. Dr. Baki ÖZTÜRK

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Tamer BİROL


.....

.....

.....

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

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

**Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi Araştırma Projeleri tarafından
2018/091 nolu proje ile desteklenmiştir.**

ÖZET

BETONARME UYPLB'LU ETRİYESİZ KİRİŞLERİN DAVRANIŞINDA KESME AÇIKLIĞININ ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İRDELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MÜCAHİT İNCE

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ ALTUĞ YAVAŞ)

BALIKESİR, EYLÜL - 2019

Son yüz yılda insan yapımı en popüler inşaat malzemesi olan betonun geliştirilmesi çalışmalarına yoğunlaşılmıştır. Son yirmi yılda ise mükemmel durabilite özellikleri gösteren, ultra yüksek dayanımlı, kendiliğinden yerleşen, sıkı iç yapıya sahip ve kullanılan lifler sayesinde gevrek olmayan bir davranış sergileyen Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) geliştirilmiştir. UYPLB'un üstün mekanik özellikleri dolayısıyla yapıların taşıyıcı sisteminin oluşturan elemanlarında kullanılabilme potansiyeli vardır. Ayrıca dayanım, rijitlik ve süneklik bakımından önemli avantajlar sağladığından geleneksel betonlara göre daha ekonomik, estetik ve uzun ömürlü yapıların yapılmasını sağlayacaktır.

Bu çalışmada, farklı kesme açıklığının UYPLB ile üretilen I en kesitli enine donatısız kirişlerin davranışının deneysel incelenmesi amaçlanmıştır. Gövde kalınlığı 5 cm olan I en kesitli 2500 mm boyunda enine donatısız 8 kirişe, eğilme deneyleri yapılmıştır. Test kirişlerinde iki farklı a/d değeri dört donatı oranı, mikro ve makro olmak üzere iki tip lif kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar daha önce testleri yapılan 16 kiriş sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Kirişlerin davranışları; yük taşıma kapasitesi, yer değiştirme sünekliği, çatlak genişliği ve dağılımı, eğrilik sünekliği ve eğilme rijitliği parametreleri açısından değerlendirilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: UYPLB, kesme açıklığı, I kiriş

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF SHEAR SPAN IN UHPFRC BEAMS WITHOUT STIRRUPS

MSC THESIS

MUCAHIT INCE

BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

CIVIL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASISST PROF. ALTUĞ YAVAŞ)

BALIKESİR, SEPTEMBER 2019

In the last century, researches has focused on the development of the most popular man-made construction material concrete. In the last two decades, Ultra High Performance Fiber Concrete (UHPFRC) has been developed which exhibits excellent durability characteristics, ultra-high strength, self-compacting, rigid matrix and non brittle behavior. Due to the superior mechanical properties of the UHPFRC, it can be used in structural elements. Because it provides important advantages in terms of stiffness and ductility to more economical than conventional concrete, will allow for the aesthetic and long-lasting structures.

The aim of this study is to investigate the behavior of UHPFRC I beams without stirrups at different effective shear span. Bending tests were performed on 8 beam with a width of 5 cm web flange I cross-section 2500 mm long. In the beams, two different a/d values, four different reinforcement ratios and two different fiber types were used. The results were compared with the present results of the 16 beams that were tested previously. Behavior of the beams were evaluated in terms of; load bearing capacity, displacement and curvature ductility, bending stiffness, crack width and distribution parameters.

KEYWORDS: UHPFRC, shear span, I beam

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ.....	vii
SEMBOL LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB).....	1
1.1.1 UYPLB Üretiminde Kullanılan Malzemeler	2
1.1.1.1 Çimento	2
1.1.1.2 Silis Dumanı	3
1.1.1.3 Agrega	3
1.1.1.4 Puzolanik Mineral Katkılar	3
1.1.1.5 Çelik Teller (Lifler)	4
1.1.1.6 Akışkanlaştırıcı	5
1.1.2 UYPLB'un Kullanım Alanları.....	5
1.2 Literatür Özeti	7
1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	11
2. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	12
2.1 Numune Özellikleri.....	12
2.2 Test Numunelerinin Üretilmesi	13
2.3 Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) Üretilmesi	13
2.4 Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) Karışımı	14
2.1 Test kirişleri için donatıların hazırlanması.....	16
2.2 Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton ile Betonarme Kirişlerin Üretilmesi.....	17
2.3 Test Düzenegi ve Ölçerler.....	20
3. TEST KİRİŞLERİNİN SONUÇLARI.....	23
3.1 Beton ve Donatı Test Sonuçları.....	23
3.2 Test Kirişlerinin Sonuçları	25
3.2.1 A Grubu Test Kirişlerinin Sonuçları.....	25
3.2.1.1 Yük-Yer Değiştirme Davranışı.....	25
3.2.1.2 Yük Taşıma Kapasiteleri ve Yer Değiştirme Süneklikleri.....	28
3.2.1.3 Kirişlerinin Çatlak Davranışları.....	30
3.2.2 B Grubu Test Kirişleri Sonuçları	33
3.2.2.1 Yük Yer Değiştirme Davranışı.....	33
3.2.2.2 Yük Taşıma Kapasiteleri ve Yerdeğiştirme Süneklikleri	35
3.2.2.3 Kirişlerinin Çatlak Davranışları.....	37
4. DENEYSEL SONUÇLARIN MEVCUT TESTLERLE KARŞILAŞTIRILMASI.....	39
4.1 a/d=4.45 Olan Kirişlerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi	40
4.1.1 Yük-Yer değiştirme Davranışı ve Kırılma Şekilleri	40

4.1.2	Yük Taşıma Kapasiteleri ve Yer Değiştirme Süneklikleri	44
4.1.3	Test Kirişlerinin Çatlak Davranışları	46
4.2	a/d=3.32 Olan Kirişlerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi	48
4.2.1	Yük-Yer değiştirme Davranışı ve Kırılma Şekilleri	48
4.2.2	Yük Taşıma Kapasiteleri, Yer değiştirme Süneklikleri.....	52
4.2.3	Test Kirişlerinin Çatlak Davranışları	54
5.	SONUÇLAR	56
6.	KAYNAKLAR	57



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: UYPLB'un çekme ve basınç altında şekil değiştirmelerinin Geleneksel Beton (GB), Yüksek Dayanımlı Beton (YDB), Lifli Beton (LB) ve Çimento Esaslı Kompozitlerle (ÇEK) karşılaştırılması, a-) çekme gerilmesi şekil değiştirme grafiği, b-) basınç gerilmesi şekil değiştirme grafiği.....	2
Şekil 1.2 TS10513 de verilen lif çeşitleri [8].....	4
Şekil 1.3: Sherbrooke Yaya Köprüsü [13].....	5
Şekil 1.4: Wapello Road Bridge [14].....	6
Şekil 1.5: Sakata Mirai Yaya Köprüsü [15].....	6
Şekil 1.6: Jean Bouin Stadyumu, a) iç görünüş, (b) 23000 m ² UYPB kafes örgü [16].....	6
Şekil 1.7: Ultimate durumdaki diyagonal çatlak açıları.....	8
Şekil 1.8: Kirişlerin kırılma şekilleri [25].....	10
Şekil 2.1: Test kirişlerine ait boyutlar ve donatı yerleşimi.....	12
Şekil 2.2: Çelik kalıplar.....	13
Şekil 2.3: Betonlu oluşturan bileşenler.....	14
Şekil 2.4: Kullanılan lif tipleri.....	14
Şekil 2.5: Betonlu oluşturan bileşenlerin hacimce yüzdeleri.....	15
Şekil 2.6: Donatıların hazırlanması.....	16
Şekil 2.7: Beton üretimi akış şeması.....	17
Şekil 2.8: Beton üretimi, a-) Topaklanma, b-) Akışkan kıvam, c-) Liflerin eklenmesi.....	17
Şekil 2.9: Kiriş üretimi, a-) Beton arabasına döküm, b-) Kirişe döküm, c-) Dökümü tamamlanan kiriş.....	18
Şekil 2.10: Beton numuneleri.....	19
Şekil 2.11: Kirişlerin döküm sonrası korunması.....	19
Şekil 2.12: Kür kabini.....	20
Şekil 2.13: A grubu kirişler için eğilme test düzeneği.....	20
Şekil 2.14: B grubu kirişler için eğilme test düzeneği.....	21
Şekil 2.15: Mesnet detayları.....	21
Şekil 2.16: Veri toplama sistemi.....	22
Şekil 3.1: Beton basınç test düzeneği (sol) ve küp numuneler (sağ).....	23
Şekil 3.2: Eksenel çekme test düzeneği.....	24
Şekil 3.3: A Grubu 2φ10 donatılı kirişin yük-yer değiştirme grafiği.....	26
Şekil 3.4: A grubu 2φ12 donatılı kirişin yük-yer değiştirme grafiği.....	26
Şekil 3.5: A grubu 2φ14 donatılı kirişin yük-yer değiştirme grafiği.....	26
Şekil 3.6: A grubu 2φ16 donatılı kirişin yük-yer değiştirme grafiği.....	27
Şekil 3.7: A grubu kirişlere ait yük-yerdeğiştirme grafikleri.....	27
Şekil 3.8: A grubu kirişlerin kırılma şekilleri.....	28
Şekil 3.9: Yük-düşey yerdeğiştirme davranışına ait karakteristik değerler [14].....	28
Şekil 3.10: A grubu kirişlerin yük taşıma kapasiteleri.....	29
Şekil 3.11: A grubu kirişlerin yer değiştirme sünekliği.....	30

Şekil 3.12: Çatlak genişliğinin ölçülmesi.	31
Şekil 3.13: A grubu kirişler için ilk çatlak yükleri.	31
Şekil 3.14: A grubu kirişlerin L/500 ve L/100 için çatlak sayıları.	32
Şekil 3.15: A grubu kirişlerin L/500 ve L/100 için çatlak genişlikleri.	32
Şekil 3.16: 2φ10 donatılı B kirişinin yük-yer değiştirme grafiği.	33
Şekil 3.17: 2φ12 donatılı B kirişinin yük-yer değiştirme grafiği.	33
Şekil 3.18: 2φ14 donatılı B kirişinin yük-yer değiştirme grafiği.	34
Şekil 3.19: 2φ16 donatılı B kirişinin yük-yer değiştirme grafiği.	34
Şekil 3.20: B grubu kirişlere ait yük-yerdeğiştirme grafikleri.	34
Şekil 3.21: B grubu kirişlerin yük taşıma kapasiteleri.	36
Şekil 3.22: B grubu kirişlerin yer değiştirme sünekliği.	36
Şekil 3.23: B grubu kirişler için ilk çatlak yükleri.	37
Şekil 3.24: B grubu kirişlerin L/500 ve L/100 için çatlak sayıları.	37
Şekil 3.25: B grubu kirişlerin L/500 ve L/100 için çatlak genişlikleri.	38
Şekil 4.1: A grubu kirişlerin yük yerdeğiştirme davranışı.	40
Şekil 4.2: 2φ10 Donatılı A grubu kirişlerin yük yerdeğiştirme grafiği.	41
Şekil 4.3: 2φ12 Donatılı A grubu kirişlerin yük-yerdeğiştirme grafiği.	41
Şekil 4.4: 2φ14 Donatılı A grubu kirişlerin yük-yerdeğiştirme grafiği.	42
Şekil 4.5: 2φ16 Donatılı A grubu kirişlerin yük-yerdeğiştirme grafiği.	42
Şekil 4.6: A grubu NF kirişlere ait kırılma şekilleri.	44
Şekil 4.7: A grubu 13 mm mikro lifli kirişlere ait kırılma şekilleri.	44
Şekil 4.8: A grubu 30 mm makro lifli kirişlere ait kırılma şekilleri.	44
Şekil 4.9: A grubu kirişlerin yük taşıma kapasiteleri.	45
Şekil 4.10: A grubu kirişlerin yerdeğiştirme sünekliği.	46
Şekil 4.11: A grubu kirişlerin ilk çatlak yükleri.	46
Şekil 4.12: A grubu test kirişlerin L/100 ve L/500 için çatlak sayıları.	47
Şekil 4.13: A grubu test kirişlerin L/100 ve L/500 için çatlak genişlikleri.	47
Şekil 4.14: B grubu kirişlerin yük-yerdeğiştirme davranışı.	48
Şekil 4.15: 2φ10 Donatılı B grubu kirişlerin yük-yerdeğiştirme grafiği.	48
Şekil 4.16: 2φ12 Donatılı B grubu kirişlerin yük yerdeğiştirme grafiği.	49
Şekil 4.17: 2φ14 Donatılı B grubu kirişlerin yük yerdeğiştirme grafiği.	49
Şekil 4.18: 2φ16 Donatılı B grubu kirişlerin yük-yerdeğiştirme grafiği.	50
Şekil 4.19: B grubu NF kirişlere ait kırılma şekilleri.	51
Şekil 4.20: B grubu 13 mm mikro lifli kirişlere ait kırılma şekilleri.	51
Şekil 4.21: B grubu 30 mm makro lifli kirişlere ait kırılma şekilleri.	52
Şekil 4.22: B grubu kirişlerin yük taşıma kapasiteleri.	53
Şekil 4.23: B grubu kirişlerin yerdeğiştirme sünekliği.	54
Şekil 4.24: B grubu kirişlerin ilk çatlak yükleri.	54
Şekil 4.25: B grubu test kirişlerinin L/100 ve L/500 için çatlak sayıları.	55
Şekil 4.26: B grubu test kirişlerinin L/100 ve L/500 için çatlak genişlikleri.	55

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Test kirişlerinin donatı ve çelik lif içerikleri.	12
Tablo 3.1: Ortalama basınç dayanımları.	24
Tablo 3.2: Boyuna donatılara ait mekanik özellikler.....	25
Tablo 3.3: A grubu kirişlerde yerdeğiştirme süneklikleri ve diğér karakteristik değerleri.	29
Tablo 3.4: B grubu kirişlerde yerdeğiştirme süneklikleri ve diğér karakteristik değerleri.	35
Tablo 4.1: Karşılaştırmalarda kullanılan kirişlerin özellikleri.....	39
Tablo 4.2: A grubu kirişlerin yerdeğiştirme süneklikleri ve diğér karakteristik değerleri.	45
Tablo 4.3: B grubu kirişlerin yerdeğiştirme süneklikleri ve diğér karakteristik değerleri.	52

SEMBOL LİSTESİ

a	: Kesme açıklığı
b	: Kiriş enkesit genişliği
d	: Enkesit yüksekliği (faydalı yükseklik)
L	: Temiz açıklık
$\emptyset$	: Donatı çapı
P	: Yük
P_{maks}	: Maksimum yük taşıma kapasitesi
P_y	: Akma yükü
P_u	: Maksimum yerdeğiştirmeye karşılık gelen yük taşıma kapasitesi
Δ_u	: Maksimum yerdeğiştirme
Δ_y	: Akma yerdeğiştirmesi
$\emptyset_y$	: Akma eğriligi
$\emptyset_u$	: Maksimum eğrilik
ρ	: Çekme donatısı oranı
UHPC	: Ultra high performance concrete
UHPCC	: Ultra high performance cementitious concrete
SFR	: Steel fiber reinforced
NF	: Lifsiz Beton
UYPLB	: Ultra yüksek performanslı lifli beton
LB	:Lifli beton
ÇEK	:Çimento esaslı kompozit
GB	:Geleneksel beton
YDB	:Yüksek dayanımlı beton

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, Ultra Yüksek Performanslı Lifli Betonla (UYPLB) ile üretilen betonarme kiriş elemanlarının kesme davranışı deneysel ve analitik olarak incelenmiştir.

Çalışmalarında bana desteklerini esirgemeyen değerli Hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Altuğ YAVAŞ' a, Dr. Öğr. Üyesi Tamer BİROL' a, Dr. Öğr. Üyesi Umut HASGÜL' e, Dr. Öğr. Üyesi Kaan TÜRKER' e ve çalışma arkadaşım İnş. Müh. Oğuz AĞAR' a teşekkür ederim.

Balıkesir, 2019

Mücahit İNCE

1. GİRİŞ

Dünyada insan yapımı en popüler malzeme olan beton, gelecekte de popülerliğine devam edecektir. Dünya genelinde yıllık 6 milyar m³ beton üretildiği tahmin edilmektedir. Ülkemizdeki beton üretimi ise yıllık yaklaşık 100 milyon m³ civarındadır. Yapı malzemesi olarak beton basınç dayanımıyla bilinir. Tarihsel olarak 20-40 MPa arasında değişen bir basınç dayanımına sahiptir. Bununla birlikte mühendisler yapısal tasarımın sınırlarını zorladıkça, betonarmenin boyutları ve karmaşıklığı dramatik olarak artmıştır. Bu yükselen mühendislik taleplerini karşılamak için daha yüksek dayanımlı ve kaliteli bir betonun geliştirilmesi gerekmektedir. Son 50 yılda betonun geliştirilmesi ile ilgili çalışmalara yoğunlaşılmıştır, son 20 yılda ise mükemmel durabilite özellikleri gösteren ultra yüksek dayanıma, sıkı içyapıya sahip kendiliğinden yerleşen ve kullanılan lifler sayesinde gevrek olmayan bir davranış sergileyen Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) geliştirilmiştir.

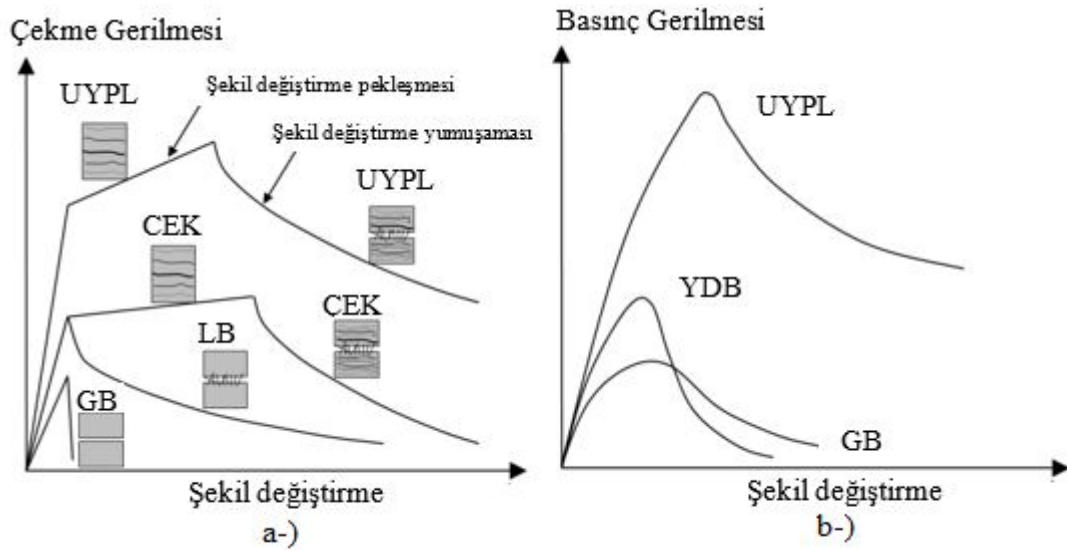
1.1 Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB)

Son yıllarda, birçok araştırmacı basınç dayanımı 150 MPa'lı geçen Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) geliştirilmiştir [1]. 1970'li yılların başlarında Newyork'lu bir grup araştırmacı, çimento hamurunun yoğunluğunu (packing density) 230 MPa dayanıma sahip beton üretmişlerdir [2]. Bununla birlikte büyük miktarda UYPB'un üretimi 1990'ların başında gerçekleştirilmiştir. Ancak üretim prosesi karmaşıktır. 2001 yılında Willie ve ark [3] basınç ve ısı gerektirmeyen bir yöntemle 150 MPa basınç dayanımına sahip beton üretimi ile ilgili detaylı bir çalışma sunmuşlardır. Geliştirdikleri metot ile UYPB üretimi geleneksel beton üretimi cihazlarıyla gerçekleştirilebilmiştir.

Son yıllarda Yüksek dayanımlı betonlara çelik lif katılarak betonun ve üretilen beton da kullanılan yapı elemanlarına yönelik deneysel ve analitik çalışmalar yapılmıştır. Yüksek mukavemeti olan bu betondan yapılan yapı elemanlarının basınç

etkisi altında çoğu zaman yeterlidir fakat kesme ve eğilme etkisi altında yeterli olmamaktadır.

Çimento esaslı malzemelerin uygun gradasyonlu kum ve liflerle kombinasyonunun, akışkanlaştırıcı ve uygun kürle birleşmesiyle çok iyi mekanik özelliklere ve durabiliteye sahip UYPLB üretilebilir. UYPLB'un diğer beton çeşitleriyle basınç ve çekme şekildeğiştirmeleri bakımından karşılaştırılması Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1: UYPLB'un çekme ve basınç altında şekil değiştirmelerinin Geleneksel Beton (GB), Yüksek Dayanımlı Beton (YDB), Lifli Beton (LB) ve Çimento Esaslı Kompozitlerle (ÇEK) karşılaştırılması, a-) çekme gerilmesi şekil değiştirme grafiği, b-) basınç gerilmesi şekil değiştirme grafiği.

1.1.1 UYPLB Üretiminde Kullanılan Malzemeler

1.1.1.1 Çimento

UYPLB'un üretiminde kullanılan temel bağlayıcı Portlant Çimentosudur. Geleneksel betona göre bağlayıcıdaki çimento miktarı çok fazla olduğundan çimento tipinin seçimi çok önemlidir. Düşük oranda kalsiyum alüminat içeren çimento ile daha yüksek dayanım elde edilebilir [5]. Dane çapı açısından yüksek

blaine inceliğine sahip çimentolar, su taleplerinin çok olması dolayısıyla tercih edilmemelidir [4].

1.1.1.2 Silis Dumanı

Silis dumanı, silis metalinin yada ferrosilisyum olarak adlandırılan alaşımlarının üretiminde ortaya çıkan bir tozdur. Tipik dane çapı 0.2 μm 'dir. Silis dumanı çimentonun mekanik özelliklerini iyileştiren puzolonik bir malzemedir. Silis dumanı çok yüksek SiO_2 (genellikle % 90 dan fazla) içerir ve yüzey alanı 15000 ila 25000 m^2/kg arasında değişim gösterir. Betonda üç farklı amaç için kullanılır.

