

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETON İLE
İNCE LEVHA ELEMANLAR ÜRETİLMESİ VE
BETONARME KİRİŞLERDE GÜÇLENDİRME
AMACIYLA UYGULANMASI**

Reza JAHANGIRI

Mayıs, 2019
İZMİR

ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETON İLE İNCE LEVHA ELEMANLAR ÜRETİLMESİ VE BETONARME KİRİŞLERDE GÜÇLENDİRME AMACIYLA UYGULANMASI

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemesi Programı

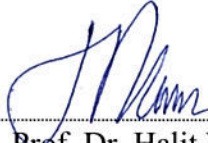
Reza JAHANGIRI

Mayıs, 2019

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

REZA JAHANGIRI, tarafından PROF. DR. HALİT YAZICI yönetiminde hazırlanan “ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETON İLE İNCE LEVHA ELEMANLAR ÜRETİLMESİ VE BETONARME KİRİŞLERDE GÜÇLENDİRME AMACIYLA UYGULANMASI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Prof. Dr. Halit YAZICI

Yönetici



Doç. Dr. Tahir Kemal ERDEM

Jüri Üyesi



Doç. Dr. H. Murat TANIRSLAN

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Halit YAZICI, ya sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca yardım, bilgi ve tecrübeleri ile bana sürekli destek olan Doç. Dr. Hasan Murat TANARSLAN a teşekkür ederim.

114M257 nolu bilimsel araştırma projesi ile tezime destekleri için Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Bu çalışma Yeni Prefabrike Beton İnşaat San. ve Tic. A.Ş.' den teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince her daim yanımda olan çok değerli dostum Dr. Çağlar YALÇINKAYA 'ya şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca maddi manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme de sonsuz teşekkürler ederim.

Reza JAHANGIRI

ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETON İLE İNCE LEVHA ELEMANLAR ÜRETİLMESİ VE BETONARME KİRİŞLERDE GÜÇLENDİRME AMACIYLA UYGULANMASI

ÖZ

Ultra yüksek performanslı lif takviyeli beton (UYLTB), üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip çimentolu bir kompozittir. Buna göre, bu çalışma UYPB laminatlarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışına odaklanmaktadır. İlk olarak, liflerin hacminin UYPB 'nin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek ve laminat üretimi için uygun liflerin takviye oranını seçmek için malzeme ölçeğinde bir ön çalışma yapılmıştır. İkinci aşamada, tam ölçekli laminatın çıplak özelliklerini tanımlamak ve güçlendirici bir malzeme olarak uygulamadan önce malzeme testlerine göre boyut etkisini gözlemlemek için gerçek boyutlu laminatlar test edilmiştir. Daha sonra, son aşamada, bağlama metodu kullanılarak eğilme açısından yetersiz olan betonarme kirişler 30 mm ve 50 mm kalınlığında UYPB laminatlarla güçlendirildi. Ek olarak, laminatlara uzunlamasına takviye donat eklenmiş ve uygulanan yöntemlerin başarısını arttırmak için etkinlikleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, UHPB laminat kullanımının, RB kirişlerin yük taşıma kapasitesini arttırmada etkili bir teknik olduğunu göstermiştir. Ayrıca, laminatlara takviye çubukları eklenmesinin, uygulanan yöntemin etkinliğini önemli ölçüde artırabileceği gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: betonarme kirişler, eğilme güçlendirilmesi, UHPB, yapıştırma tekniği

PRODUCTION OF THIN LAMINATE ELEMENTS USING WITH ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE AND APPLICATION ON REINFORCED CONCRETE BEAMS FOR RETROFITTING

ABSTRACT

Ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) is a cementitious composite with outstanding mechanical and durability properties. Accordingly, this study focuses on the behavior of reinforced concrete (RC) beams that were strengthened with UHPFRC laminates. Firstly, a preliminary study was carried out at material scale to evaluate the effect of fiber volume on the mechanical properties of UHPFRC, and to select suitable fiber reinforcement ratio for laminate production. In the second step, real-sized laminates were tested to define the bare properties of full-scaled laminate and observe the size effect according to material tests before applying them as a strengthening material. Thereafter, in the final step, flexurally deficient RC beams were strengthened with 30 mm and 50 mm thick UHPFRC laminates using bonding methods: gluing with epoxy. In addition, longitudinal reinforcing bars were added into the laminates and their effectiveness was evaluated to improve the success of the applied methods. The results showed that UHPFRC laminate usage, is an effective technique to improve the load carrying capacity of RC beams. Moreover, it was observed that adding reinforcing bars into the laminates could improve the efficiency of the applied method remarkably.

Keywords: RC beams, flexural strengthening, UHPFRC, bonding techniques

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLOLAR LİSTESİ.....	xiii

BÖLÜM BİR - GİRİŞ VE LİTERATÜR TARAMASI.....1

1.1 UYPB üzerine güncel malzeme çalışmaları.....	2
1.2 Lifli betonların çeşitli yetersizliklere sahip kırılganlara uygulanması çalışmalar	10

BÖLÜM İKİ - UYPB TASARIMI LAMİNE ELEMAN ÜRETİMİ VE DENEYLER 22

2.1 Genel	22
2.2 UYPB beton üretimi.....	22
2.2.1 Kullanılan Malzemeler	23
2.2.2 Karışım Oranları.....	27
2.3 Kullanılan Cihazlar ve Yöntem.....	29
2.3.1 Karıştırma Prosedürü ve İşlenebilirlik	29
2.3.2 Kür Yöntemi ve Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi	30
2.4 Deney Verilerinin Değerlendirilmesi	32
2.4.1 Lif Hacminin İşlenebilirliğe Etkisi	32
2.4.2 Lif Hacminin Basınç Dayanımına Etkisi	33
2.4.3 Lif Hacminin Eğilme Performansına Etkisi	35
2.4.4 Malzeme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar	40

2.5 Lamine Üretimi	41
2.5.1 Beton mikseri.....	42
2.5.2 Gerçek Ölçekli Lamine Kalıpları.....	42
2.5.3 UYPB'nin Hazırlanması ve Kalıba Yerleştirilmesi	43
2.5.4 İçerisinde Boyuna Donatı Bulunan UYPB Üretilmesi	48
2.6 Gerçek Ölçekli Lamine Deneyleri	50
2.6.1 Deney düzeneği.....	50
2.6.2 30 mm Kalınlığa Sahip Lamine Deneyi.....	51
2.6.3 50 mm Kalınlığa Sahip Lamine Deneyi.....	55
2.6.4 70 mm Kalınlığa Sahip Lamine Deneyi.....	58
2.7 Lamine Testlerinin Sonuçları.....	62
 BÖLÜM ÜÇ - BETONARME KİRİŞLERE UYPB LAMİNE ELEMAN	
UYGULANMASI.....	63
3.1 Genel	63
3.2 Deney Elemanları.....	64
3.2.1 Eğilme Dayanımı Artırılacak Deney Elemanları.....	64
3.3 Deney Elemanlarının Üretilmesi	66
3.3.1 Malzemeler	66
3.3.2 Beton.....	66
3.4 Deney Elemanlarının Üretilmesi.....	69
3.5 Gerçek Ölçekli UYPB Laminelerin Betonarme Kirişlere Farklı	
Yöntemlere Uygulanması	71
3.5.1 Eğilme Yetersizliğine Sahip Elemanlara Farklı Yöntemlerle UYPB	
Lamine Uygulanması	71
3.6 Yükleme ve Ölçüm Düzeneği	75
 BÖLÜM DÖRT - BETONARME KİRİŞLERDE YÜKLEME	
DENEYLERİ.....	77
4.1 Eğilme yetersizliğine sahip kiriş deneyleri	77

4.1.1 Deney Elemanı-1.....	77
4.1.2 Deney Elemanı-2.....	80
4.1.3 Deney Elemanı-3.....	83
4.1.4 Deney Elemanı-4.....	87
4.1.5 Deney Elemanı-5.....	91
 BÖLÜM BEŞ - DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	94
 5.1 UYPB'nin Eğilme Dayanımına Katkısının İncelenmesi.....	94
5.1.1 Dayanım ve Davranış	94
5.1.2 Enerji Tüketimi	99
5.1.3 Rijitlik.....	102
 BÖLÜM ALTI - SONUÇLAR VE ÖNERİLER	104
 KAYNAKLAR	107