- Çimento daneleri arasındaki boşluğu doldurarak sıkı bir iç yapı oluşturmak
- Mükemmel küresel şekilleri dolayısıyla betonun reolojik özelliklerini arttıran yağlama (akışkan) etkisi oluşturmak
- Çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girip ikincil bir hidratasyon oluşturmaktır [4].

1.1.1.3 Agregası

Geleneksel betonda iri agregası rijit bir iskelet gibi çalışır. Çatlaklar kuvvetin matris ve agregası yüzeyine etkimesi ile oluşur. Çatlakların boyutları agreganın çapı ile doğrudan orantılıdır [4]. Yüksek dayanımlı betonda agreganın boyutlarının küçültülmesi mekanik ve kimyasal kuvvetlerden oluşan çatlakları küçültür [4]. Agregaların çaplarının küçülmesiyle birlikte geleneksel betondaki rijit iskelet UYPLB'da oluşmaz. Bu nedenle UYPLB'da iri agregası kullanılmaz.

1.1.1.4 Puzolanik Mineral Katkıları

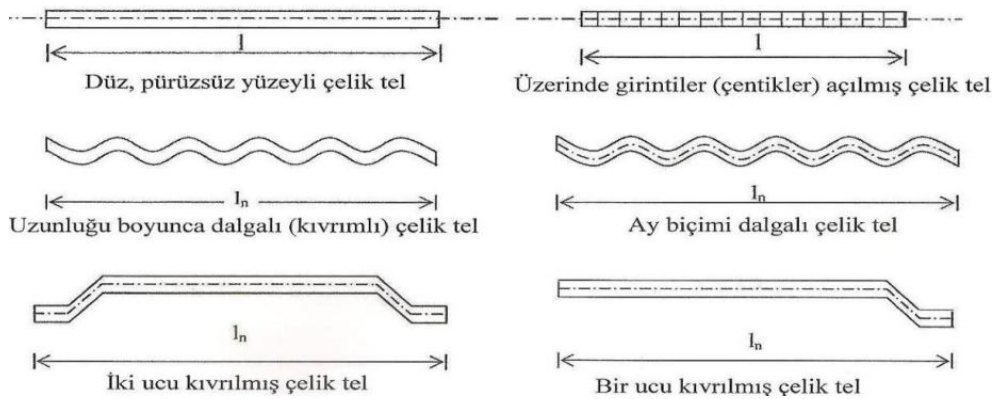
Uçucu kül, metakaolin, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu gibi malzemeler betonda çimento ile yer değiştiren puzolanik katkılarıdır. Puzolanik katkıların

kullanılması sadece maliyet azaltılması açısından değil aynı zamanda beton üretimindeki karbon salınımını da azaltmaktadır [6]. Randl ve ark. [7] UYPLB’da çimentonun puzolanik katkılarla değiştirilmesinin çevresel anlamda daha büyük faydaları olacağını belirtmiştir. Ayrıca çalışmada UYPLB’un mekanik özelliklerini değiştirmeden çimentonun %45’inin puzolanik katkı ile değiştirilebileceğini belirtmiştir [7].

1.1.1.5 Çelik Teller (Lifler)

Beton, çok az ön çatlak davranışı sergileyen ani göçen, gevrek bir malzemedir. UYPLB’a lifler çatlaklar arasındaki boşluklarda köprü oluşturabilmek için katılmıştır. Richard ve Ark (1995) 13 mm’ lik mikro lifler için ekonomik optimum oranı %2 olarak önermiştir [4]

Geleneksel ve UYPLB’ dan kullanılabilen çok farklı çelik lif mevcuttur. TS10513’te lifler üç gruba ayrılmıştır. Bunlar düz, pürüzsüz yüzeyli teller, bütün uzunluğunca deforme olmuş teller ve Sonu kancalı tellerdir. (Şekil1.2)



Şekil 1.2 TS10513 de verilen lif çeşitleri [8].

Dairesel kesitli çelik liflerin çapları 0.2 ile 1.00 mm arasında farklılık gösterir. Boyları ise genellikle 20 ile 60 mm arasında değişmektedir. Çeliğin en avantajlı özelliklerinden bir tanesi de plastik deformasyon yetenekleridir. Bu özelliği sayesinde çelik lifler kullanıldığı yapı elemanın enerji yutma kapasitesini arttırdığı söylenebilir.

1.1.1.6 Akışkanlaştırıcı

UYPLB karışımında su/bağlayıcı oranı çok düşük olmasına süper akışkanlaştırıcılar betonun işlenebilirliğini artırır. Plank ve ark (2008) [9] yaptıkları çalışmada akışkanlaştırıcının kademeli olarak karışıma ilave edilmesinin karışımın viskozitesini düşürdüğünü ve işlenebilirliğini arttırdığını göstermiştir.

1.1.2 UYPLB'un Kullanım Alanları

1990'lı yıllardan itibaren UYPLB ile üretilmiş yapısal ve yapısal olmayan elemanlar ABD, Kanada, Japonya, Avustralya ve bazı Avrupa ülkelerinde kullanılmaktadır [10-12]. Yapısal elemanlar ele alındığında en yoğun kullanım alanı köprülerin inşasıdır. Bu köprülerden bazıları:

Sherbrooke Yaya Köprüsü: 1990'ların başında Kanada, Quebec te inşaa edilen ilk UHPC köprü örneğidir. Köprü 60m açıklığa sahip Magog nehri üzerine uzay kafes olarak yapılmıştır.



Şekil 1.3: Sherbrooke Yaya Köprüsü [13].

Wapello Road Bridge: 2003de Iowa ulaşım departmanı ve Wapello şehri bir köprü değiştirme projesinde UYPLB'nu önerilmeli kirişlerde kullandılar. Kirişlerde öngerme halatları haricinde donatı kullanılmadı. Köprü kirişlerinin imalatında ^{50m3} UYPLB kullanılmıştır. Köprünün genel görünüşü Şekil 1.4'de verilmiştir.



Şekil 1.4:Wapello Yol Köprüsü [14].

Sakata Mirai Yayakörüsü: Sakata Mirai köprüsü 40 yaşındaki eski öngerilmeli köprünün tamamen değiştirilmesi için yapılmıştır. 2002 yılında Japonya’da ilk kez 50 m açıklıklı bir köprü UYPB ile üretilmiştir. UYPB2un yum avantajlarını kullanabilmek için pasif donatı kullanılmadan inşaa edilmiştir. Köprünün genel görünüşü Şekil 1.5’de verilmiştir.



Şekil 1.5: Sakata Mirai Yaya Köprüsü [15].

UYPLB köprüler haricinde yapısal olmayan eleman olmayan elemanlarda da kullanılmaktadır. Bunlar cephe kaplamaları, kent mobilyaları gibi farklı kullanım alanları da mevcuttur. Cephe kaplamalarına ait örnek Şekil 1.6 verilmiştir.



a-)



b-)

Şekil 1.6: Jean Bouin Stadyumu, a) iç görünüş, (b) 23000 m² UYPB kafes örgü [16].

1.2 Literatür Özeti

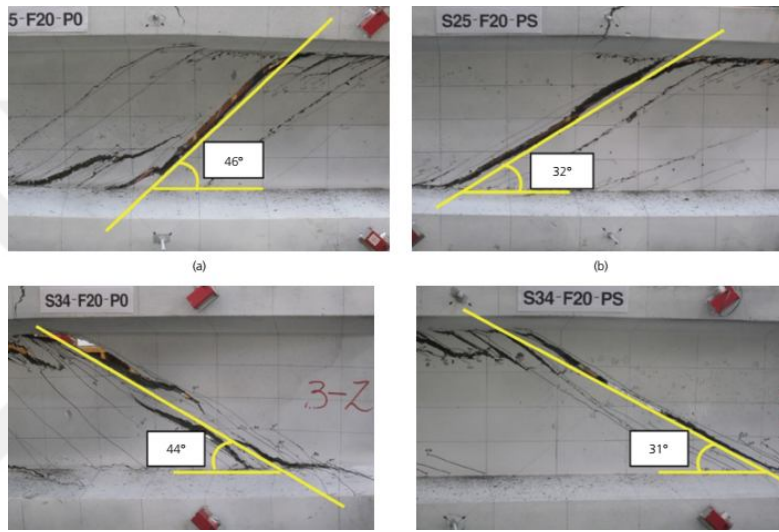
Josef Hegger ve Guido Bertram [17] tarafından geliştirilen Ultra Yüksek Performanslı Beton (UHPC), özellikle narin yapılar için yeni fırsatlar sunan yüksek teknoloji ürünü bir malzeme olduğu öngörülmüştür. Bu çalışmada ön germeli iki farklı a/d oranına sahip 16 kirişi test edilmiştir. Lifsiz, %0,9 ve %2,5 oranına sahip kirişlerin kesme davranışları incelenmiştir. Ayrıca 3 kirişte gövde de bırakılan boşluğun davranışa etkileri de değerlendirilmiştir. Bu testlerin sonucunda UHPC gelecekte daha küçük kesitler ile daha fazla kapasite elde edileceği gözlemlenmiştir.

Yen Lei Voo vd. [18] bu makale, yüksek performanslı çelik lif takviyeli betonarme kirişler üzerine bir test programının sonuçlarını sunmaktadır. Toplam sekiz ön gerilmeli betonarme kiriş test edilmiştir. Deneyel çalışmada ki değişkenler lif tipi ve oranı ve kesme açıklığının kiriş faydalı yüksekliğine oranıdır. Kirişler 8.6 m uzunluğunda ve değişken basit kiriş açıklığına sahiptir. Kirişler 50 mm gövde kalınlığı, 500 mm üst ve alt başlığa sahip I enkesitli kirişlerdir, Çelik lif takviyeli geleneksel betonlu kirişlerin kayma mukavemetinin belirlenmesi için geliştirilen formülasyonlarla, deney sonuçları ve literatürde daha önce test edilen kiriş sonuçları elde edilmiş ve deney ile karşılaştırılmıştır. Formülasyon ve deney sonuçları arasında iyi bir korelasyon elde edilmiştir.

Ciprian T., vd [19] tarafından yapılan bu çalışmada I enkesitli Ultra yüksek dayanımlı kirişlerin kesme davranışı incelenmiştir. Çalışmada 6 ikiz kiriş (toplam 12) test edilmiştir. Kirişlerde 2 farklı lif karışımı ve 3 farklı lif oranının kesme davranışına etkisi incelenmiştir. Kullanılan lif karışımlarından biri hibrit diğeri uzun liflerden oluşmaktadır. Yapılan testler sonucunda lif oranı ile kesme kapasitelerinin düştüğü tespit edilmiştir. Her lif oranı için hibrit lifli kirişler daha iyi bir davranış göstermiştir. %1.5 lif oranına sahip kirişler kesme kırılması gösterirken, %2 ve %2.55 lif oranlı kirişler kesmeli eğilme davranışı sergilemişlerdir. Tüm kirişler için hibrit kirişler uzun kirişlere göre daha iyi bir deformasyon davranış göstermiştir.

In-Hwan Yang, Byung-Suk Kim ve Changbin Joh [20] çalışmalarında Ultra yüksek performanslı lifli betonlu I enkesitli etriyesiz kirişlerin kesme dayanımları ve deformasyon şekillerine ait deneysel sonuçlarını sunmuşlardır. I enkesitli 700 mm yüksekliğe, 50 mm gövde kalınlığına sahip, 3720 mm ve 4700 mm boyunda ki 12 adet

kiriş test edilmiştir. Kirişlerdeki beton dayanımı 160-190 MPa aralığındadır. Deney parametreleri kesme açıklığının etkili derinliğe oranı, lif oranı ve ön germe olup olmamasıdır. Deneylerden ilk çatlak yükünün ve maksimum kesme dayanımının çelik liflerin oranının artması ile yükseldiği belirlenmiştir. Maksimum kesme dayanımı kesme açıklığının etkili derinliğe oranı arttıkça azalmıştır. Kirişlere öngerme vermek ilk çatlak yükünü arttırdığı gibi maksimum kesme kapasitesinin de arttırmıştır. Maksimum kesme durumundaki diyagonal çatlak açıklıkları Şekil 1.7’de verilmiştir.



Şekil 1.7: Ultimate durumdaki diyagonal çatlak açıları.

Raul Zagon, Stijn Matthys ve Zoltan Kiss [21] I enkesitli kirişlerin kesme kapasitelerini belirleyebilmek için 10 adet kiriş test etmişlerdir. Kirişlerin yükseklikleri 400 mm gövde kalınlıkları 50 mm’dir. Kirişlerin toplam boyu ise 4000mm’dir. Kesme kapasitelerine, gövdede boşluk olup olmaması, kesme donatısı ve pilyenin etkileri araştırılmıştır. Kirişlerdeki UYPLB’ dayanımları 140 MPa’dır. Etriyenin ve çelik tellerin beraber kullanıldığı kirişlerde hem kesme hemde eğilme çatlakları oluşmuştur. Çalışma çelik liflerin kesme donatısı olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Kesme açıklığının etkili derinliğe oranı arttıkça kesme dayanımı azalmıştır. Analitik çalışmalarla kirişleri kesme dayanımını veren ifadeler değerlendirilmiş ve yeni bir denklem önerilmiştir.

Jia-Nan Qi, Zhongguo John Ma, Jing-Quan Wang ve Tong-Xu Liu [22] bu çalışmada 11 adet ultra yüksek dayanımlı lifli betonla, yüksek dayanımlı çelik

kullanılarak üretilmiş T enkesitli kirişleri test edilmişlerdir. Test sonuçları, liflerin çatlama sonrası kesme mukavemetinin arttırılmasında, ayrıca ultra yüksek performanslı lifli beton kirişlerin çatlama sonrası deforme olabilirliğinin arttırılmasında da etkili olduğunu göstermiştir. Üç farklı yönetmelikte verilen kesme kapasitesi hesaplama yöntemleri test kirişlerine uygulanıp sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tri Thuong Ngo, Jun Kil Park, Sukhoon Pyo ve Dong Joo Kim [23] tarafından yapılan bu çalışmada donatısız UYPLB'lu kirişlerin kesme kapasitelerini belirlemek için yeni bir kesme test yöntemi geliştirilmiştir. 16 adet kesmeye çalışan dikdörtgen kesitli donatısız ve analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Altı farklı a/d oranı ve üç lif oranı için (lifsiz, %0.5 ve %1.5) yapılmıştır. Yeni test yönteminin kesme dayanımının tayini için yeterli sonuçlar verdiği diğer test yöntemleri ile doğrulanmıştır. Testler sonucunda kesme dayanımının a/d ve lif oranı ile değiştiği belirlenmiştir. Lif oranı arttıkça kesme dayanımı artarken, a/d arttıkça kesme dayanımının azaldığı tespit edilmiştir.

Tamás Mészöly ve Norbert Randl [24] tarafından yapılan bu çalışmada 20 I kesitli farklı kesme donatına sahip (etriyesi veya $\phi 10$ donatılı aralıkları 125-300 arasında değişen) ve farklı lif içeriği olan kirişler test edilmiştir. Kirişlerin üretildiği UYPBL'nin ortalama basınç dayanımı 170 MPa'dır. Tüm kirişlerde kesme kırılması gözlenmiştir. Kesme donatılarının aralıklarına bağlı olarak kesme kapasitenin %60-80'inde kesme donatıları akmıştır. Etriyelerin sayısının arttırılmasını kesme kapasitesine katkısı %1 veya %2 lif ilavesine göre daha az olduğu belirlenmiştir. Kesme kapasitesine liflerin katkısı daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Lifli kirişlerde ilk kesme çatlağının çok daha yüksek yük seviyelerinde meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Masoud Pourbaba, Abdolreza Joghataie ve Amir Mirmiran [25] tarafından yapılan bu çalışmada 38 adet 19'u geleneksel beton ile 19'u UYPLB kiriş test edilmiştir. Kirişler dikdörtgen enkesitli ve %2.2 ila %7.8 donatı oranına sahiptir. Test kirişlerinde a/d oranı sırasıyla 0.9, 1.2 ve 2.8'dir. Kirişlerdeki lif oranı ise %6.4'dür. Ultra yüksek dayanımlı çelik lif katkılı beton lifsiz betonarme kirişlere göre kesme kapasitelerinin yaklaşık 3,5 kat arttırdığı olduğu gözlemlenmiştir. Test edilen kirişlerin kırılma şekilleri Şekil 1.8'de verilmiştir.



Şekil 1.8: Kirişlerin kırılma şekilleri [25].

Altuğ Yavaş, Umut Hasgöl, Kaan Türker ve Tamer Birol [26] tarafından yapılan bu çalışmada 16 adet ultra yüksek dayanımlı lifli beton ile hazırlanmış dikdörtgen kesitli kirişlerin boyuna donatı oranı sabit tutularak farklı lif tipleri ve lif oranlarına göre testleri yapılmış sonuçları irdelenmiştir. Deney sonuçları, 13 mm ‘lik düz lifin, değerlendirilen parametreler açısından en etkili lif türü olduğunu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, ultra yüksek performanslı fiber betonarme kirişe hacimce %1,5 olan 13 mm düz fiber eklenmesi, kırılma modunu kayma donatı olmadan davranışı eğilmeye değiştirdiğini gözlemlemişlerdir.

Ali, Alamir, Hamad [27] tarafından yapılan çalışmada, Reaktif Pudra Betonu (RPB) ile üretilmiş çelik lifli betonarme kirişlerin ilk kesme çatlağının yükü ve göçme yükü incelenmiştir. Bunun için, T en kesitli 6 adet test kirişi üretilmiş ve bunların göçme durumuna kadar dört noktalı eğilme testleri yapılmıştır. RPB üretiminde, %1,0 ve %2,0 hacimsel çelik lif oranında 13 mm’lik düz çelik lifler kullanılmıştır. Beton basınç dayanımları 127-148,5 MPa arasındadır. İncelenen kirişler için, çelik lif oranı ve/veya micro silica miktarının artmasıyla betonun basınç dayanımının arttığı, lif oranının %1’den %2’ye artmasıyla elastisite modülünün yaklaşık 3 kat arttığı belirlenmiştir. Kullanılan lif oranının ilk çatlak yükünü değiştirmede ancak, çatlak ilerleme hızında ve kırılma yükünde önemli etkisinin olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, a/d oranı arttıkça kesme çatlak yükünün ve göçme yükünün azaldığı belirlenmiştir.

Kamal, Safan, Etman, Salama [28] tarafından yapılan çalışmada, lif çeşidinin UYPLB’den üretilen kiriş elemanların kesme durumu açısından etkisi incelenmiştir. a/d oranı 2 olarak seçilmiştir. Parametreler olarak donatı oranı, kesme donatısı olup olmaması, lif çeşidi (çelik, sentetik, lifsiz durum) belirlenmiştir. Nihai göçme yüküne

kadar yüklenen kirişlerde; ilk çatlak yükleri, çatlak yerleri ve kesme dayanımlarında artış gözlenmiştir.

1.3 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada, farklı kesme açıklığının UYPLB ile üretilen I en kesitli enine donatısız kirişlerin davranışının deneysel incelenmesi amaçlanmıştır.

Çalışmada 8 adet gövde kalınlığı 5 cm olan I en kesitli 2500 mm boyunda enine donatısız 8 kirişe eğilme deneyleri yapılmıştır. Kirişlerde iki farklı a/d değeri dört farklı donatı oranı, iki farklı lif tipi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar daha önce testleri yapılan 16 kiriş sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Kirişlerin davranışları; yük taşıma kapasitesi, yer değiştirme sünekliği, çatlak genişliği ve dağılımı parametreleri açısından değerlendirilmiştir

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

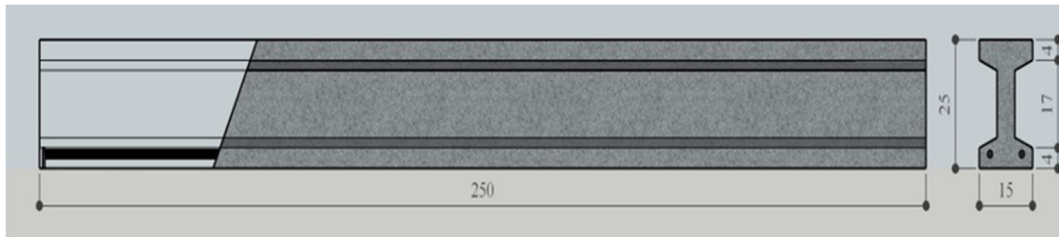
2.1 Numune Özellikleri

Çalışmada toplam 8 adet kiriş kesme açıklığının kiriş faydalı yüksekliğinin oranı (a/d) 4.45 ve 3.12 olacak şekilde iki grup olarak etriye kullanılmadan hazırlanmış ve dört noktalı yükleme altındaki eğilme ve kesme davranışları incelenmiştir. Her bir grupta dört farklı çekme donatısı oranı için iki farklı lif tipine sahip UYPLB karışımları hazırlanmıştır. Test kirişlerine ait donatı ve lif içerikleri Tablo 2.1’de sunulmuştur.

Tablo 2.1: Test kirişlerinin donatı ve çelik lif içerikleri.

Grup	Kiriş Kodu	Çekme Dontısı Oranı (ρ)	Lif Tipi	Lif Oranı	Lif Oranı
A	A10F30	2 ϕ 10 / (%0.8)	4.45	30 mm kancalı makro	%2
	A12F30	2 ϕ 12 / (%1.2)			
	A14F30	2 ϕ 14 / (%1.7)			
	A16F30	2 ϕ 16 / (%2.2)			
B	B10F13	2 ϕ 10 / (%0.8)	3.12	13 mm mikro	%2
	B12F13	2 ϕ 12 / (%1.2)			
	B14F13	2 ϕ 14 / (%1.7)			
	B16F13	2 ϕ 16 / (%2.2)			

Kirişler a/d oranına bağlı olmak üzere A ve B olarak gruplandırılmış ve çekme donatış oranları ve çelik lif içerikleri kiriş isimlerinde belirtilmiştir. Her bir A ve B grubu kiriş dört farklı donatı oranına sahiptir. Test kirişlerine ait boyutlar ve tipik donatı yerleşim detayı Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1: Test kirişlerine ait boyutlar ve donatı yerleşimi.