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Nano silisin (sol) ve nano kireçtaşının (sağ) mikroskop görüntüleri	3
Şekil 1.2 Erken ve uzun dönemde basınç dayanımının gelişimi.	5
Şekil 1.3 Farklı S/B oranlarına sahip Y-RPB karışımların eğilme ve basınç dayanımları	5
Şekil 1.4 RPB ve Y-RPB karışımlarına gömük çelik lifin yük –sıyrılma eğrileri .	6
Şekil 2.1 Deneysel çalışmanın akış şeması.....	23
Şekil 2.2 Çalışmada kullanılan bağlayıcı maddeler ve agregalar	26
Şekil 2.3 Çalışmada kullanılan lif türleri	26
Şekil 2.4 Hobart Mikseri.....	30
Şekil 2.5 Buhar kürü rejimi	31
Şekil 2.6 Üç noktalı eğilme deney düzeneği	31
Şekil 2.7 13 mm uzunluklu lif (a) ve 13 mm + 6 mm uzunluklu hibrit lif (b) kullanımının işlenebilirliğe etkisi.....	32
Şekil 2.8 13 mm'lik mikro lif dozajına (a) ve 13 mm + 6 mm hibrit mikro lif dozajına (b) bağlı olarak su kürü altında elde edilen basınç dayanımları.	33
Şekil 2.9 13 mm'lik mikro lif dozajına (a) ve 13 mm + 6 mm hibrit mikro lif dozajına (b) bağlı olarak buhar kürü altında elde edilen basınç dayanımları.....	34
Şekil 2.10 13 mm'lik mikro lif (a) ve 13 mm + 6 mm hibrit mikro lif (b) kullanımına bağlı olarak buhar kürü / su kürü bağlı dayanımları.	34
Şekil 2.11 13 mm'lik mikro lif hacmine bağlı olarak su kürü (a) ve buhar kürü (b) altında elde edilen eğilme yükü - sehim eğrileri.	35
Şekil 2.12 13 mm + 6 mm mikro lif hacmine bağlı olarak su kürü (a) ve buhar kürü (b) altında elde edilen eğilme yükü - sehim eğrileri.	36
Şekil 2.13 13 mm'lik mikro lif hacmine bağlı olarak su kürü (a) ve buhar kürü (b) altında elde edilen eğilme dayanımları.	37

Şekil 2.14 13 mm + 6 mm hibrit lif hacmine bağlı olarak su kürü (a) ve buhar kürü (b) altında elde edilen eğilme dayanımları.	38
Şekil 2.15 13 mm (a) ve 13 mm + 6 mm hibrit lif (b) hacmine bağlı olarak su kürüne kıyasla buhar kürü eğilme dayanımları.	38
Şekil 2.16 13 mm'lik mikro lif hacmine bağlı olarak su kürü (a) ve buhar kürü (b) altında elde edilen eğilme toklukları.	39
Şekil 2.17 13 mm + 6 mm hibrit lif hacmine bağlı olarak su kürü (a) ve buhar kürü (b) altında elde edilen eğilme toklukları.	40
Şekil 2.18 13 mm (a) ve 13 mm + 6 mm hibrit lif (b) hacmine bağlı olarak su kürüne kıyasla buhar kürü toklukları	40
Şekil 2.19 UYPB mikseri	42
Şekil 2.20 Lamine kalıpları.....	43
Şekil 2.21 Lamine kalıpları için yan yüzler	43
Şekil 2.22 UYPB karıştırma prosedürü	45
Şekil 2.23 UYPB Lamine üretimde kullanılan malzemeler	45
Şekil 2.24 Bağlayıcıların karıştırılması	45
Şekil 2.25 Bağlayıcılara su+akışkanlaştırıcı çözeltisinin ilavesi.....	46
Şekil 2.26 Çelik mikro liflerin serpiştirilerek karışıma eklenmesi	46
Şekil 2.27 Karışım süreci tamamlanmış taze UYPB	46
Şekil 2.28 Taze UYPB'nin kalıba dökülmesi	47
Şekil 2.29 Taze UYPB'nin şiş ve vibrasyon ile yerleştirilmesi	47
Şekil 2.30 Laminelerin ıslak örtü ve naylon örtülerek kür edilmesi.....	48
Şekil 2.31 İçerisinde Boyuna Donatı Bulunan UYPB Üretilmesi	49
Şekil 2.32 Deney düzeneği.	51
Şekil 2.33 30 mm kalınlığında lamine deneyi.	51
Şekil 2.34 Deney elemanının 30 mm deplasman hali.....	52
Şekil 2.35 Deney elemanının 91 mm deplasman yapmış görünümü.....	52
Şekil 2.36 Laminede çatlak oluşumu	53
Şekil 2.37 Yük-deplasman eğrisi.	53
Şekil 2.38 30 mm kalınlığında lamine için Yük-birim deformasyon eğrileri.....	54
Şekil 2.39 50 mm kalınlığında lamine deneyi.	55
Şekil 2.40 40 kg yük seviyesinde lamine davranışı	55

Şekil 2.41 70 kg yük seviyesinde lamine davranışı	56
Şekil 2.42 Lamine'nin maksimum deplasman halinde çekilmiş fotoğrafı	56
Şekil 2.43 Yük-deplasman Eğrisi.	57
Şekil 2.44 50 mm kalınlığında lamine için Yük-deplasman Eğrisi.	57
Şekil 2.45 70 mm kalınlığında lamine	58
Şekil 2.46 250 kg yük seviyesinde lamine davranışı.	59
Şekil 2.47 Lamine'de ilk çatlak oluşumu.	59
Şekil 2.48 Lamine'nin maksimum deplasman halinde çekilmiş fotoğrafı.	60
Şekil 2.49 Lamine alt yüzündeki çatlak.	60
Şekil 2.50 Yük-deplasman Eğrisi.	61
Şekil 2.51 70 mm kalınlığında lamine için Yük-deplasman Eğrisi.	61
Şekil 3.1 Eğilme dayanımı yetersiz deney elemanı.	64
Şekil 3.2 Sikadur 31 epoksi bileşenlerinin karıştırılması.	68
Şekil 3.3 Çelik kalıp kesit detayı.	69
Şekil 3.4 Donatı düzenlemesi.....	69
Şekil 3.5 Beton dökümüne hazır deney elemanları.	70
Şekil 3.6 Deney elemanları beton dökümü.....	70
Şekil 3.7 Beton yüzeyinin hazırlanması	71
Şekil 3.8 Yüzey pürüzlendirmesi tamamlanmış betonarme kiriş elemanı.....	72
Şekil 3.9 Sikadur 31 epoksinin betonarme kirişe spatula yardımıyla sürülmesi	72
Şekil 3.10 Sikadur 31epoksinin betonarme kirişe uygulanmış hali.....	73
Şekil 3.11 Sıkıştırma aparatı.	73
Şekil 3.12 UYPB lamine ile betonarme kirişin aparat ile sabitlenmesi.....	74
Şekil 3.13 UYPB lamine yapıştırılma işlemi.....	74
Şekil 3.14 Deney ve ölçüm düzeneği.	75
Şekil 4.1 Referans deney elemanı, Deney Elemanı-1.....	77
Şekil 4.2 İlk eğilme çatlağı, Deney Elemanı-1.	78
Şekil 4.3 Kirişte gelişen eğilme çatlakları.	78
Şekil 4.4 Kirişte çatlaklarının son hali.....	79
Şekil 4.5 Deney Elemanı-1 yük-deplasman eğrisi.....	79
Şekil 4.6 Deney Elemanı-2, 30 mm UYPB epoksi ile yapıştırılmış.....	80
Şekil 4.7 İlk eğilme çatlağı, Deney Elemanı-2.	80