2.2 Test Numunelerinin Üretilmesi

Test kirişlerin üretilmesi için özel olarak çelik bir kalıp sistemi tasarlanmıştır. Kalıp sistemi 3 mm kalınlığında ve 2500 mm boyundaki çelik plakaların kıvrılarak kiriş yan yüzeylerine oturtulması ile oluşturulmuştur. Aynı kalınlıkta çelik plaka kiriş kalıbının alt tabanı olarak kullanılmıştır. Numunelerin kalıptan rahatlıkla çıkarılabilmesi için cıvata ve somunlu birleşimler kullanılmıştır. Kiriş üretiminde kullanılan UYPLB akışkan bir kıvamda olduğundan, betonun kalıp parçalarının arasından sızmasının engellenebilmesi için iki adet gergi elemanı ile kullanılmıştır. Üretilen I enkesitli kiriş kalıpları Şekil 2.2 de gösterilmiştir.



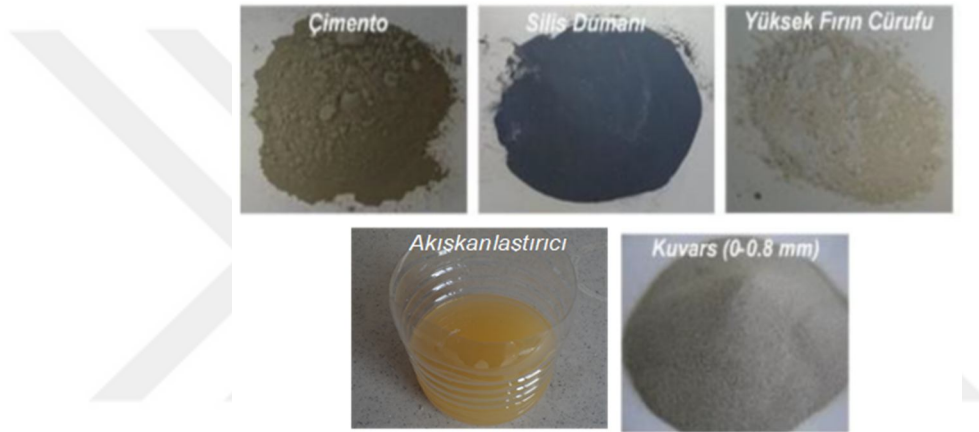
Şekil 2.2: Çelik kalıplar.

2.3 Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) Üretilmesi

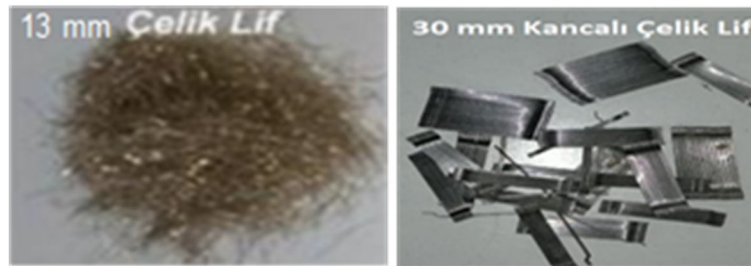
UYPLB çimento, silis dumanı, ince agrega, su, süper akışkanlaştırıcı katkı ve çelik lif kullanılarak üretilen özel bir betondur. Çok düşük su/bağlayıcı oranına sahip olması nedeniyle yüksek oranda süper akışkanlaştırıcı kullanılması gerekmektedir. Üretilen kirişlerin en kesitleri I formunda olduğundan kendiliğinden yerleşebilen ve lif taşıyabilen bir beton üretimi hedeflenmiştir.

2.4 Ultra Yüksek Performans Lifli Beton (UYPLB) Karışımı

Bu çalışma kapsamında ortalama 150 MPa basınç dayanıma sahip Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (UYPLB) ile aynı karışıma sahip lifsiz betonun üretilmesi hedeflenmiştir. Betonun bağlayıcı kısmı CEM I 42.5 R sınıfı portland çimentosu, yüksek fırın cürufu ve silis dumanından oluşmaktadır. Agrega olarak dayanımı için 0-0.8 mm dane çapına sahip yüksek dayanımlı kuvars agregası kullanılmıştır. Yüksek basınç dayanımı için UYPLB’da çok düşük su/bağlayıcı oranına kullanılması nedeniyle işlenebilirliğin sağlanması için polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır.



Şekil 2.3: Betonu oluşturan bileşenler.



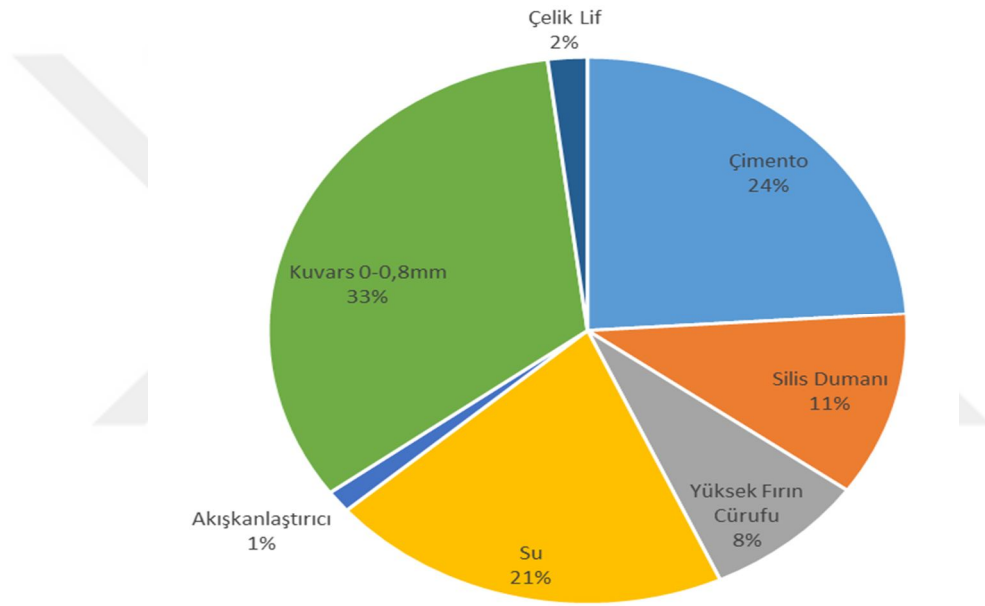
Şekil 2.4: Kullanılan lif tipleri.

Çelik lif olarak 30 mm kancalı makro ve 13mm düz mikro lif kullanılmıştır. Bunlardan birincisi 13 mm uzunluğunda ve 0.16 mm çapında mikro lif, ikincisi 60mm uzunluğunda 0.55mm çapında makro liflerdir. Bu liflerin mekanik özellikleri Tablo 2.2’de belirtilmiştir.

Tablo 2.2: Çelik liflerin boyutları ve mekanik özellikleri.

Lif tipi	Çap (mm)	Boy (mm)	Narinlik (Boy/Çap)	Yoğunluk (gr/cm ³)	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	Elastisite Modülü (N/mm ²)
Düz Mikro	0.16	13	81	7.8	2500	210000
Kancalı Makro	0.55	60	55	7.8	1345	210000

UYPLB’u oluşturan bileşenlerin hacimce oranları Şekil 2.5’te verilmiştir. Toplam karışımın % 43 ünü çimento, silis dumanı ve yüksek fırın curufundan oluşan bağlayıcı kısım oluşturmaktadır. Su/bağlayıcı oranı 0.16’dır.



Şekil 2.5: Betonu oluşturan bileşenlerin hacimce yüzdeleri.

UYPLB’nun oluşturan bağlayıcısını oluşturan bileşenlerden Portland çimentosu, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşenleri Tablo 2.3’te verilmiştir.

Tablo 2.3: Çimento, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşeni.

		Çimento	Silis Dumanı	Yüksek Fırın Cürufu
Özgöl Ağırlık (kg/m ³)		3000	2200	2900
Kimyasal Bileşen (%)	SiO ₂	19.8	91.57	41.49
	Al ₂ O ₃	5.47	0.38	16.34
	Fe ₂ O ₃	3.46	0.15	0.61
	CaO	64.44	0.32	29.26
	MgO	1.30	4.05	7.68
	SO ₃	2.67	-	1.90
	Na ₂ O	0.40	0.3	0.80
	K ₂ O	0.67	1.5	1.10
	Cl	0.012	-	0.01
	Cr ₂ O ₃	-	0.32	-
	C ₃ S	58.47	-	-
	C ₂ S	12.83	-	-

2.1 Test Kirişleri İçin Donatıların Hazırlanması

Bu çalışmada eğilme etkisi altında, kirişlerde oluşacak çekme kuvvetini karşılanması amacıyla çekme bölgesine donatı yerleştirilmiştir. Kirişler dört farklı donatı oranına sahiptir. (ρ =% 0.8, %1.2, %1.7 ve %2.2). Kiriş numuneleri I en kesite sahip olduğundan donatıların uçlarına kanca yapılamamıştır. Bu nedenle donatıların her iki ucuna aderansı sağlayabilmek için 5 mm kalınlığından 130x40 mm boyutlarında plakalar kaynaklanmıştır (Şekil 2.6).



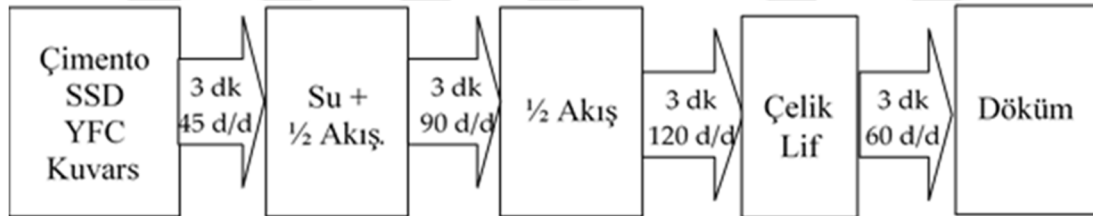
Şekil 2.6: Donatıların hazırlanması.

Donatılardaki şekil değiştirmeleri belirleyebilmek için orta bölgesine şekildeğiştirme ölçerler yapıştırılmıştır. Şekildeğiştirme ölçerin hasar görmemesi için ilgili bölge özel olarak sarılmıştır (Şekil 2.6).

2.2 Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton ile Betonarme Kirişlerin Üretilmesi

I enkesitli test kirişlerinin ve betonun mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılacak numunelerin üretimi için 200 dm³ kapasiteli bir panmikser kullanılmıştır. Boşluksuz ve homojen bir karışım hazırlayabilmek için panmikserin devri anlık olarak ayarlanabilmektedir.

Beton için gerekli malzemeler karışım oranlarına (Şekil 2.5) göre tartıldıktan sonra bağlayıcılar (çimento, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı) ve agrega (kuvars) panmiksere konularak 45 devir/dakika hızla 3 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra akışkanlaştırıcının yarısı ile birlikte su, kuru karışıma ilave edilerek 90 devir/dakika 3 dakika daha karıştırılmıştır. Karışım topaklandığında, akışkanlaştırıcının kalan yarısını dökülme ve 3 dakika boyunca 120 devir/dakika hızla karıştırılarak akıcı bir kıvamın elde edilmesi sağlanmaktadır. Bu aşamada hız 60 devir/dakikaya düşürülerek çelik lifler karışıma ilave edilmektedir. 3 dakika daha karıştırılan betonun karıştırma işlemi tamamlanmaktadır. Beton üretimine ait akış şeması Şekil 2.7 de gösterilmiştir.



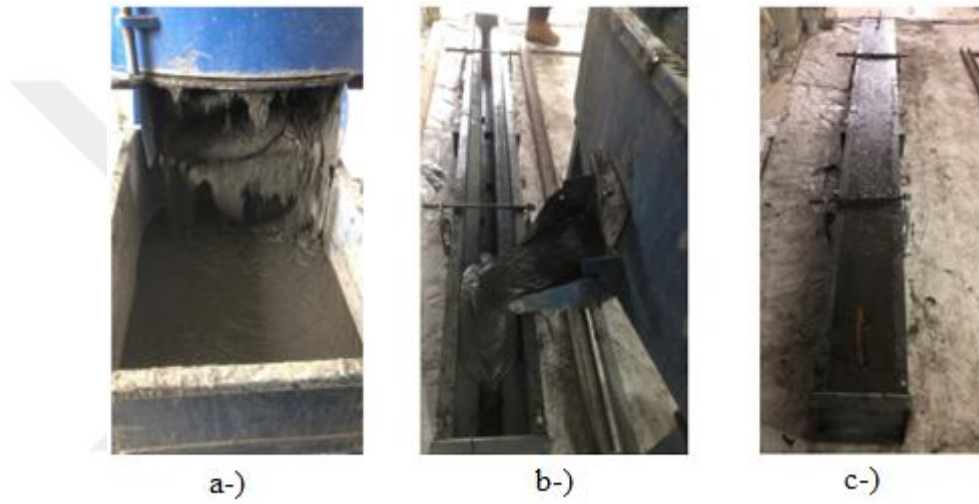
Şekil 2.7: Beton üretimi akış şeması.



Şekil 2.8: Beton üretimi, a-)Topaklanma, b-)Akışkan kıvam, c-)Liflerin eklenmesi .

UYPLB'un kuru karışımına su ve akışkanlaştırıcının yarısı ilave edilip karıştırıldığında, önce tüm malzeme ıslanır ve tamamı bir araya toplanarak topaklanır. Bu aşamadan sonra ilave edilen akışkanlaştırıcının etkisini arttırmak için devir yükseltilir. Bu aşamadan sonra beton sıvı hale gelir ve lifler ilave edilir (Şekil2.8).

Hazırlanan lifli beton, özel bir beton arabası yardımıyla kiriş kalıplarına dökülmüştür (Şekil 2.9a). Beton akıcı kıvamda (kendiliğinden yerleşen) olduğu için ayrıca bir vibrasyon uygulanmasına gerek kalmamaktadır (Şekil 2.9/b).



Şekil 2.9: Kiriş üretimi, a-)Beton arabasına döküm, b-)Kirişe döküm, c-)Dökümü tamamlanan kiriş.

Üretilen betonun ortalama basınç ve çekme dayanımlarını belirlenmesi amacıyla test kirişleri ile birlikte 6 adet 100x100x100 mm küp numuneler hazırlanmıştır (Şekil 2.10).



Şekil 2.10: Beton numuneleri.

Hazırlanan test kirişleri ve numuneler döküm sonrası plastik bir örtü ile sarılarak su kaybını (buharlaşma) önlemek amacıyla 24 saat kalıpta bekletmiştir (Şekil 2.11). Daha sonra, kirişler ve numuneler özel olarak hazırlanmış kür kabine yerleştirilerek 90°C buharda bir gün kürlenmiştir (Şekil 2.12). Betonda termal şok yaşanmaması için kür kabini kapatılıp numunelerin kabin içinde numunelerin soğuması sağlanmış ve kür kabininden çıkarılarak test gününe kadar (28-50 gün) laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Buhar kürü uygulanması sayesinde test kirişleri 7 günde nihai dayanımlarına ulaşmış ve testler için bekleme süresi azalmıştır.



Şekil 2.11: Kirişlerin döküm sonrası korunması.

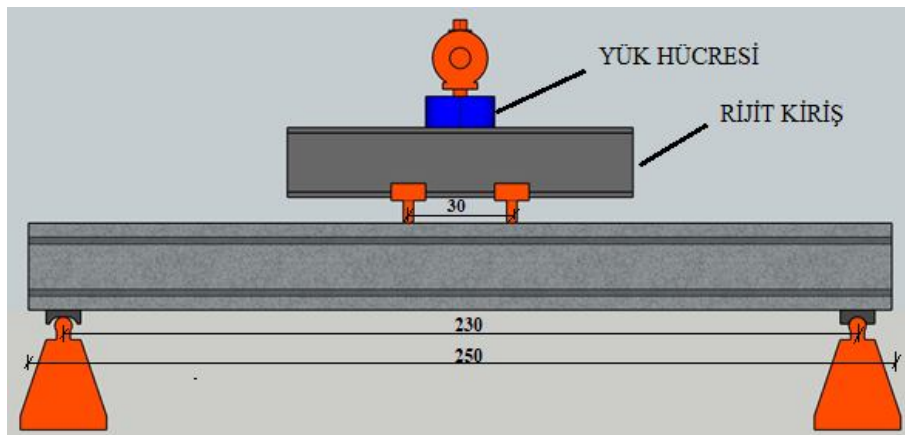


Şekil 2.12: Kür kabini.

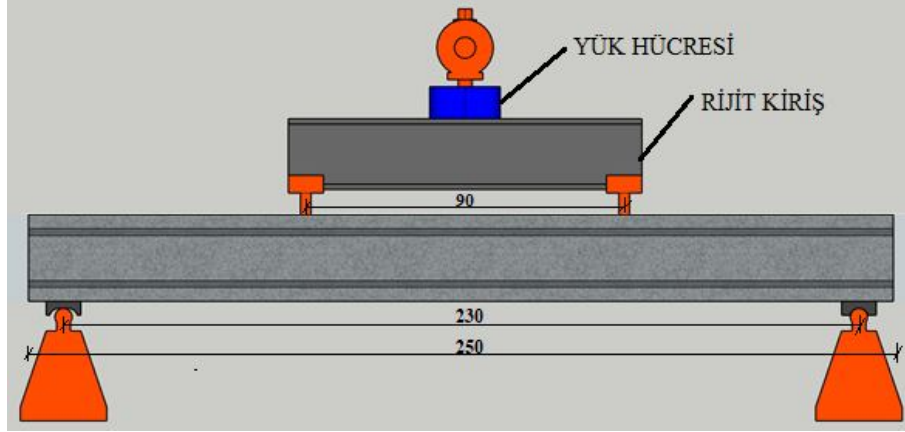
2.3 Test Düzeneği ve Ölçerler

Tez kapsamında üretilen kirişlerin eğilme testleri Balıkesir Üniversitesi Prof. Dr. Şerif SAYLAN Yapı Mekaniği Laboratuvarında bulunan 500 kN kapasiteli kiriş eğilme test düzeneğinde yapılmıştır. Kirişlere dört noktalı yükleme altında test edilmiştir. Bu noktalardan ikisi hidrolik yük verenin kirişe temas ettiği noktalar, diğer ikisi ise biri kayıcı olan mesnetlerdir.

Yük rijit çelik kiriş aracılığı aralarında belirli bir mesafe (30 cm ve 90 cm) olan iki eşit yüke bölünerek aktarılmıştır ve farklı a/d oranlarının oluşması sağlanmıştır. A grubu kirişlerin testinde 30 cm aralık (Şekil 2.13), B grubu kirişlerin testinde 90 cm aralık (Şekil 2.14) olacak şekilde testler gerçekleştirilmiştir.

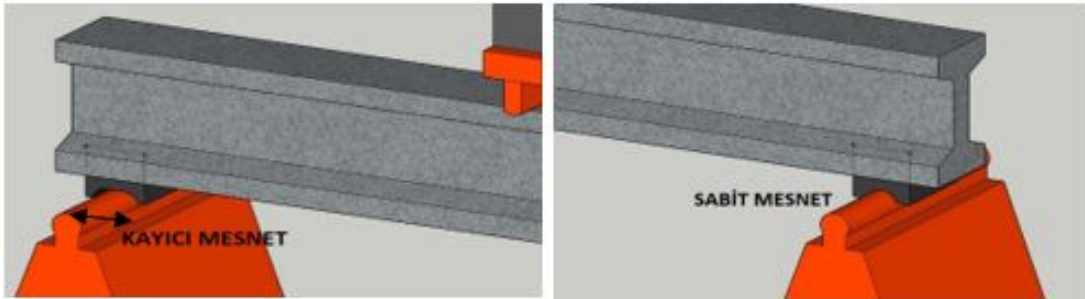


Şekil 2.13: A grubu kirişler için eğilme test düzeneği.



Şekil 2.14: B grubu kirişler için eğilme test düzeneği.

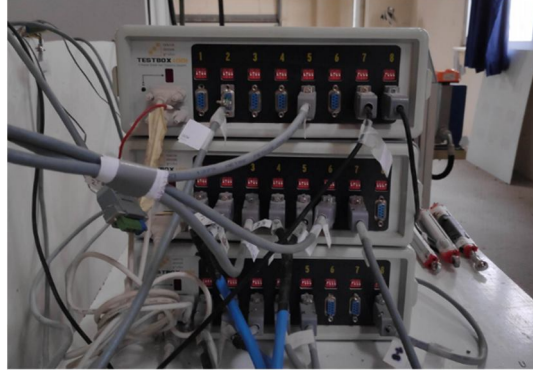
Kiriş mesnetleri özel olarak tasarlanmıştır. Farklı kirişlerin test edilebilmesi için mesnetler altına yerleştirilen profiller üzerinde hareket edebilmekte ve aralarındaki mesafeler ayarlanabilmektedir. Mesnetlerin üzerine 10 cm genişliğinde özel olarak işlenmiş plakalar yerleştirilmiştir (Şekil 2.15). Plakalardan biri mesnetten serbestçe dönebilmesi, diğer plakada mesnetten hem serbestçe dönmesi hem de kayabilmesini sağlamaktadır. Ayrıca yükler altında kiriş numunelerinde lokal ezilme engellenmektedir.



Şekil 2.15: Mesnet detayları.

Test kirişlerinin altına açıklık ortasındaki düşey yerdeğiştirmeyi ölçebilmek amacıyla bir potansiyometrik cetvel yerleştirilmiştir. Hidrolik piston ve rijit çelik kiriş arasına mafsallı olarak yerleştirilen yük hücresi ile de kirişe uygulanan yük

ölçülmüştür. Ölçülen yük ve yer değiştirme veri toplama sistemi ile bilgisayara aktarılmıştır (şekil 2.16).



şekil 2.16: Veri toplama sistemi.