Şekil 4.8 Kirişte gelişen eğilme çatlakları.	81
Şekil 4.9 UYPB laminede çatlak gelişimi.	81
Şekil 4.10 Deney Elemanı-2 (5100 kN yük seviyesinde).	82
Şekil 4.11 Deney Elemanı-2, göçme şekli.	83
Şekil 4.12 Deney Elemanı-2 Yük-Deplasman eğrisi.	83
Şekil 4.13 Deney elemanının test önceki durumu.	84
Şekil 4.14 Kirişte gelişen 1 ve 2 numaralı eğilme çatlakları.	84
Şekil 4.15 Kirişte gelişen eğilme çatlakları.	85
Şekil 4.16 Kirişte gelişen eğilme çatlakları.	85
Şekil 4.17 Kirişte gelişen eğilme çatlakları.	86
Şekil 4.18 Laminenin kirişten ayrılması.	87
Şekil 4.19 Deney Elemanı 4 yük-deplasman eğrisi.	87
Şekil 4.20 Deney elemanının test önceki durumu.	88
Şekil 4.21 İlk eğilme Çatlağı, Deney Elemanı 4.	88
Şekil 4.22 Deney Elemanı 4’da gelişen eğilme çatlakları.	89
Şekil 4.23 Deney Elemanı 4’da laminede gelişen çatlak.	89
Şekil 4.24 Deney Elemanı 4’da laminede gelişen 2.çatlak.	90
Şekil 4.25 Deney Elemanı 4 göçme şekli.	90
Şekil 4.26 Deney Elemanı-4 Yük-Deplasman eğrisi.	91
Şekil 4.27 Deney elemanının test önceki durumu.	91
Şekil 4.28 Deney elemanının göçme şekli.	92
Şekil 4.29 Deney elemanının göçme şekli.	92
Şekil 4.30 Yük deplasman eğrisi, Deney Elemanı-5.	93
Şekil 5.1 Deney elemanlarında kalınlık değişimi etkisi-1.	97
Şekil 5.2 Deney elemanlarında kalınlık değişimi etkisi-3.	98
Şekil 5.3 Deney elemanları birikimli enerji tüketim grafikleri.	100
Şekil 5.4 Deney Elemanı-2 ve 4’nın enerji tüketim eğrileri (UYPB kalınlık değişimi).	101
Şekil 5.5 Deney Elemanı-3 ve 5’in enerji tüketim eğrileri (UYPB kalınlık değişimi).	101

TABLolar LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri	24
Tablo 2.2 SD'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri	24
Tablo 2.3 Kuvars agregalarının kimyasal kompozisyonu	25
Tablo 2.4 Kuvars agregalarının elek analizleri	25
Tablo 2.5 Lif türleri ve bazı özellikleri	26
Tablo 2.6 Hiperakışkanlaştırıcı katkının genel özellikleri	27
Tablo 2.7 13 mm uzunluklu mikro lif taramasına konu olan karışım oranları ...	28
Tablo 2.8 13 mm + 6 mm uzunluklu mikro liflerin taramasına konu olan karışım oranları	29
Tablo 2.9 UYPB karışım oranları.	44
Tablo 3.1 Eğilme Dayanımı Artırılan Deney Elemanlarının Özellikleri	65
Tablo 3.2 Kiriş imalatında kullanılan betonun karışım oranları	66
Tablo 3.3 Donatının mekanik ve kimyasal özellikleri	67
Tablo 3.4 Sikadur 31'in özellikleri	68
Tablo 5.1 Maksimum kuvvet değerleri	96
Tablo 5.2 Deney sonuçlarının özeti.	96
Tablo 5.3 Deney elemanlarının birikimli enerji tüketim değerleri.	99
Tablo 5.4 Deney Elemanlarının Rijitlik Değerleri.	102

BÖLÜM BİR

GİRİŞ VE LİTERATÜR TARAMASI

Çeşitli yetersizliklere sahip betonarme elemanlarının mevcut durumunu iyileştirmek için literatürde çeşitli yöntemler önerilmektedir. Mevcut yöntemlerin sahip oldukları eksiklikler nedeniyle yeni yöntemlere her zaman ihtiyaç duyulmaktadır. Ultra yüksek performanslı beton (UYPB): çimento esaslı, çelik ve muadili yüksek dayanımlı lifler içeren, sünekliği geleneksel betona kıyasla yüksek, çevre koşullarına daha dayanıklı, basınç mukavemeti 150 MPa ve üzeri olarak tarif edilen yeni nesil çimento esaslı bir kompozit malzemedir. UYPB'nin dünyada kullanımı geniş açıklıklı köprü kirişleri, mimari tasarımların getirdiği narin kabuk ve döşemeler, geniş açıklıklı stadyum elemanları, görsellikle birleşmiş kent mobilyaları ve rögar kapağı gibi altyapı ürünlerini içeren geniş bir alana yayılmaktadır. UYPB'nin üstün mekanik özelliklerinin yanı sıra durabilitesinin geleneksel çimento esaslı malzemelere kıyasla katbekat yüksek olması, güçlendirme ve onarım amaçlı kullanımı konusunda araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Proje kapsamında UYPB kullanılarak üretilen laminelerin, eğilme veya kesme yetersizliğine sahip betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Tezde ilgili gerçekleştirilen literatür araştırması 3 ana başlık altında sunulmuştur. Literatür araştırması yapılırken ana amaç çalışmaya ışık tutacak verilerin belirlenerek derlenmesidir.