3. TEST KİRİŞLERİNİN SONUÇLARI

Bu bölümde A ve B grubu test kirişlerin dört noktalı eğilme testlerinin sonuçlarına yer verilmiştir. A grubu kirişler %2 oranında 30 mm kancalı makro lif ile üretilip, kesme açıklığı oranı (a/d) 4.45' tir. B grubu kirişler %2 oranında 13 mm mikro lif ile üretilip, kesme açıklığı oranı (a/d) 3.13'tir. Test sonuçları betonun mekanik özellikleri ve test kirişlerinin sonuçları olarak iki ayrı grupta ele alınmıştır. Tüm kirişlerin test sonuçları; yük-yer değiştirme davranışı, yer değiştirme sünekliği, yük taşıma kapasitesi, ilk çatlak yükü, çatlak dağılımı ve kırılma şekilleri açısından değerlendirilmiştir.

3.1 Beton ve Donatı Test Sonuçları

UYPLB' un beton basınç dayanımlarını belirlemek için 100x100x100 mm' lik küp numuneler kullanılmıştır. Eksenel basınç testleri 3000 kN kapasiteli basınç presinde yapılmıştır (Şekil 3.1). Her bir kiriş için altı adet küp numune kirişlerin test gününde deneye tabi tutulmuştur ve ortalama değerleri Tablo 3.1' de verilmiştir.



Şekil 3.1: Beton basınç test düzeneği (sol) ve küp numuneler (sağ).

Tablo 3.1: Ortalama basınç dayanımları.

Grup No	Kiriş Kodu	Basınç Dayanımı (MPa)
A	A10F30	151
	A12F30	152
	A14F30	150
	A16F30	151
B	B10F13	145
	B12F13	152
	B14F13	161
	B16F13	150

Test kirişlerinde kullanılan boyuna donatıların her birinden 30 cm boyunda 3 adet çekme numunesi alınmıştır. Her bir donatı çapı için 10 boy donatıdan alınan numuneler Balıkesir Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan 250 kN kapasiteli eksenel çekme cihazında yapılmıştır (Şekil3.2). Donatı numunelerine ait mekanik özellikler Tablo 3.2 de verilmiştir.



Şekil 3.2: Eksenel çekme test düzeneği.

Tablo 3.2: Boyuna donatılara ait mekanik özellikler.

Grup No	Kiriş Kodu	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
A	A10F30	469	591	12
	A12F30	471	582	12
	A14F30	471	591	12
	A16F30	471	591	12
B	B10F13	470	591	12
	B12F13	470	590	12
	B14F13	470	590	12
	B16F13	472	590	12

3.2 Test Kirişlerinin Sonuçları

Test kirişlerine ait sonuçlar kesme açıklığı oranlarına (a/d) göre iki grup şeklinde sunulmuştur.

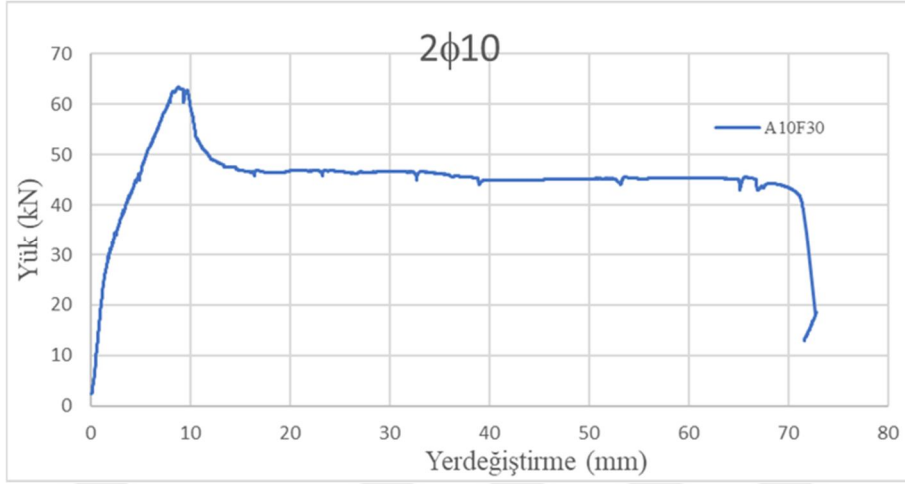
3.2.1 A Grubu Test Kirişlerinin Sonuçları

A grubu test kirişlerinin dört noktalı eğileme testleri sonucu elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkileri, yük taşıma kapasiteleri, yerdeğiştirme süneklikleri ve çatlama davranışlarına ait sonuçları aşağıda verilmiştir.

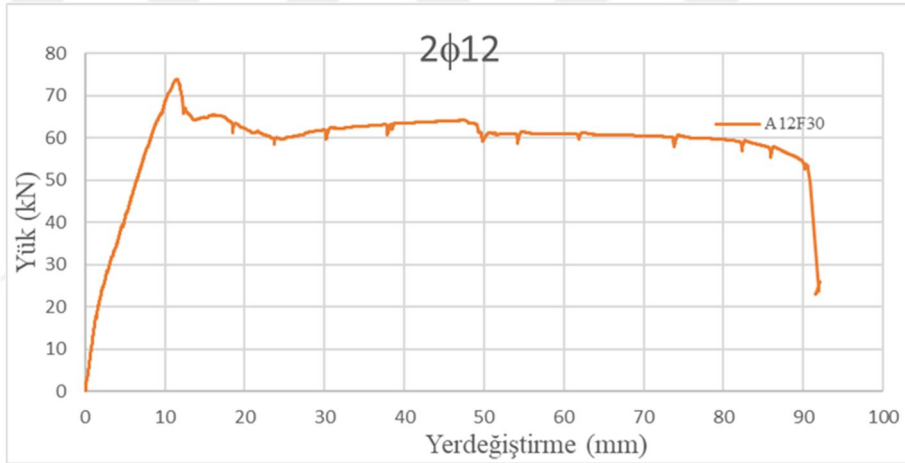
3.2.1.1 Yük-Yer Değiştirme Davranışı

Donatı oranının yük-yerdeğiştirmeye davranışına etkilerinin incelenmesi amacıyla 4 farklı donatı oranına ait grafikler bir arada verilmiştir. A16F30 kirişinde kesme kırılması meydana gelmiştir. En büyük yerdeğiştirme değeri eğilme kırılmasının meydana geldiği A12F30 kirişinde gözlemlenmiştir. Donatı oranı en düşük olan A10F30 kirişinde tepe yükünden sonra yaklaşık 20 kN' luk bir yük azalması gözlemlenmesine rağmen yük 45 kN civarında sabit kalmıştır. A12F30 kirişinde 15 kN' luk bir azalma, A14F30'te ise 10 kN' luk bir azalma meydana gelmiştir. Her iki kirişte bu azalmaya rağmen 70 mm yer-değiştirme değeri elde

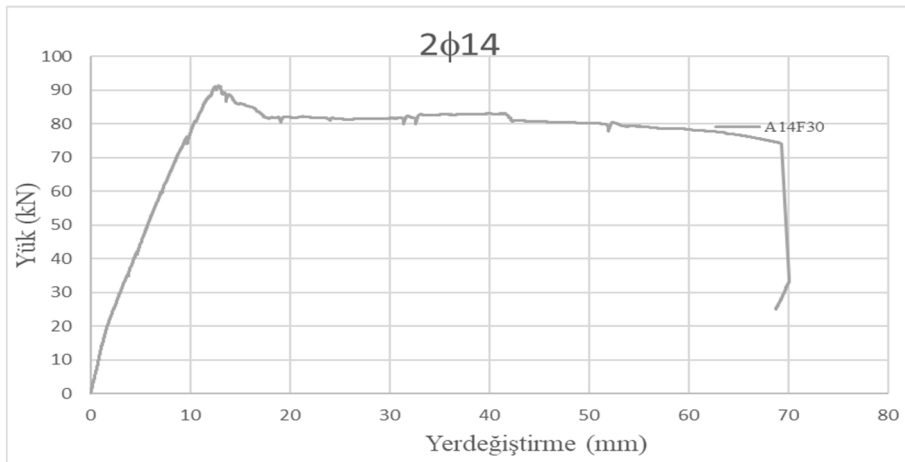
edilebilmiştir. A16F30 kirişinde kesme kırılması yaşandığından herhangi bir yük azalması görülmemiştir.



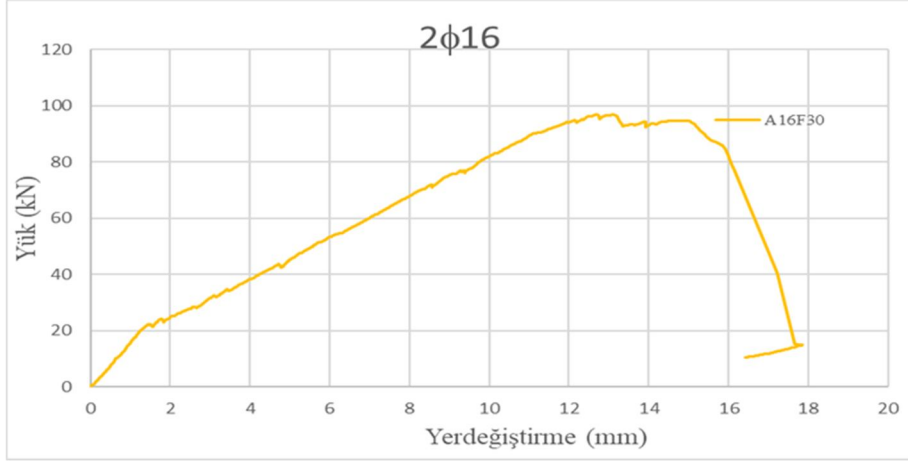
Şekil 3.3: A Grubu 2φ10 donatılı kirişin yük-yer değiştirme grafiği.



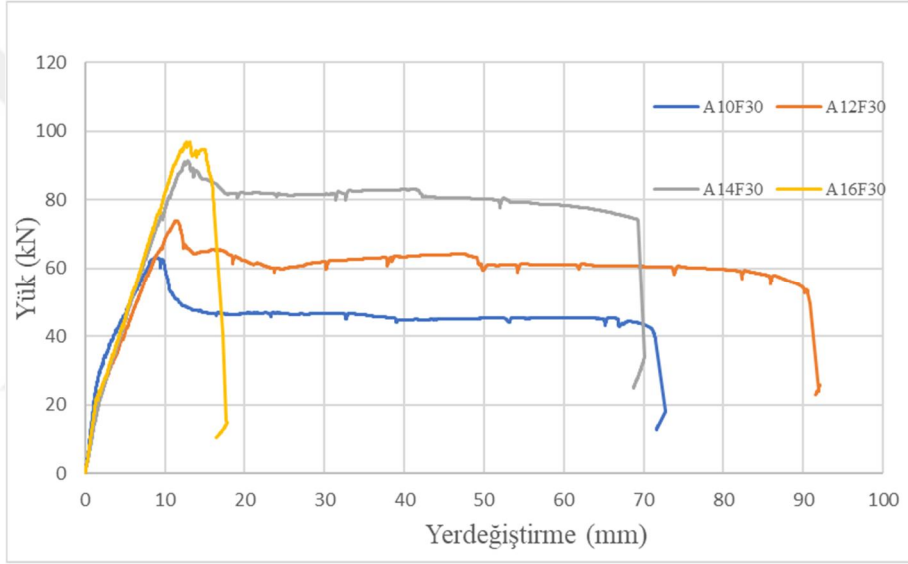
Şekil 3.4: A grubu 2φ12 donatılı kirişin yük-yer değiştirme grafiği.



Şekil 3.5: A grubu 2φ14 donatılı kirişin yük-yer değiştirme grafiği.

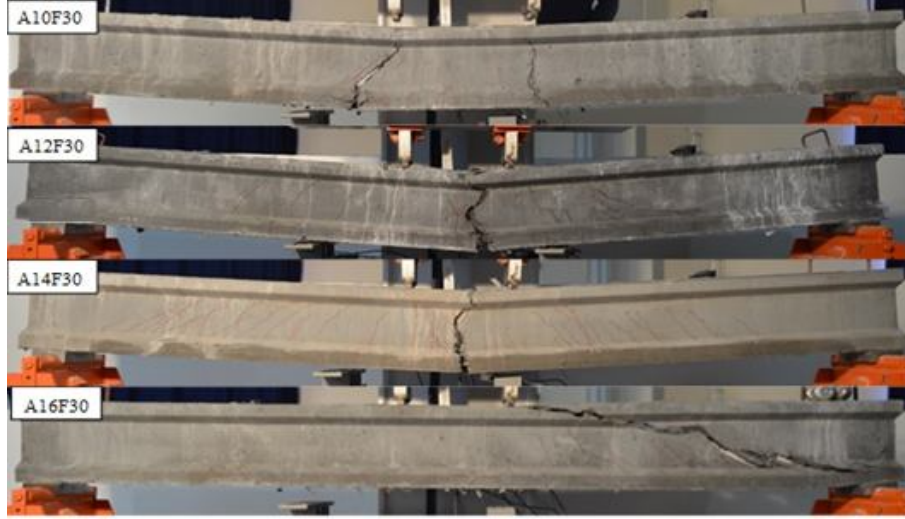


Şekil 3.6: A grubu 2φ16 donatılı kirişin yük-yer değiştirme grafiği.



Şekil 3.7: A grubu kirişlere ait yük-yer değiştirme grafikleri.

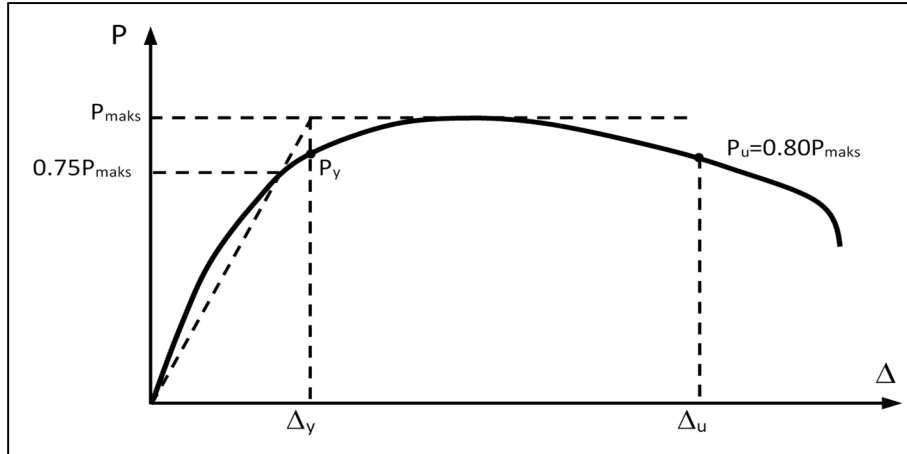
Test edilen A grubu kirişler incelendiğinde A10F30 donatılı kirişte yüklerin altında 2 adet eğilme çatlağı oluşmuş ve davranış soldaki çatlakta donatı kopması ile sonuçlanmıştır. A12F30 ve A14F30 kirişlerinde yükler arasında tek çatlak oluşmuş ve davranış beton ezilmesi ile sonuçlanmıştır. A16F30 kirişinde ise kırılması meydana gelmiştir.



Şekil 3.8: A grubu kirişlerin kırılma şekilleri.

3.2.1.2 Yük Taşıma Kapasiteleri ve Yer Değiştirme Süneklikleri

UYPLB'lu I en kesitli kirişlerde yer değiştirme sünekliği testlerden elde edilen yük-düşey yer değiştirme davranışları kullanılarak belirlenmiştir. Park (1989) prosedürü (Şekil 3.9) kullanılarak akma yükü (P_y), akma yer değiştirmesi (Δ_y), maksimum yer değiştirmedeki yük taşıma kapasitesi (P_u) ve maksimum yer değiştirme (Δ_u) değerleri elde edilmiştir [29].



Şekil 3.9: Yük-düşey yerdeğiştirme davranışına ait karakteristik değerler [14].

A grubu test kirişleri için yer değiştirme süneklikleri ve diğer karakteristik değerler Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3: A grubu kirişlerde yerdeğiştirme süneklikleri ve diğer karakteristik değerleri.

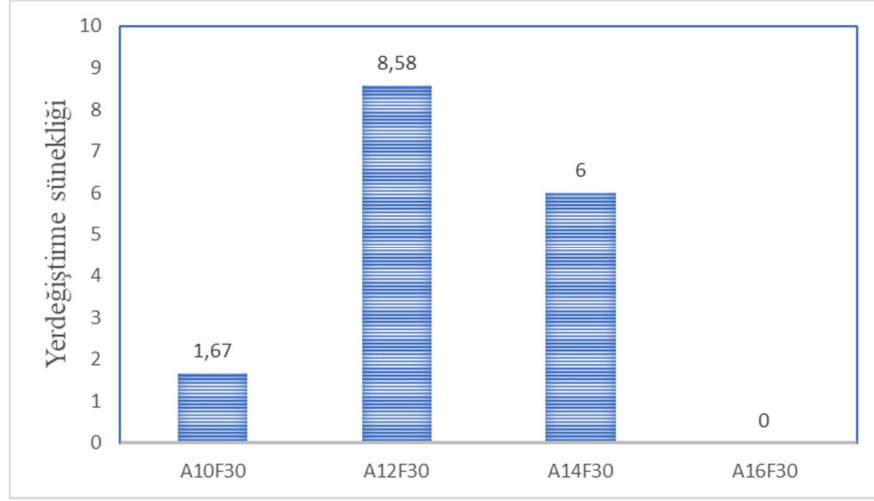
Kiriş Kodu	P_{maks} (kN)	P_u (kN)	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	μ	Kırılma Şekli
A10F30	63.41	50.73	6.91	11.53	1.67	Eğilme
A12F30	73.98	59.19	9.81	84.23	8.58	Eğilme
A14F30	91.29	73.03	11.24	67.45	6.00	Eğilme
A16F30	96.90	-	11.59	-	-	Kesme

A grubu, 30 mm kancalı makro lif ile hazırlanan UYPLB'un 4 farklı donatı oranı için yük taşıma kapasiteleri Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10: A grubu kirişlerin yük taşıma kapasiteleri.

Bu kirişlerden beklendiği gibi en yüksek donatı oranına sahip A16F30 kirişi maksimum yük taşıma kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 3.11: A grubu kirişlerin yer değiştirme sünekliği.

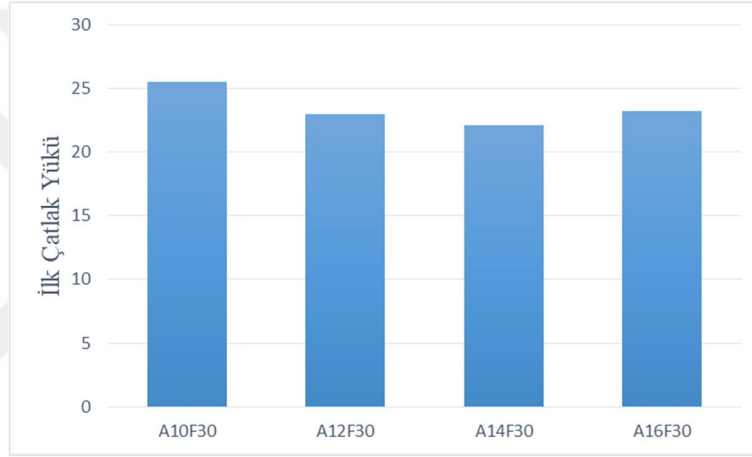
A16F30 kirişinde kesme kırılması gerçekleştiğinden yer değiştirme sünekliği hesaplanamamıştır. Maksimum yer değiştirme sünekliğini eğilme kırılması yaşayan A12F30 kirişinde elde edilmiştir. A10F30 kirişinde sünekliğin daha düşük olmasının sebebi yük-yer değiştirme grafiğinden de görüleceği gibi tepe noktasından sonraki azalmanın çok büyük olmasından kaynaklanmaktadır.

3.2.1.3 Kirişlerinin Çatlak Davranışları

Test sırasında ilk çatlağın oluştuğu yük ve yük-yer değiştirme davranışının L/500'lük ve L/100'lük sehim değerlerinde çatlak sayıları ve çatlak genişlikleri belirlenmiştir. Çatlak genişlikleri ilgili yer değiştirmelerde deney durdurularak çatlak mikroskobu ile ölçülerek belirlenmiştir (Şekil 3.12). A grubu kirişleri için ilk çatlak yükü Şekil 3.13'te verilmiştir.

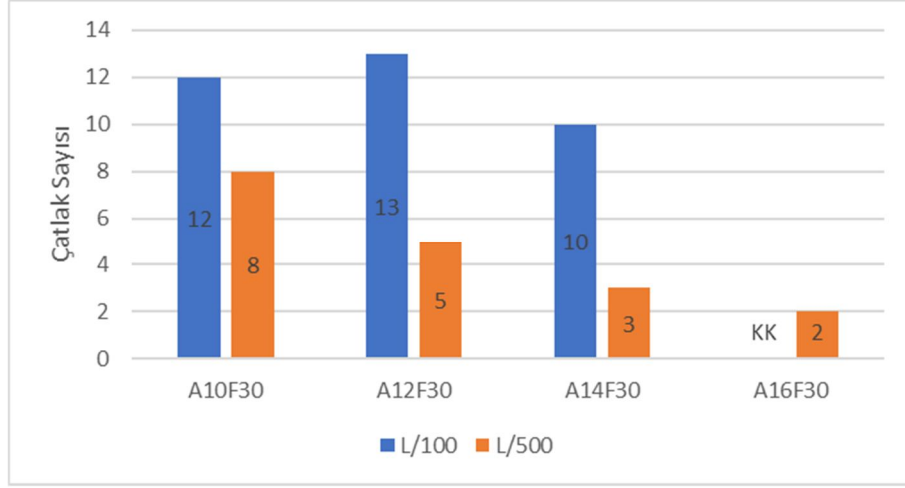


Şekil 3.12: Çatlak genişliğinin ölçülmesi.