Literatür araştırmasında öncelikle proje kapsamında kullanılacak betonarme lamine elemanlardaki lif oranlarının belirlenmesine yardımcı olacak kaynaklar taranmıştır. Literatürde yer alan ve Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) malzemeleri ile gerçekleştirilen çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Daha sonra UYPB'nin yapısal elemanlarda katkı sağlayan lamine ya da katman şeklinde kullanılmasının incelendiği çalışmalar değerlendirilmiştir. Bu çalışmalardan kiriş uygulamaları öncelikle incelenmiştir. UYPB'nin bu çalışmada olduğu gibi levha şeklinde uygulandığı durumda eski beton ile levhanın bağ davranışı önemlidir. Bağ

davranışı kompozit elemanın nihai davranışını doğrudan etkileyecektir. Bu nedenle biri eski biri de yeni olmak üzere iki betonun birbirine bağlandığı durumları inceleyen çalışmalarda incelenmiş ve bu bölümde özetlenmiştir.

Son olarak deneysel elemanların performanslarını değerlendirmek, çatlama mekanizmalarını oluşum anında ve süresince neden ile ilgili önceki çalışmalar incelenmiştir. Gerçekleştirilen literatür çalışması UYPB üzerine güncel malzeme çalışmaları, Lifli betonların çeşitli yetersizliklere sahip kırılganlığa uygulanması konusundaki çalışmalar ilgili çalışmalar başlıkları altında aşağıda özetlenerek verilmiştir.

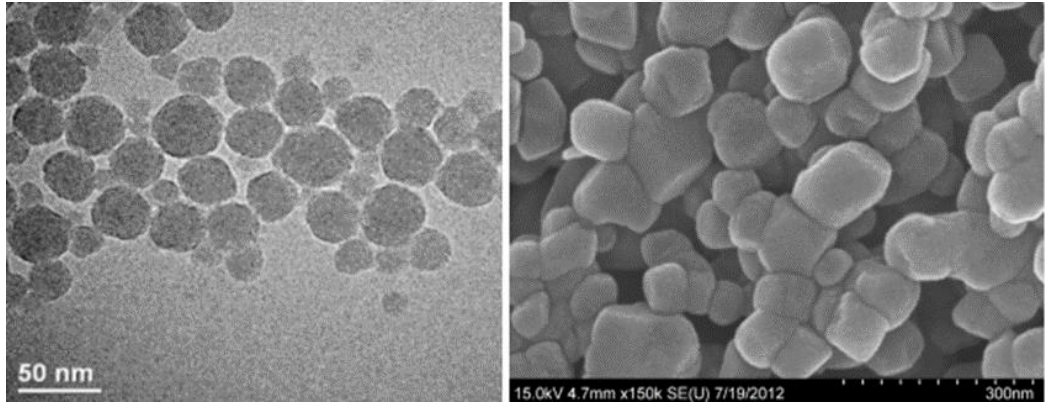
1.1 UYPB üzerine güncel malzeme çalışmaları