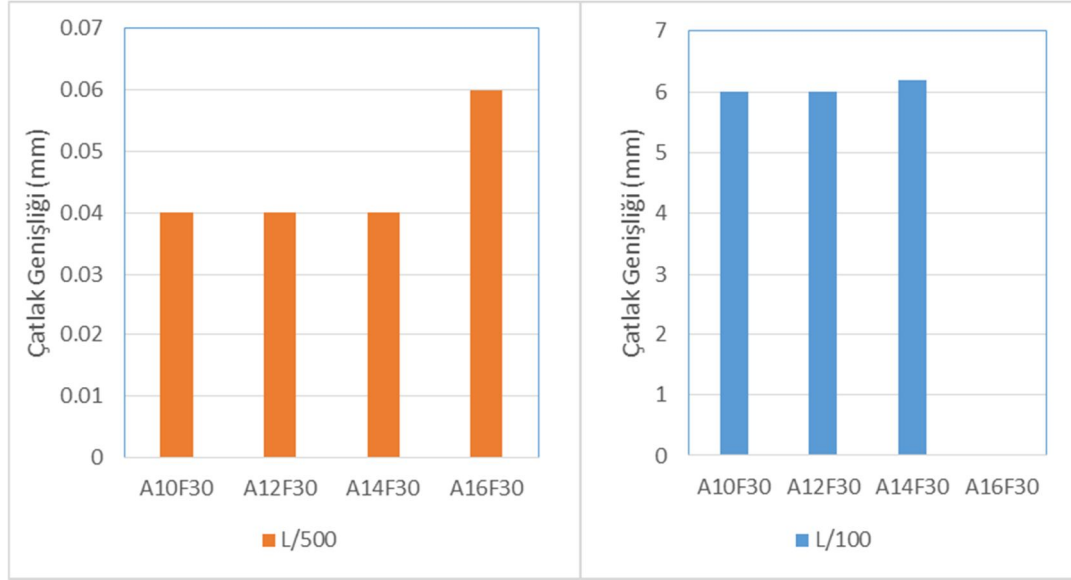
Şekil 3.13: A grubu kirişler için ilk çatlak yükleri.

A grubu için L/500 ve L/100 sehim değerlerindeki çatlak sayıları şekil 3.14’te verilmiştir.



Şekil 3.14: A grubu kirişlerin L/500 ve L/100 için çatlak sayıları.

A grubu için L/500 ve L/100 sehim değerlerindeki çatlak genişlikleri Şekil 3.15’de verilmiştir.

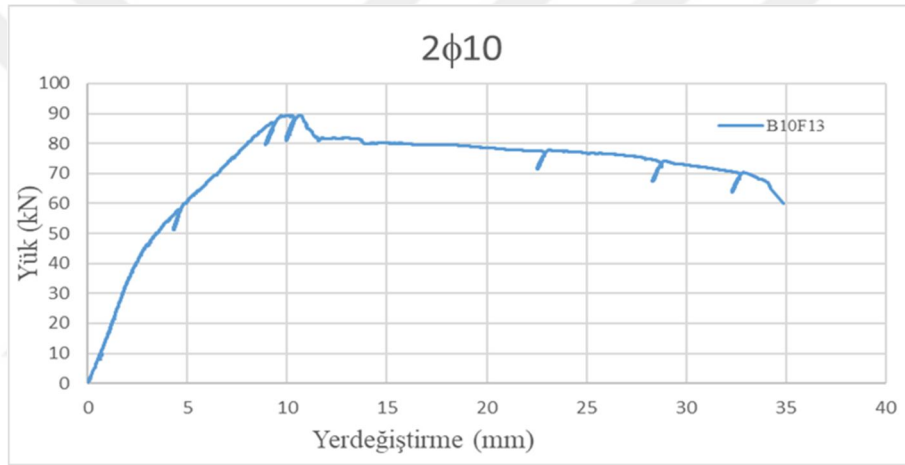


Şekil 3.15: A grubu kirişlerin L/500 ve L/100 için çatlak genişlikleri.

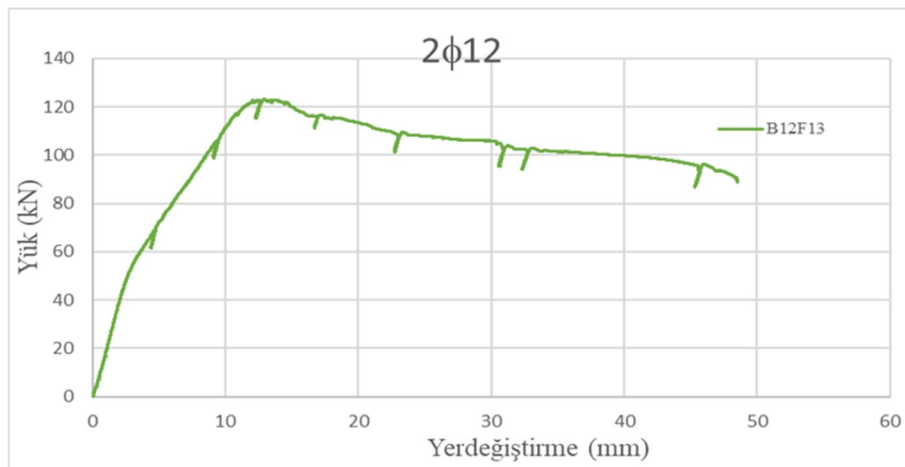
3.2.2 B Grubu Test Kirişleri Sonuçları

3.2.2.1 Yük Yer Değiştirme Davranışı

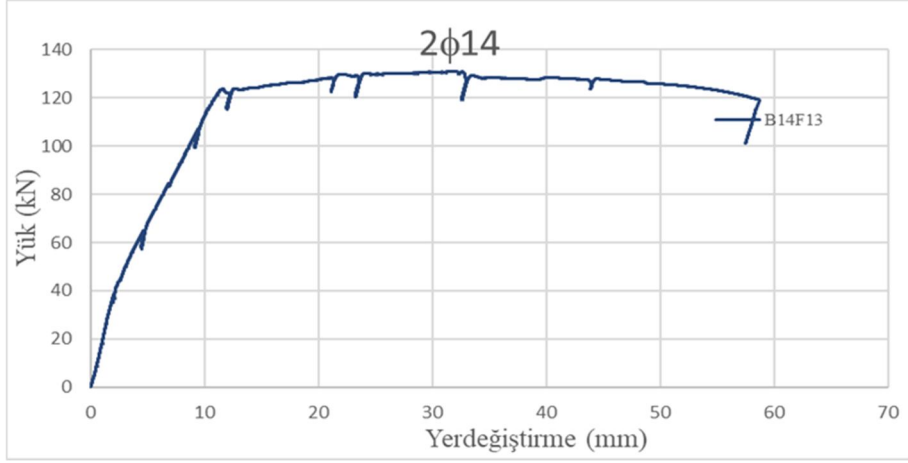
B grubu kirişlere ait yük-yerdeğiştirme grafikleri yukarıda verilmiştir. B10F13 kirişinde maksimum yük kapasitesi ve maksimum yerdeğiştirme gözlemlenmiştir. Donatı oranı arttıkça maksimum yerdeğiştirme artmıştır. Kirişlerin tamamında eğilme davranışı gözlenmiştir. B14F13 kirişi hariç tüm kirişlerde tepe yükünden sonra yükte azalma gözlenmiştir. Ancak azalmalar $2\phi 10$ ve $2\phi 14$ donatıya sahip kirişlerde %10 ile %15 arasında değişirken, $2\phi 16$ donatılı kirişte daha fazladır.



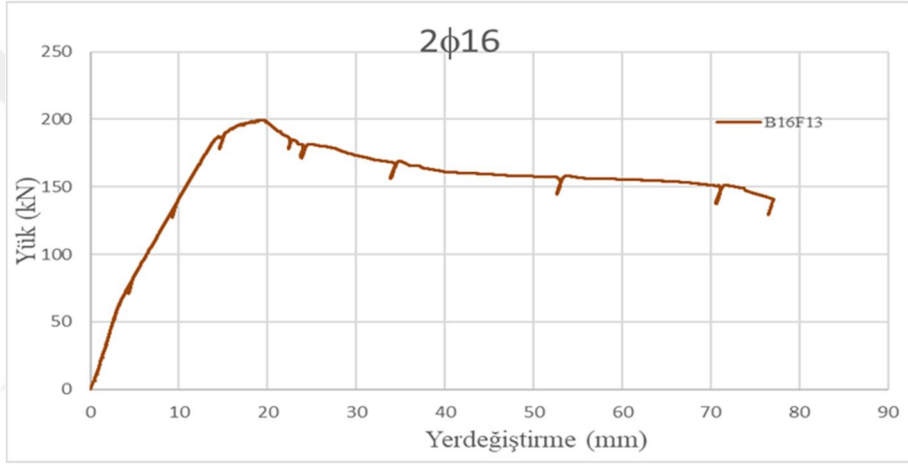
Şekil 3.16: 2φ10 donatılı B kirişinin yük-yer değiştirme grafiği.



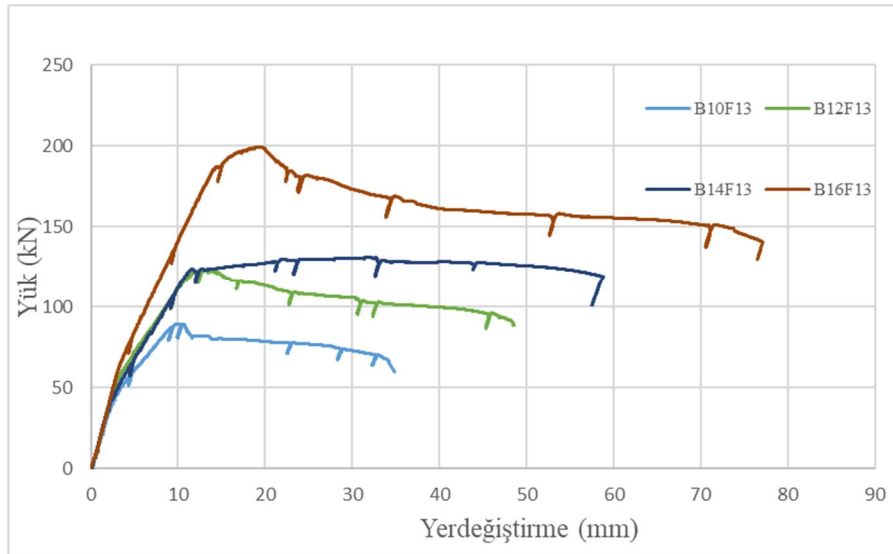
Şekil 3.17: 2φ12 donatılı B kirişinin yük-yer değiştirme grafiği.



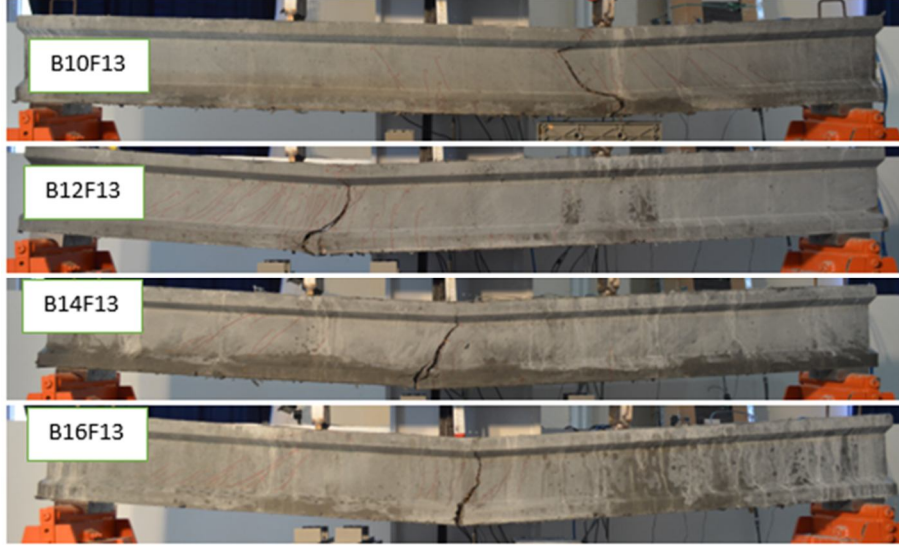
Şekil 3.18: 2φ14 donatılı B kirişinin yük-yer değiştirme grafiği.



Şekil 3.19: 2φ16 donatılı B kirişinin yük-yer değiştirme grafiği.



Şekil 3.20: B grubu kirişlere ait yük-yerdeğiştirme grafikleri.



Şekil 3.21: B grubu kirişlerin kırılma şekilleri.

Test edilen B grubu kirişler incelendiğinde hepsinde tek çatlak oluşmuş ve davranış donatı kopması ile sonuçlanmıştır.

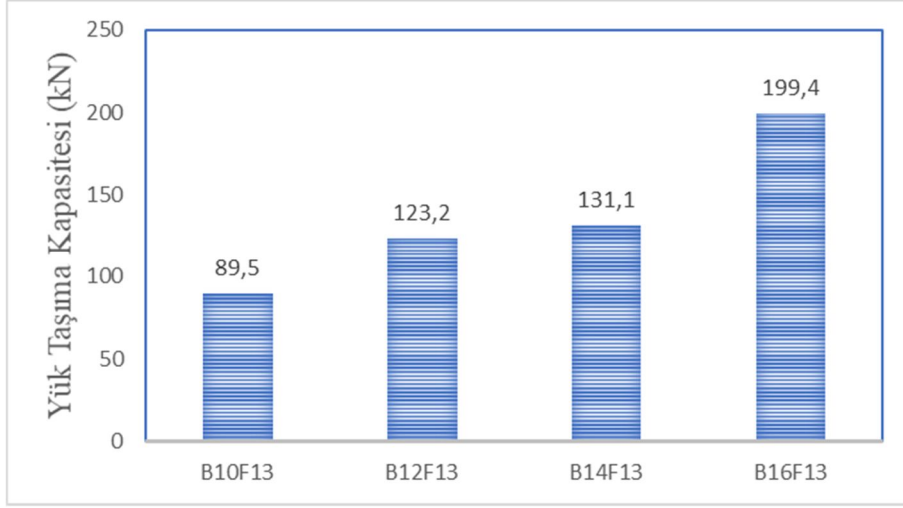
3.2.2.2 Yük Taşıma Kapasiteleri ve Yerdeğiştirme Süneklikleri

B grubu test kirişleri için yer değiştirme süneklikleri ve diğer karakteristik değerler Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4: B grubu kirişlerde yerdeğiştirme süneklikleri ve diğer karakteristik değerleri.

Kiriş adı	P_{maks} (kN)	P_u (kN)	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	μ	Kırılma Şekli
B10F13	89.50	71.60	8.10	8.10	8.84	Eğilme
B12F13	123.20	98.56	10.20	10.20	4.21	Eğilme
B14F13	131.10	119.16	11.31	11.31	5.19	Eğilme
B16F13	199.40	159.20	14.29	14.29	3.09	Eğilme

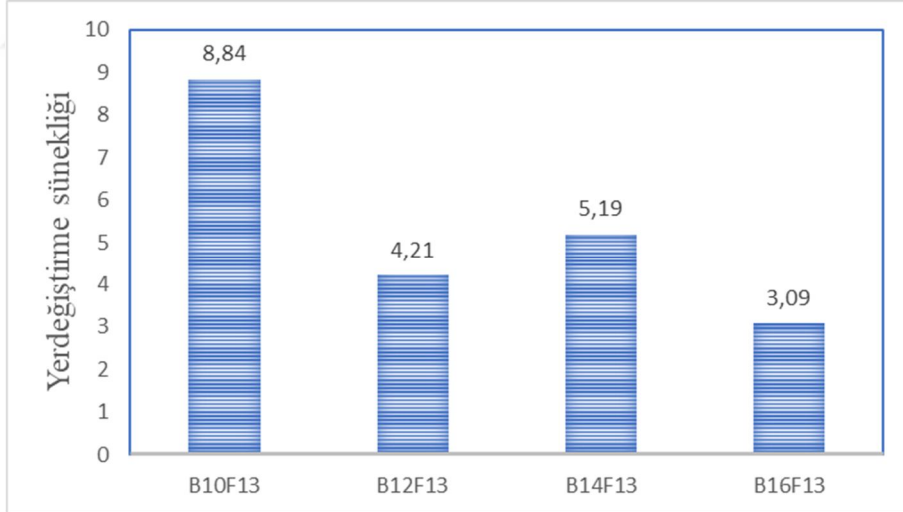
B grubu, 13 mm mikro lif ile hazırlanan UYPLB'un 4 farklı donatı oranı için yük taşıma kapasiteleri Şekil 3.22'te sunulmuştur.



Şekil 3.21: B grubu kirişlerin yük taşıma kapasiteleri.

Bu kirişlerden B16F13 kirişinde en büyük yük taşıma kapasitesine ulaşıldığı olduğu gözlemlenmiştir. Ancak B12F13 ve B14F13 kirişlerinde tepe yüklerinin yakın olduğu görülmüştür.

B grubu kirişlerdeki yerdeğiştirme süneklikleri şekil 3.22’de verilmiştir.

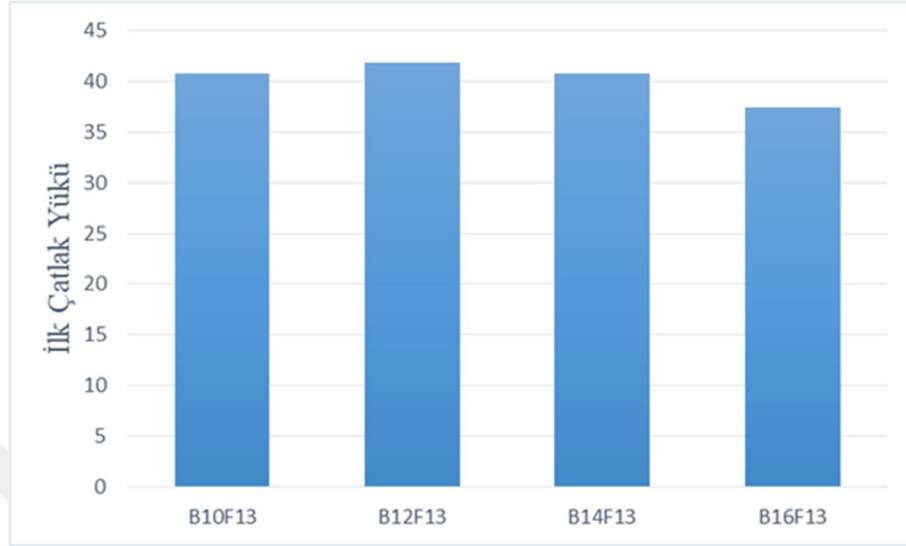


Şekil 3.22: B grubu kirişlerin yer değiştirme sünekliği.

Maksimum yer değiştirme sünekliğinin eğilme kırılması yaşayan B10F13 kirişinde elde edilmiştir. Ancak maksimum yerdeğiştirme 2 ϕ 16 donatılı kiriş için elde edilmiştir. Yük azalması %20’den fazla olduğundan maksimum yük taşıma kapasitesinin %80’indeki süneklik hesaplanmıştır.

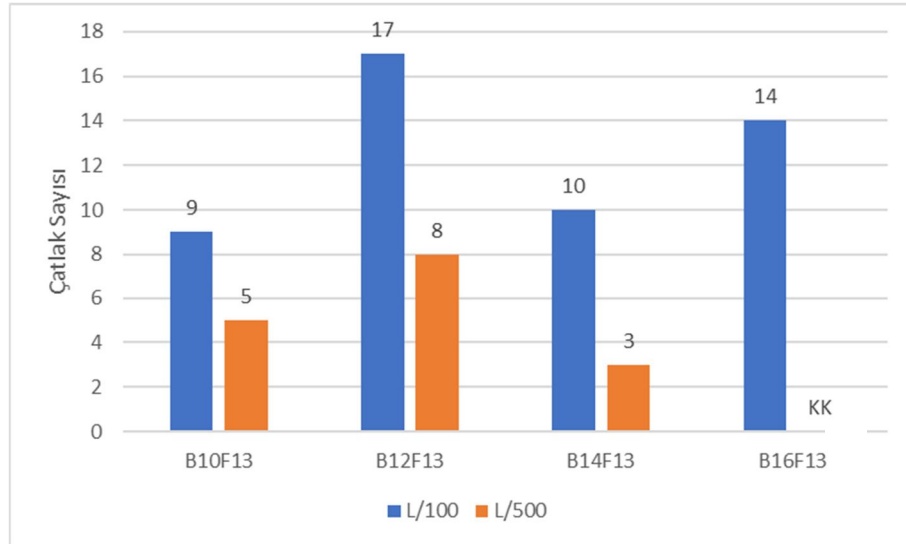
3.2.2.3 Kirişlerinin Çatlak Davranışları

B grubu kirişleri için ilk çatlak yükü Şekil 3.24’ de verilmiştir.



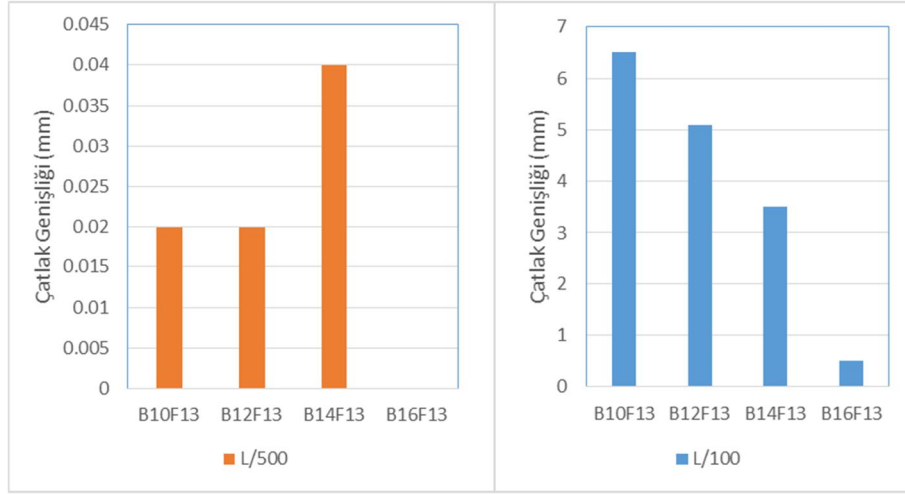
Şekil 3.23: B grubu kirişler için ilk çatlak yükleri.

B grubu için L/500 ve L/100 sehim değerlerindeki çatlak sayıları Şekil 3.24’te verilmiştir.



Şekil 3.24: B grubu kirişlerin L/500 ve L/100 için çatlak sayıları.

B grubu için L/500 ve L/100 sehim değerlerindeki çatlak genişlikleri Şekil 3.25’de verilmiştir.



Şekil 3.25: B grubu kirişlerin L/500 ve L/100 için çatlak genişlikleri.

4. DENEYSEL SONUÇLARIN MEVCUT TESTLERLE KARŞILAŞTIRILMASI

Kirişlerde a/d oranına bağlı olarak A ve B grubuna ayrılmıştır. A grubu kirişlerden 30 mm makro lifli kirişler ile 116M513 [31] nolu devam eden TÜBİTAK projesindeki kirişler karşılaştırılmıştır. D grubu 13 mm micro lifli kirişler ise Göker (2019) [32]’dan alınan kiriş sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

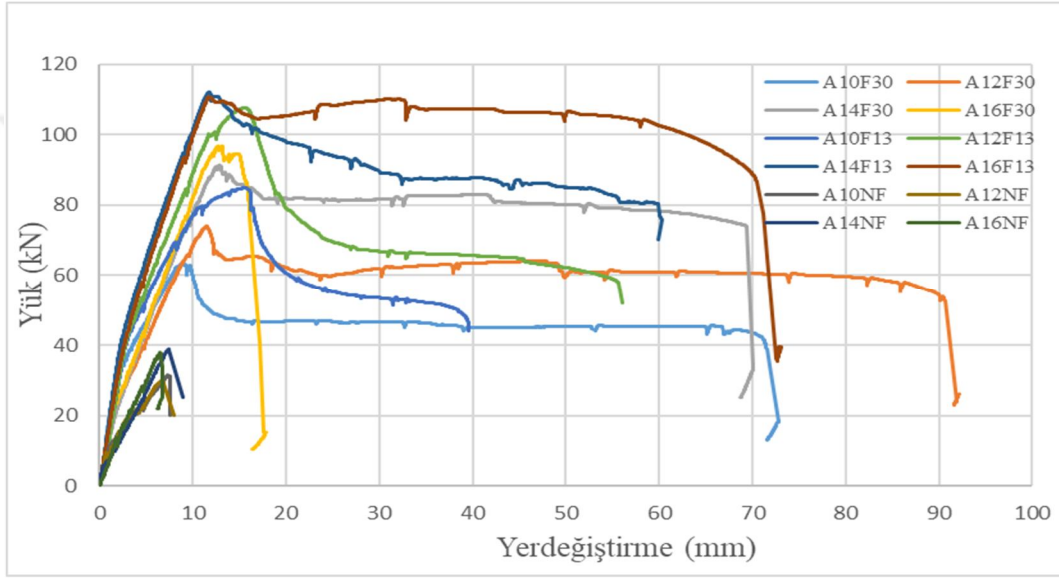
Tablo 4.1: Karşılaştırmalarda kullanılan kirişlerin özellikleri.

Grup		Çekme Dontısı Oranı	a/d	Lif Tipi	Lif Oranı	Kiriş Kodu
A	116M517	2 ϕ 10 (%0.8)	4.45	-	NF (%0.0)	A10NF
		2 ϕ 12 (%1.2)				A12NF
		2 ϕ 14 (%1.7)				A14NF
		2 ϕ 16 (%2.2)				A16NF
	Tez Kirişleri	2 ϕ 10 (%0.8)	4.45	13 mm mikro	F13 (%2.0)	A10F13
		2 ϕ 12 (%1.2)				A12F13
		2 ϕ 14 (%1.7)				A14F13
		2 ϕ 16 (%2.2)				A16F13
B	Göker (2019)	2 ϕ 10 (%0.8)	3.12	-	NF (%0.0)	B10NF
		2 ϕ 12 (%1.2)				B12NF
		2 ϕ 14 (%1.7)				B14NF
		2 ϕ 16 (%2.2)				B16NF
	Tez Kirişleri	2 ϕ 10 (%0.8)	3.12	13 mm mikro	F13 (%2.0)	B10F13
		2 ϕ 12 (%1.2)				B12F13
		2 ϕ 14 (%1.7)				B14F13
		2 ϕ 16 (%2.2)				B16F13
	Göker (2019)	2 ϕ 10 (%0.8)	3.12	30 mm kancalı makro	F30 (%2.0)	B10F30
		2 ϕ 12 (%1.2)				B12F30
		2 ϕ 14 (%1.7)				B14F30
		2 ϕ 16 (%2.2)				B16F30

4.1 a/d=4.45 Olan Kirişlerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

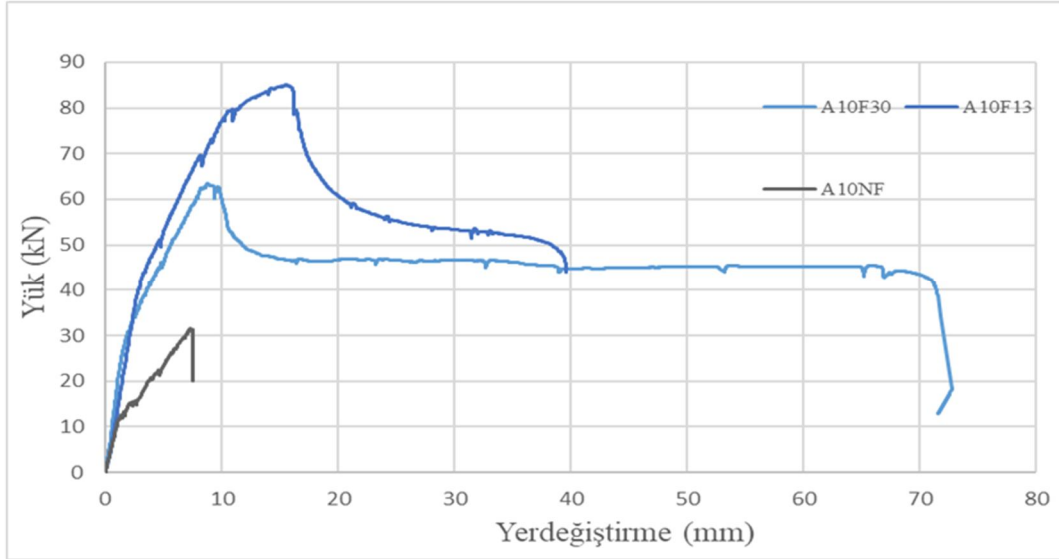
4.1.1 Yük-Yer değiştirme Davranışı ve Kırılma Şekilleri

Tüm A grubu kirişlere ait yük yer değiştirme grafikleri Şekil 4.1 de verilmiştir.



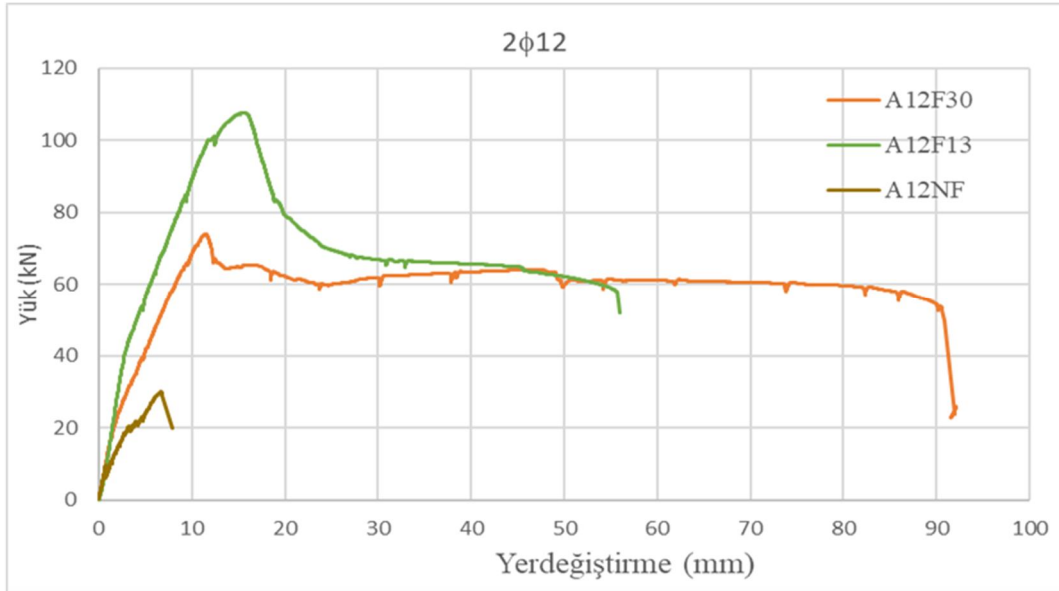
Şekil 4.1: A grubu kirişlerin yük yerdeğiştirme davranışı.

Lif tipinin yük yer değiştirme davranışına katkısını görebilmek için her bir donatı oranı için grafikler tekrar verilmiştir.



Şekil 4.2: 2φ10 Donatılı A grubu kirişlerin yük yerdeğiştirme grafiği.

2φ10 donatı oranına sahip A grubu kirişler karşılaştırıldığında A10NF kodlu lifsiz kirişte kesme kırılması gözlenmiştir. %2 oranında 13 mm mikro life sahip A10F13 kodlu kiriş ve %2 oranında 30 mm kancalı makro lifli A10F30 kodlu kirişte lifler kesme çatlaklarının oluşmasını/genişlemesini engellemiş ve eğilme davranışı donatı kopması ile sonuçlanmıştır. (Şekil 4.2)

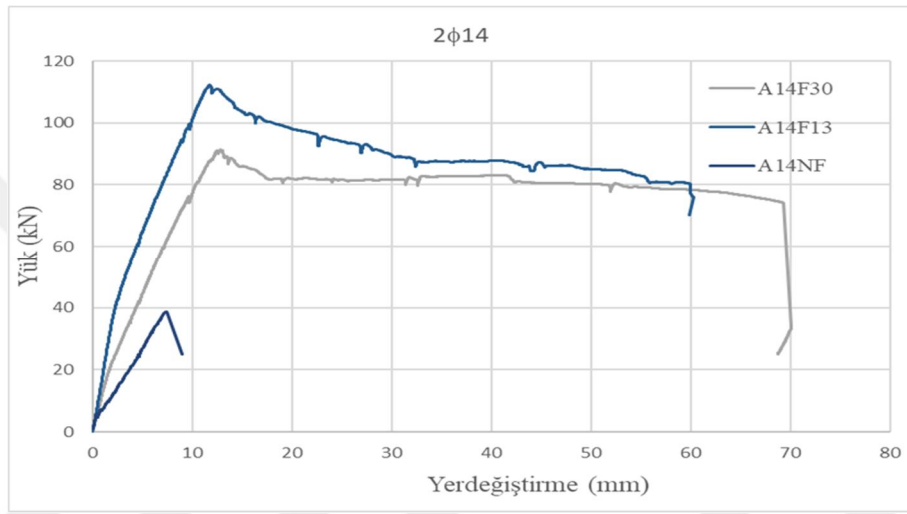


Şekil 4.3: 2φ12 Donatılı A grubu kirişlerin yük-yerdeğiştirme grafiği.

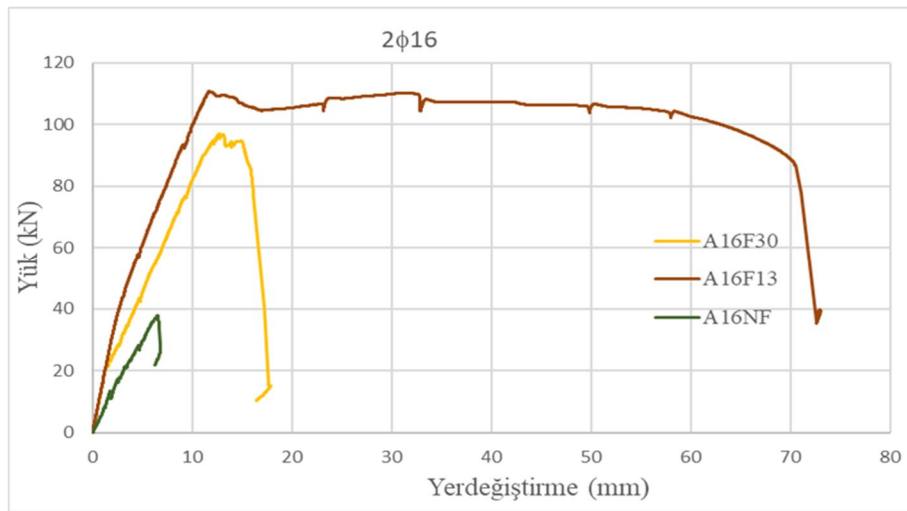
A12NF kodlu lifsiz kirişte kesme kırılması gözlenmiştir. %2 oranında 13 mm mikro life sahip A12F13 kodlu kiriş ve 30 mm kancalı makro life A12F30 kodlu kirişte

elik lifler kesme çatlaklarının oluşmasını/genişlemesini engellemiş ve donatı kopması sonucu eğilme kırılması gerçekleşmiştir (şekil 4.3).

2φ14 donatı oranına sahip A grubu kirişlerde A14NF kodlu lifsiz kirişte kesme kırılması gözlenmiştir. %2 oranında 13 mm mikro life sahip A14F13 kodlu kiriş ve 30 mm kancalı makro life A14F30 kodlu kirişte 2φ10 ve 2φ12 donatılı kirişlere benzer şekilde kesme kırılması önlenmiş ve eğilme davranışı yine donatı kopması ile sonuçlanmıştır (şekil 4.4).



şekil 4.4: 2φ14 Donatılı A grubu kirişlerin yük-yerdeğiştirme grafiği.



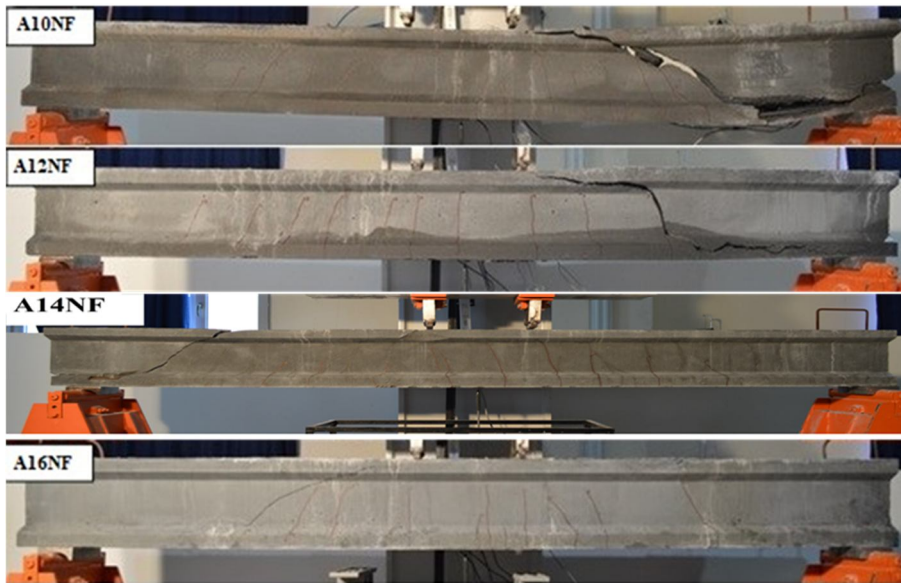
şekil 4.5: 2φ16 Donatılı A grubu kirişlerin yük-yerdeğiştirme grafiği.

2φ16 donatı oranına sahip A grubu kirişlerde A16NF kodlu lifsiz ve %2 oranında 30 mm kancalı makro life A14F30 kodlu kirişte kesme kırılması

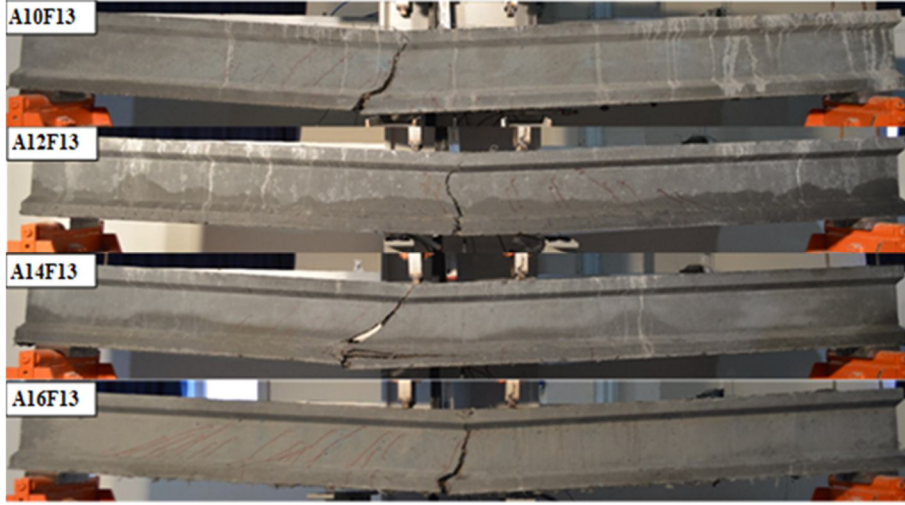
gözlenmiştir. %2 oranında 13 mm mikro life sahip A14F13 kodlu kirişte ise lifler kesme kırılmasını önleyerek sünek eğilme davranışı meydana gelmiş ve diğer lifli kirişlerde olduğu gibi test donatı kopması ile sonuçlanmıştır (Şekil 4.5).

Kirişlerin yük-yer değiştirme davranışları birlikte değerlendirildiğinde, A16F30 hariç çelik liflerin çatlakların oluşumunu veya genişlemesini engelleme yetenekleri nedeniyle lifsiz durumda meydana gelen kesme kırılmalarını kesme donatısı olmadan önleyebildiği, görülmüştür. %2 oranında 30 mm kancalı lif kullanımı $2\phi 16$ donatı oranı için kesme kırılmasını önlemede yetersiz kalmış, bu donatı oranı için 13 mm mikro lif ise davranışı eğilmeye çevirmede yeterli olmuştur. Bu nedenle 13 mm mikro lifin 30 mm kancalı life göre daha etkin olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

A grubu kirişlerin kırılma şekiller karşılaştırıldığında tüm donatı oranları için lifsiz kirişlerde donatı akmasından önce kesme çatlakları oluşmuş ve kirişlerde oluşan bu çatlakların ani şekilde açılması nedeniyle ani kesme kırılmaları meydana gelmiştir (Şekil 4.6-4.8). Lifli kirişlerde sadece $2\phi 16$ donatı oranına sahip 30 mm makro kancalı lifli kiriş dışındaki tüm kirişlerde kesme açıklıklarında eğik çatlaklar oluşmasına karşın lifler bu çatlakların genişlemesini/yayılmasını önlemiş ve kirişlerin kırılma şeklini eğilmeye çevirmiştir. Tepe yükü sonrası liflerin sıyrılmasıyla birlikte tek bir çatlak hızla genişlemekte ve bu çatlağın olduğu yerde donatı seviyesinde gerilmelerin giderek ve hızlı artması sonucu donatı kopması meydana gelmektedir (Şekil 4.6-4.8).



Şekil 4.6: A grubu NF kirişlere ait kırılma şekilleri.



Şekil 4.7: A grubu 13 mm mikro lifli kirişlere ait kırılma şekilleri.



Şekil 4.8: A grubu 30 mm makro lifli kirişlere ait kırılma şekilleri.

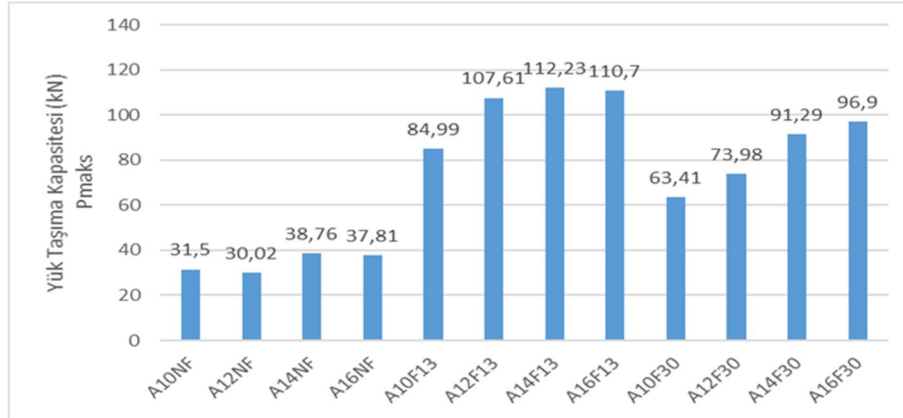
4.1.2 Yük Taşıma Kapasiteleri ve Yer Değiştirme Süneklikleri

A grubu test kirişleri için yer değiştirme süneklikleri ve diğer karakteristik değerler Tablo 4.2’ de verilmiştir.

Tablo 4.2: A grubu kirişlerin yerdeğiştirme süneklikleri ve diğer karakteristik değerleri.

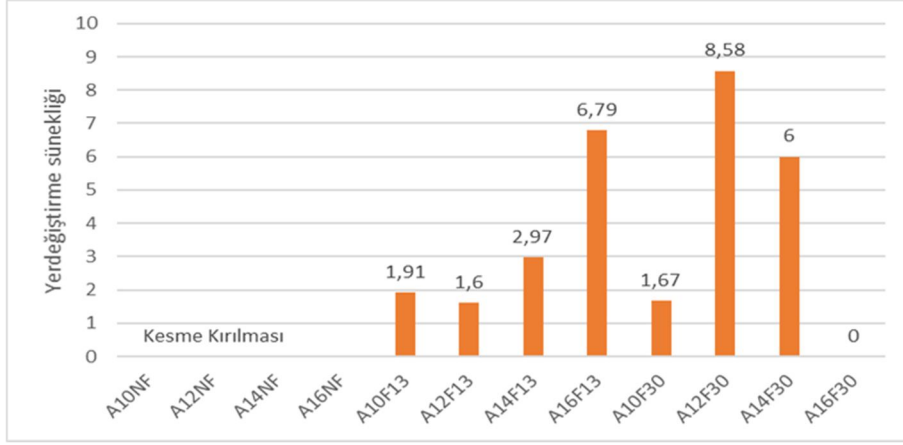
Kiriş adı	P_{maks} (kN)	P_u (kN)	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	μ	Kırılma Şekli
A10NF	31.50	-	-	-	-	Kesme
A12NF	30.02	-	-	-	-	Kesme
A14NF	38.76	-	-	-	-	Kesme
A16NF	37.81	-	-	-	-	Kesme
A10F13	84.99	67.89	9.26	17.68	1.91	Eğilme
A12F13	107.61	85.96	11.60	18.57	1.60	Eğilme
A14F13	112.23	89.74	10.09	29.95	2.97	Eğilme
A16F13	110.70	88.49	10.33	70.10	6.79	Eğilme
A10F30	63.41	50.73	6.91	11.53	1.67	Eğilme
A12F30	73.98	59.19	9.81	84.23	8.58	Eğilme
A14F30	91.29	73.03	11.24	67.45	6.00	Eğilme
A16F30	96.90	-	11.59	-	-	Kesme

Beklendiği gibi donatı oranı arttıkça kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin (P_{maks}) artmıştır. Liflerin çatlakları sınırlama özellikleri nedeniyle yük kapasitesini lifler sayesinde lifsiz duruma göre önemli ölçüde artmıştır. Lif tipleri karşılaştırıldığında kapasite artışına katkı açısından 13 mm düz liflerin 30 mm kancalı liflere göre daha etkin olduğu görülmektedir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9: A grubu kirişlerin yük taşıma kapasiteleri.

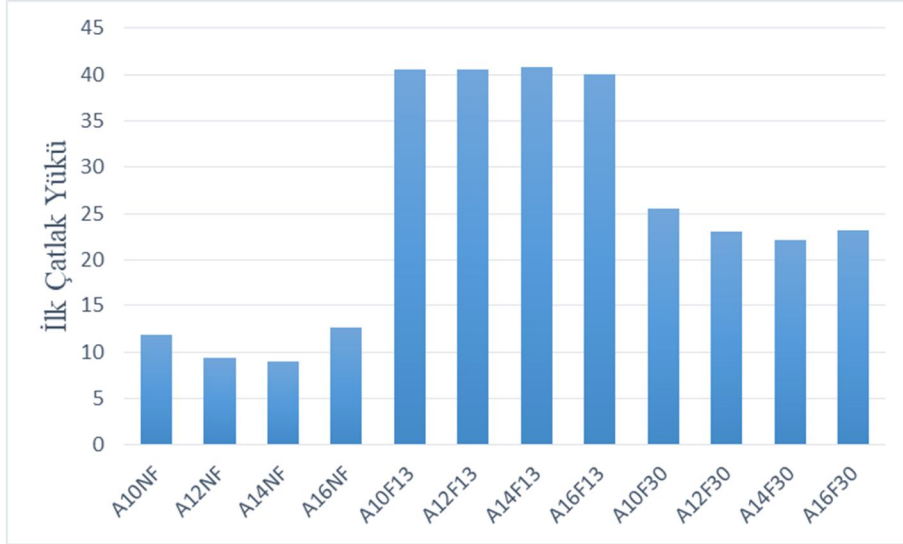
A grubu kirişler için genel olarak her iki lif tipi içinde donatı oranı arttıkça kirişlerin sünekliğinin arttığı görülmektedir. Lif tipleri yer değiştirme sünekliği açısından karşılaştırıldığında 30 mm kancalı makro liflerin 13 mm mikro liflere göre daha etkin olduğu görülmektedir (Şekil 4.10).



Şekil 4.10: A grubu kirişlerin yerdeğiştirme sünekliği.

4.1.3 Test Kirişlerinin Çatlak Davranışları

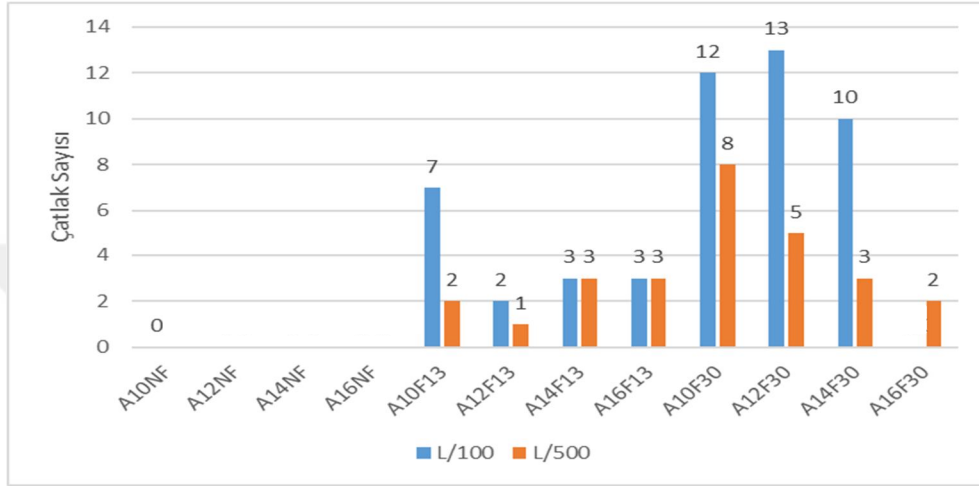
A grubu kirişlerin çatlama yükleri Şekil 4.11’de sunulmuştur. Beklendiği gibi liflerin çatlakların oluşmasını engellemesi/geciktirmesi nedeniyle ilk çatlak yüklerini lifsiz duruma göre önemli derecede arttırdığı görülmektedir. Çelik lifler kendi içerisinde değerlendirildiğinde mikro 13 mm lifler makro 30 mm kancalı liflere göre çatlama yükünü belirgin şekilde arttırdığı belirlenmiştir.



Şekil 4.11: A grubu kirişlerin ilk çatlak yükleri.

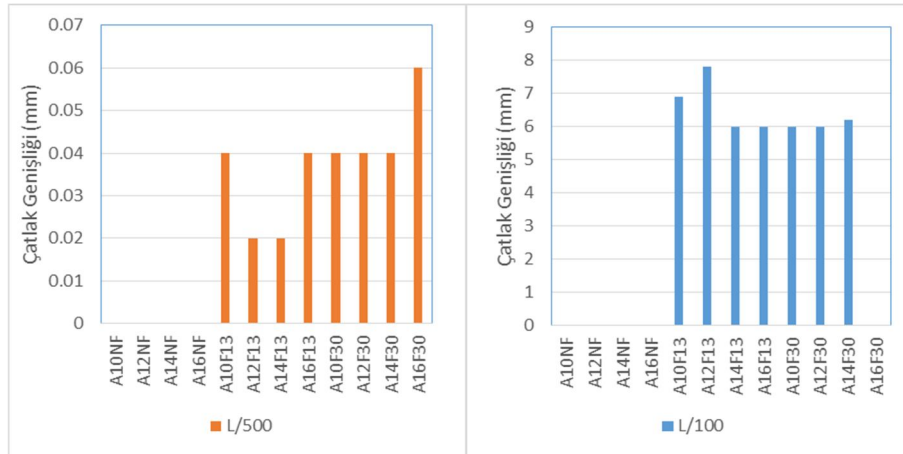
Liflerin kirişlerin çatlak davranışlarına etkilerinin karşılaştırmak amacıyla, yük-yer değiştirme davranışının L/500’lük ve L/100’lük değerlerinde çatlak sayıları

ve çatlak genişlikleri belirlenmiştir. Şekil 4.12 A grubu kirişlerin L/100 ve L/500 değerleri için oluşan çatlak sayıları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere her iki yer değiştirme değeri için de 13 mm mikro liflerin çatlak oluşumunu önlemede 30 mm makro liflere göre daha etkin oldukları görülmektedir. Lifsiz kirişlerde kesme kırılması olduğundan çatlak oluşmamış ani ve gevrek bir kırılma gözlenmiştir.



Şekil 4.12: A grubu test kirişlerin L/100 ve L/500 için çatlak sayıları.

L/500 ve L/100 yer değiştirme seviyelerinde A grubu kirişlerde oluşan çatlakların maksimum genişlikleri Şekil 4.13'te karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. A grubu kirişlerde çatlak genişliğinin lif tipinden bağımsız olduğu görülmektedir.

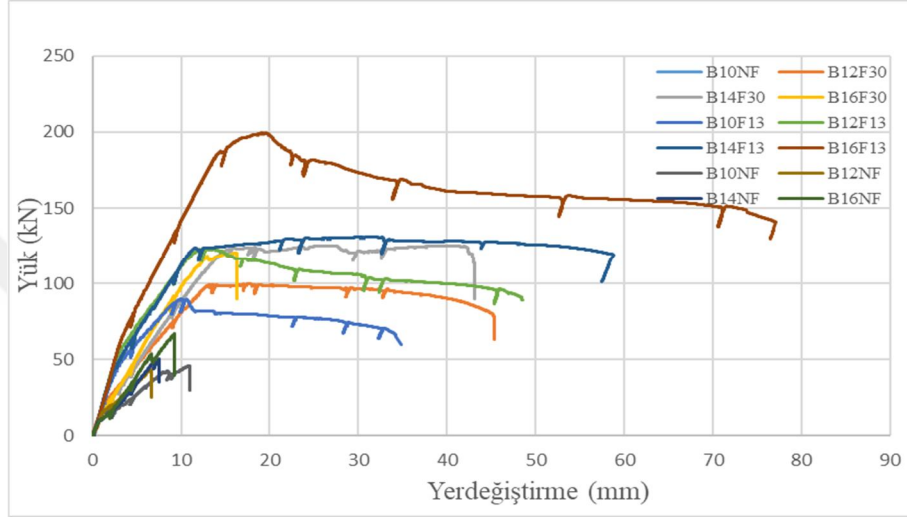


Şekil 4.13: A grubu test kirişlerin L/100 ve L/500 için çatlak genişlikleri.

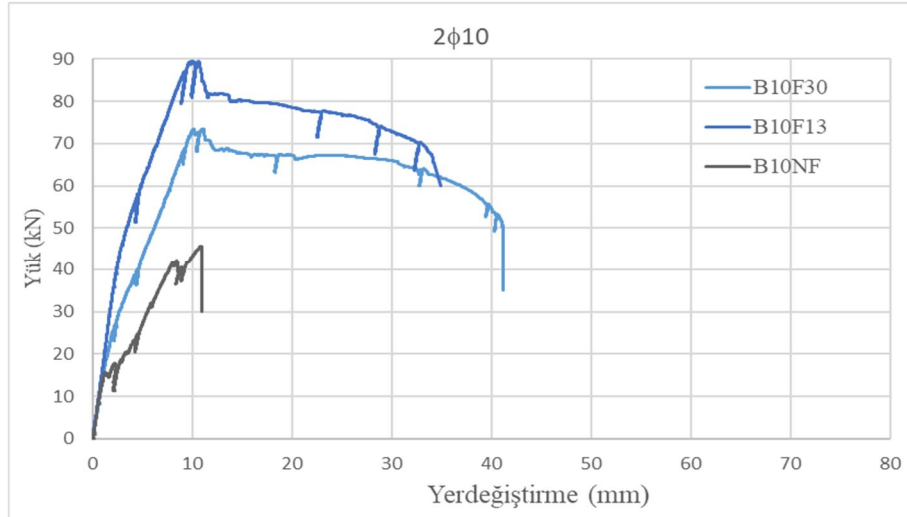
4.2 a/d=3.32 Olan Kirişlerin Sonuçlarının Değerlendirilmesi

4.2.1 Yük-Yer değiştirme Davranışı ve Kırılma Şekilleri

Test edilen tüm B grubu kirişlere ait yük yer değiştirme grafikleri Şekil 4.14'te verilmiştir.



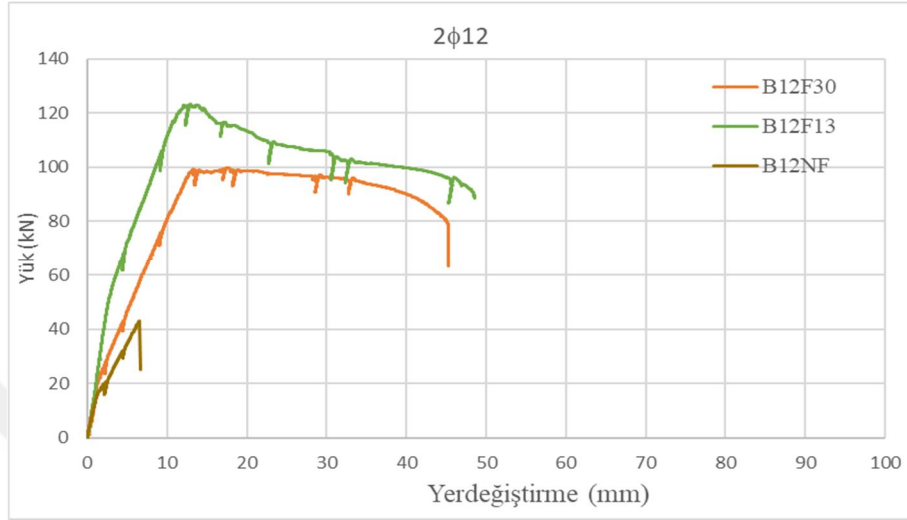
Şekil 4.14: B grubu kirişlerin yük-yerdeğiştirme davranışı.



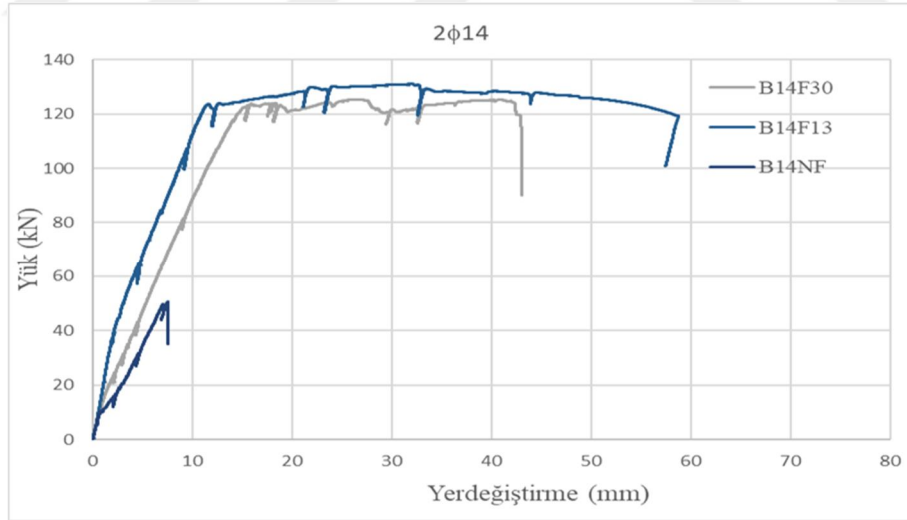
Şekil 4.15: 2φ10 Donatılı B grubu kirişlerin yük-yerdeğiştirme grafiği.

2φ10 ve 2φ12 donatılı B grubu kirişler karşılaştırıldığında B10NF ve B12NF kodlu lifsiz kirişlerde kesme kırılması gözlenmiştir. %2 oranında 13 mm mikro life

sahip B10F13 ve B12F13 kodlu kirişlerde ve %2 oranında 30 mm kancalı makro life B10F30 ve B12F30 kodlu kirişlerde lifler kesme çatlaklarının oluşmasını/genişlemesini engellemiş ve eğilme davranışı donatı kopması ile sonuçlanmıştır (Şekil 4.15 ve 4.16).



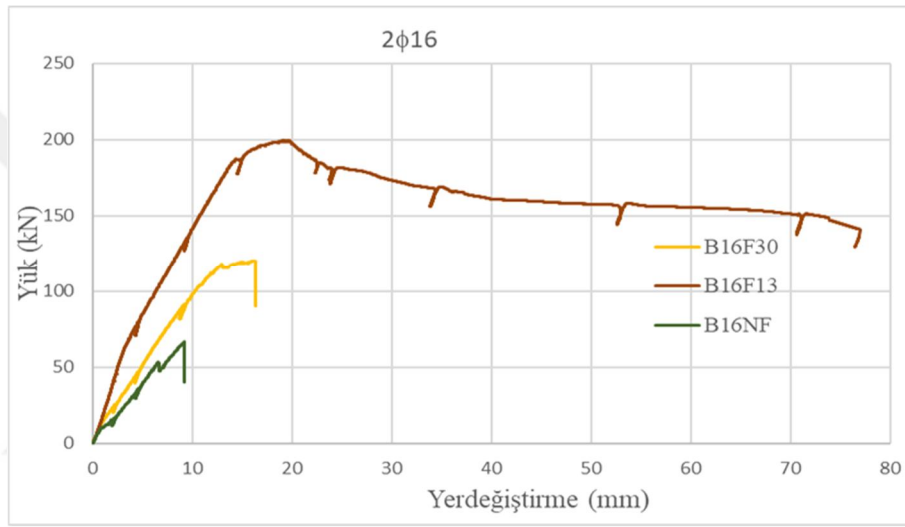
Şekil 4.16: 2φ12 Donatılı B grubu kirişlerin yük yerdeğiştirme grafiği.



Şekil 4.17: 2φ14 Donatılı B grubu kirişlerin yük yerdeğiştirme grafiği.

2φ14 donatı oranına sahip B grubu kirişlerde B14NF kodlu lifsiz kirişte kesme kırılması gözlenmiştir. %2 oranında 13 mm mikro life sahip B14F13 kodlu kiriş 2φ10 ve 2φ12 donatılı kirişlere benzer şekilde kesme kırılması önlenmiş ve eğilme davranışı

yine donatı kopması ile sonuçlanmıştır. %2 oranında 30 mm kancalı makro life B14F30 kodlu kirişte önce kiriş orta bölgesinde eğilme çatlakları başlamış ve artan yüklerle beraber bu çatlaklar ilerlemiştir. Kirişin sağ ve sol açıklığında eğik çatlaklar oluşmasına rağmen bu çatlaklar sınırlı kalmıştır. Artan yük seviyelerinde eğilme çatlaklarının sayıları artış göstermiş ve başlık kısmına doğru ilerlemiştir. Sağ yüke yakın bir bölgedeki tek bir eğilme çatlağı genişlerken aynı zamanda sağ kesme açıklığında eğik çatlakların sayısı ve genişliklerinde de artış devam etmiştir. Pekleşme dolayısıyla artan yük nedeniyle kesme kapasitesi aşılmış ve kesme kırılması oluşmuştur (Şekil 4.18) .



Şekil 4.18: 2φ16 Donatılı B grubu kirişlerin yük-yerdeğiştirme grafiği.

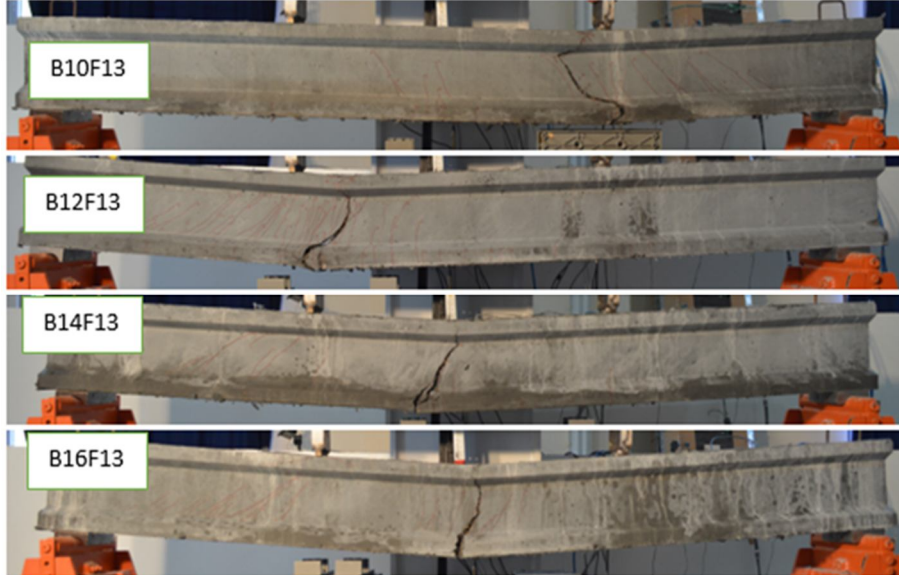
2φ16 donatı oranına sahip B grubu kirişlerde A16NF kodlu lifsiz ve %2 oranında 30 mm kancalı makro life A14F30 kodlu kirişte kesme kırılması gözlenmiştir. %2 oranında 13 mm mikro life sahip A14F13 kodlu kirişte ise lifler kesme kırılmasını önleyerek sünek eğilme davranışı meydana gelmiş ve diğer lifli kirişlerde olduğu gibi test donatı kopması ile sonuçlanmıştır (Şekil 4.19).

B grubu kirişlerin kırılma şekiller karşılaştırıldığında tüm donatı oranları için lifsiz kirişlerde donatı akmasından önce kesme çatlakları oluşmuş ve kirişlerde oluşan bu çatlakların ani şekilde açılması nedeniyle ani kesme kırılmaları meydana gelmiştir (Şekil 4.19). Lifli kirişlerde kirişlerde kesme açıklıklarında eğik çatlaklar oluşmasına karşın lifler bu çatlakların genişlemesini/yayılmasını önlemiş ve kirişlerin kırılma şeklini eğilmeye çevirmiştir. Tepe yükü sonrası liflerin sıyrılmasıyla birlikte tek bir

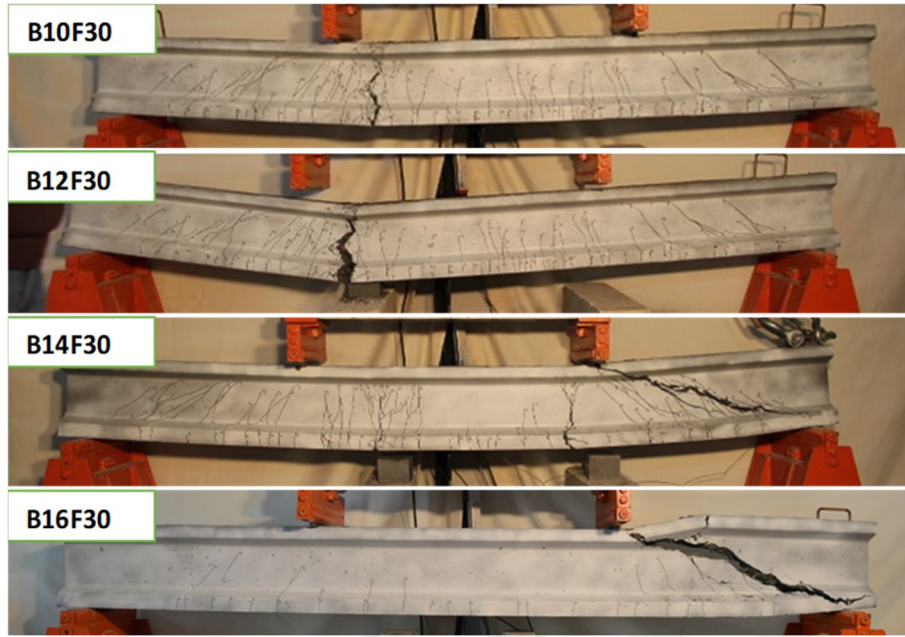
çatlak hızla genişlemekte ve bu çatlağın olduğu yerde donatı seviyesinde gerilmelerin giderek ve hızlı artması sonucu donatı kopması meydana gelmektedir (Şekil 4.20 ve Şekil 4.21).



Şekil 4.19: B grubu NF kirişlere ait kırılma şekilleri.



Şekil 4.20: B grubu 13 mm mikro lifli kirişlere ait kırılma şekilleri.



Şekil 4.21: B grubu 30 mm makro lifli kirişlere ait kırılma şekilleri.

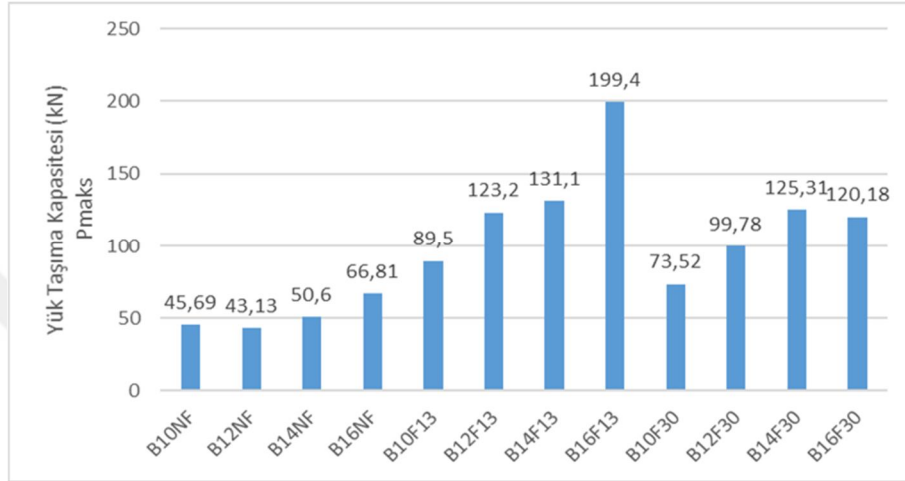
4.2.2 Yük Taşıma Kapasiteleri, Yer değiştirme Süneklikleri

B grubu test kirişleri için yer değiştirme süneklikleri ve diğer karakteristik değerler Tablo 4.3' te verilmiştir.

Tablo 4.3: B grubu kirişlerin yerdeğiştirme süneklikleri ve diğer karakteristik değerleri.

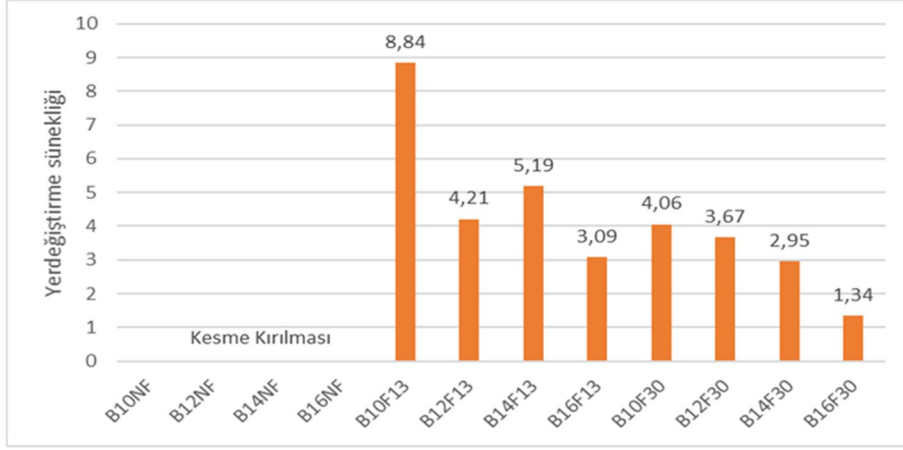
Kiriş adı	P_{maks} (kN)	P_u (kN)	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	μ	Kırılma Şekli
B10NF	45.69	-	-	-	-	Kesme
B12NF	43.13	-	-	-	-	Kesme
B14NF	50.60	-	-	-	-	Kesme
B16NF	66.81	-	-	-	-	Kesme
B10F13	89.50	71.60	8.10	8.10	8.84	Eğilme
B12F13	123.20	98.56	10.20	10.20	4.21	Eğilme
B14F13	131.10	119.16	11.31	11.31	5.19	Eğilme
B16F13	199.40	159.20	14.29	14.29	3.09	Eğilme
B10F30	73.52	58.28	9.40	38.20	4.06	Eğilme
B12F30	99.78	79.83	12.28	45.10	3.67	Eğilme
B14F30	125.31	125.31	14.31	42.28	2.95	Kesme
B16F30	120.18	120.18	12.20	16.30	1.34	Kesme

Beklendiği gibi donatı oranı arttıkça kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin (P_{maks}) artmıştır. B grubu kirişlerin yük taşıma kapasiteleri Şekil 4.22’de verilmiştir. Liflerin çatlakları sınırlama özellikleri nedeniyle yük kapasitesini lifler sayesinde lifsiz duruma göre önemli ölçüde artmıştır. Lif tipleri karşılaştırıldığında kapasite artışına katkı açısından 13 mm düz liflerin 30 mm kancalı liflere göre daha etkin olduğu görülmektedir. (Şekil 4.22)



Şekil 4.22: B grubu kirişlerin yük taşıma kapasiteleri.

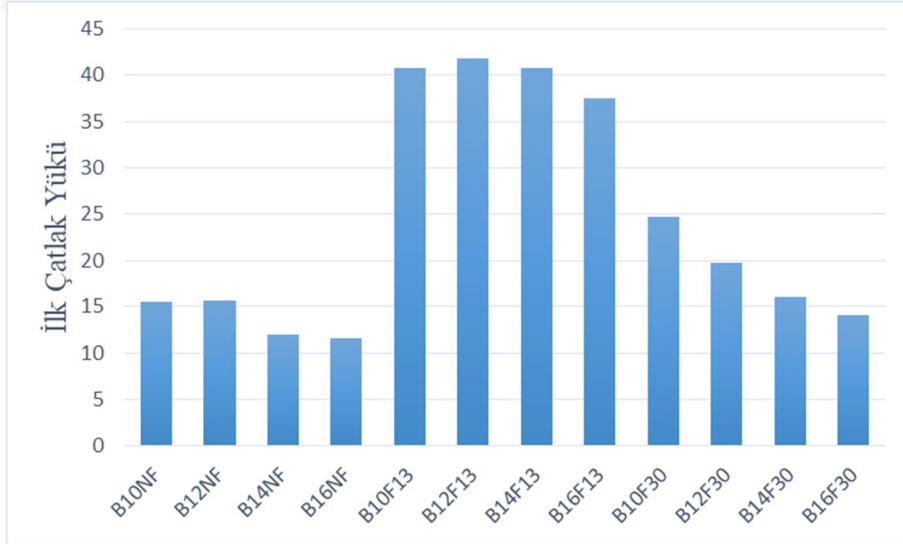
B grubu kirişlerde incelenen her iki lif tipinin de %2 oranında kullanılması sonucu, kesme donatısına gerek kalmadan kesme kırılmasını sünek eğilme kırılmasına döndürebilmişlerdir. B grubu kirişler için genel olarak her iki lif tipi içinde donatı oranı azaldıkça kirişlerin sünekliğinin arttığı görülmektedir (Şekil 4.23).



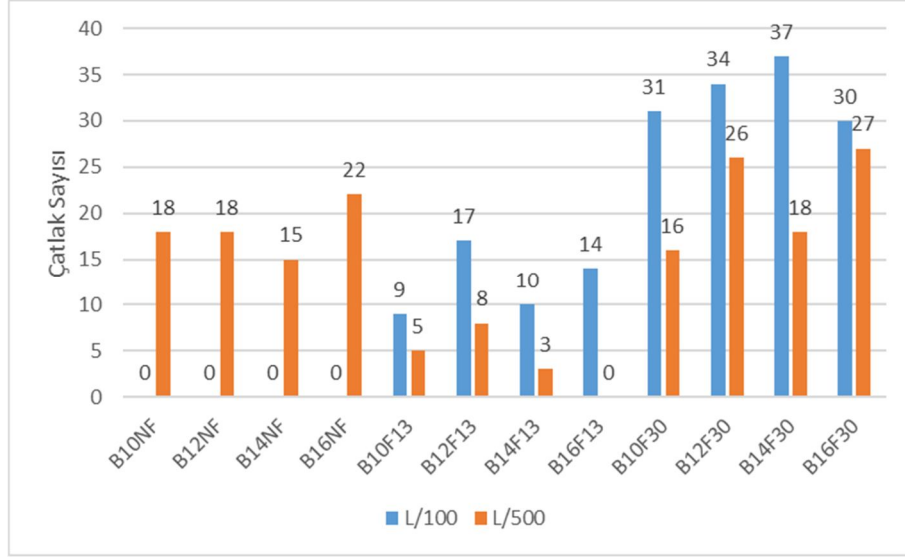
Şekil 4.23: B grubu kirişlerin yerdeğiştirme sünekliği.

4.2.3 Test Kirişlerinin Çatlak Davranışları

Şekil 4.24'te B grubu lifli kirişlerin L/100 ve L/500 değerleri için çatlak sayıları karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur. Şekilden görüleceği gibi her iki yer değiştirme oranı için de 13 mm mikro liflerin çatlak oluşumunu önlemede 30 mm makro liflere göre daha etkin oldukları görülmektedir.

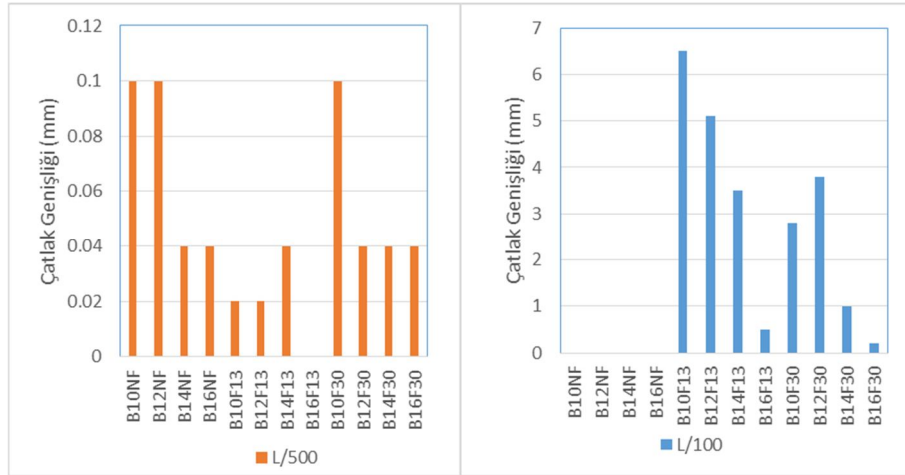


Şekil 4.24: B grubu kirişlerin ilk çatlak yükleri.



Şekil 4.25: B grubu test kirişlerinin L/100 ve L/500 için çatlak sayıları.

B grubu kirişlerde ise lif tipine bağlantılı olarak L/500 ve L/100 yer değiştirme değerlerindeki çatlak genişlikleri farklılık göstermektedir. Bu fark L/100 yer değiştirme değerinde 30mm makro lifin 13mm mikro life göre çatlak genişliklerinde daha etkin olduğu görülmektedir.



Şekil 4.26: B grubu test kirişlerinin L/100 ve L/500 için çatlak genişlikleri.

5. SONUÇLAR

Çalışmada ortalama 150 MPa dayanıma sahip UYPLB ile üretilmiş 8 kiriş test edilmiş ve mevcut sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışma A ve B grubu olmak üzere 2 bölümde incelenmiştir. A grubu kirişlerden %2 30 mm kancalı makro life sahip ve B grubu kirişlerden %2 13 mm mikro düz life sahip dört farklı donatı oranında kirişler üretilip 4 noktalı eğilme testine tabi tutulmuşlardır.

Deneysel çalışmalardan A grubu kirişler incelendiğinde $a/d=4.45$ olması durumunda tüm lifsiz enine donatısız kirişlerde kırılma modu kesmedir. %2 oranında 13 mm mikro lif bulunan tüm enine donatısız kirişlerde ($2\phi 10$, $2\phi 12$, $2\phi 14$ ve $2\phi 16$) kırılma şekli eğilmedir. Yani TS500'de [32] verilen maksimum donatı oranından daha yüksek donatıya sahip ($\rho=2.2$) kirişlerde bile eğilme davranışı gözlenmiştir. %2 oranında 30 mm kancalı lif bulunan kirişlerde ise sadece $\rho=2.2$ donatı oranına sahip kirişte kırılma şekli kesme olmuştur. Bu da %2 oranında 13 mm mikro lif bulunan a/d oranı 4.45 olan kirişlerde enine donatı yerine kullanılabileceğini göstermiştir.

B grubu kirişler incelendiğinde $a/d=3.12$ olması durumunda tüm lifsiz enine donatısız kirişlerde kırılma modu kesmedir. %2 oranında 13 mm mikro lif bulunan tüm enine donatısız kirişlerde ($2\phi 10$, $2\phi 12$, $2\phi 14$ ve $2\phi 16$) kırılma şekli eğilmedir. Yani TS500 de verilen maksimum donatı oranından daha yüksek donatıya sahip ($2\phi 16$ $\rho=2.2$) kirişlerde bile eğilme davranışı gözlenmiştir. %2 oranında 30 mm kancalı lif bulunan kirişlerde ise sadece $\rho=1.7$ ve $\rho=2.2$ donatı oranına sahip kirişte kırılma şekli kesme olmuştur. Bu da %2 oranında 13 mm mikro lif bulunan a/d oranı 3.12 olan kirişlerde enine donatı yerine kullanılabileceğini göstermiştir.

Beklendiği gibi donatı oranı arttıkça kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin (P_{maks}) artmıştır. Liflerin çatlakları sınırlama özellikleri nedeniyle yük kapasitesini lifler sayesinde lifsiz duruma göre önemli ölçüde artmıştır. Lif tipleri karşılaştırıldığında kapasite artışına katkı açısından 13 mm düz liflerin 30 mm kancalı liflere göre daha etkin olduğu görülmektedir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Magureanu C., Iona S., Camelia N., and Bogdan H., ‘‘Mechanical Properties and Durability of Ultra-High-Performance Concrete’’, *ACI Materials Journal*, 109, 177-184, (2012).
- [2] Roy, D., G. Gouda, and A. Bobrowsky., ‘‘Very High Strength Cement Pastes Prepared by Hot Pressing and Other HighPressure Techniques’’, *Cement and Concrete Research*, 2 (3), 349-66, (1972).
- [3] Wille, Kay, Antoine E. Naaman, and Gustavo J. Parra-Montesinos., ‘‘Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22 Ksi): A Simpler Way’’, *ACI MaterialsJournal*, 108 (1), 46-54, (2011).
- [4] Richard P and Cheyrezy M., ‘‘Composition of Reactive Powder Concretes’’, *Cement and Concrete Research*, 25 (7), 1501-1511, (1995).
- [5] De Larrard F and Sedran T., ‘‘Optimization of Ultra-High-Performance Concrete by the Use of A Packing Model’’, *Cement and Concrete Research*, 24 (6), 997-1009, (1994).
- [6] Schneider, M, M Romer, M Tschudin, and H Bolio., ‘‘Cement and Concrete Research 88 Sustainable Cement Production — Present and Future’’, *Cement and Concrete Research*, 41 (7), 642–50, (2011).
- [7] Randl, N et al., ‘‘Development of UHPC Mixtures from an Ecological Point of View’’, *Construction and Building Materials*, 67, 373–378, (2014).
- [8] Plank, Johann et al., ‘‘Effectiveness of Polycarboxylate Superplasticizers in Ultra-High Strength Concrete: The Importance of PCE Compatibility with Silica Fume’’, *Journal of Advanced Concrate Technology*, 7 (1), 5–12, (2009).
- [9] TS 10513, ‘‘Çelik Teller – Beton Takviyesinde Kullanılan’’, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, (1992).

- [10] Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Leutbecher, T., Frönlich, S., ‘‘UltraHigh Performance Concrete UHPC’’, *Betonkalender*, Wilhelm Ernst & Sohn, (2014).
- [11] JSCE, Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks, *Concrete Engineering Series*, 82, Japan Society of Civil Engineers, (2008).
- [12] Russell, H. G., Graybeal, B. A., Ultra-high performance concrete: a state-of-the-art report project bridge community, *FHWA Publication HRT-13-060*, Federal Highway Administration, (2013).
- [13] Thomas L. Vande Voort ‘‘Design and Field Testing of Tapered H-shaped Ultra High Performance Concrete’’, Ph.D Thesis, *Iowa State University Master Of Science*, Ames-Iowa, (2008).
- [14] Thorsten S., Peter S., ‘‘Life Cycle Assessment of Uhpc Bridge Constructions: Sherbrooke Footbridge, Kassel Gärtnerplatz Footbridge and Wapello Road Bridge’’, *ACEE Architecture Civil Engineering Environment*, 1/2009, 109-118, (2009).
- [15] Y. Tanaka & H. Musha, S. Tanaka & M. Ishida, ‘‘Durability performance of UFC sakata-mira footbridge under sea environment’’, *Korea Concrete Institute*, 1648-1654, (2010).
- [16] Npca White Paper, ‘‘Ultra High Performance Concrete (UHPC) Guide To Manufacturing Architectural Guide To Manufacturing Architectural.’’, *National Precast Concrete Association*, (2013).
- [17] Hegger J. and Bertram G., ‘‘Shear carrying capacity of Ultra-High Performance Concrete beams’’, In: Walraven JC and stoelhorst D (eds), *Tailor Made Concrete Structures*, London: Taylor & Francis group, 341-347, (2008).
- [18] Voo Y. L., Poon W. K., Foster S. J., ‘‘Shear strength of steel fiber-reinforced ultrahigh-performance concrete beams without stirrups’’, *Journal of Structural Engineering*, 136, 1393-1400, (2010).

- [19] Wu X. G., Han S. M., “Ultra high performance cementitious hybrid and flexural analysis of the UHPCC-NC hybrid ttructure with full shear connection”, *Key Engineering Materials*, 405-406, 69-74, (2009).
- [20] Yang I. H., Kim B. S., and Joh C., “Shear behaviour of ultra-highperformance fibre-reinforced concrete beams without stirrups “, *ICE (Institution of civil engineers)*, 64, 979-993, (2012).
- [21] Zagon R., Matthys S. and Kiss Z., “Shear behaviour of SFR-UHPC I-shaped beams”, *Construction and Building Materials*, 124, 258-268, (2016).
- [22] Qi J. N., Ma Z. J., Wang J. Q. and Liu T. X., “Post-Cracking Shear Strength and Deformability of HSSUHPFRC beams”, *Structural Concrete*, 17(6), 1033–1046, (2016).
- [23] Ngo T. T., Park J. K., Pyo S. and Kim D. J. “Shear resistance of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete” *Construction and Building Materials*, 151, 246–257, (2017).
- [24] Mészöly T. and Randl N. “Shear behavior of fiber-reinforced ultra-high performance concrete beams”, *Engineering Structures*, 168, 119–127, (2018).
- [25] Pourbaba M., Joghataie A. and Mirmiran A. “Shear behavior of ultra-high performance concrete”, *Construction and Building Materials*, 183, 554–564 (2018).
- [26] Yavaş A., Hasgül U., Türker K. and Birol T “Effective fiber type investigation on the shear behavior of ultrahigh-performance fiber-reinforced concrete beams”, *Advances in Structural Engineering*, 22, 1591–1605, (2019).
- [27] Kamal M.M., Safan, M.A., Etman, Z.A., Salama, R.A., “Production of Ultra High-Strength Concrete using Local Materials” *Engineering Research Journal*, 36(1), 91-100, (2013).

- [28] Ali, H.M., Alamir, J.S.A., Hamad, N.T., “First Diagonal Cracking and Ultimate Shear of Reactive Powder Concrete T-Beams without Stirrups”, *Journal of Engineering and Development*, 18(5), 149-164, (2014).
- [29] Park, R., Evaluation of ductility of structures and structural assemblages from laboratory testing, *Bulletin of the New Zealand National Society for the Earthquake Engineering*, 22 (3), 155-166, (1989).
- [30] Yavaş A., Türker K., Hasgöl U., Birol T., Yazıcı H., ‘Ultra Yüksek Performanslı Lifli Beton (Uyplb) İçeren Prefabrike "I" Enkesitli Kirişlerin Eğilme Ve Kesme Davranışının Deneysel İncelenmesi’, *TÜBİTAK-Proje No: 116M517* (2020).
- [31] Göker O., Betonarme I enkesitli kirişlerin kesme davranışında UYPLB kullanımının kirişlerin kesme dayanımına etkisinin. Yüksek lisans tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir, (2019).
- [32] TS 500, Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (2000).