Bu kısımda Ultra Yüksek Performanslı Beton'un geliştirilmesi aşamasında yardımcı olacağı düşünülen malzeme deneyleri incelenmiş ve bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Mikro boyutta agregaların kullanılması, tane çapı ve miktarının optimizasyonu, CaO/SiO₂ oranının silisçe zengin bileşenler ile düşürülmesi, üstün nitelikteki akışkanlaştırıcılar kullanılarak su/çimento oranının düşürülmesi, sıcaklık ve basınç altında kür, çelik liflerin katılması prensipleri ile UYPB'lerin özellikleri geliştirilebilmektedir. Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarı bünyesinde yürütülen araştırma sonucunda yüksek fırın cürufu veya uçucu kül gibi puzolanik malzemelerin yüksek oranda kullanılabileceği, böylelikle RPB'nin geleneksel beton çimento dozajlarında üretilmesinin mümkün olduğu saptanmıştır. Yazıcı, ve diğer (2009), kür türünün (standart su, buhar ve otoklav) ve mineral katkı ikamesinin RPB'nin mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda basınç dayanımı 200 MPa'yı aşan, eğilme dayanımı 38 MPa'ya ulaşan RPB'ler üretilmiştir. Yazıcı ve diğer (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada mineral katkıların RPB üretiminde silis dumanı yerine kullanımı araştırılmıştır. Uçucu kül veya yüksek fırının bu amaçla kullanılabileceği, uygun molar CaO/SiO₂ oranı ile performansı arttırılabileceği görülmüştür. Basınç dayanımı 300 MPa'yı aşan RPB'ler,

normalden çok daha düşük çimento içeriğiyle elde edilmiştir. Yazıcı (2007)'nin araştırmasında yüksek oranda uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren çok yüksek dayanımlı betonların farklı kür koşullarındaki basınç dayanımlarını belirlenmiştir. Deneysel çalışma sonucunda, düşük çimento dozajlı yüksek mineral katkılı betonlarda otoklav kürü ile çok yüksek basınç dayanımları elde edilebileceği görülmüştür.

Li ve diğer. (2015) nano silis ve nano kireçtaşı katkılarının farklı kür koşulları altında UYPB'nin akıcılığı, mekanik özellikleri ve içyapısına etkisini araştırmıştır. Nano silisin ve nano kireçtaşının boşluk doldurma ve çimento hidratasyonu hızlandırma etkisi ile sırasıyla %1 ve %3 ikame oranlarında mekanik performansı arttırdığı belirlenmiştir (Şekil 1.1). Rong ve diğer. (2015) de nano silisin %3 ikame oranına kadar mekanik özellikleri geliştirdiğini, üzeri ikame oranlarında görülen kümelenme sebebiyle hafif bir performans kaybı oluştuğunu tespit etmiştir.

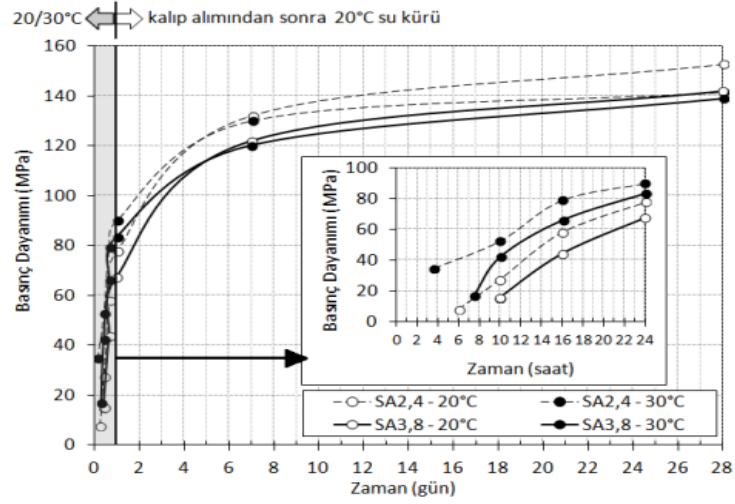


Şekil 1.1 Nano silisin (sol) ve nano kireçtaşının (sağ) mikroskop görüntüleri (Rong ve diğer, 2015)

Yu ve diğer. (2015) çevre dostu UYPB üretiminde kullanılabilecek uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve taş tozu katkılarının mekanik özelliklere etkisini araştırmıştır. Araştırmacılar ilk 5 gün içerisinde tüm katkıların hidratasyon kinetiklerinin benzer olduğunu, yüksek fırın cürufu kullanımı sonucu uzatılmış kürlerde ise hidratasyon hızının arttığını tespit etmiştir. Mekanik özellikler anlamında en büyük verim yüksek fırın cürufu ikamesiyle elde edilmiştir. Uçucu kül ikamesi, akışkanlaştırıcı ihtiyacını çok fazla arttırdığından puzolanik reaksiyonun geciktiği belirlenmiştir. CO₂ emisyonları hesaplandığında mineral katkı kullanımının önemli bir avantaj getirdiği saptanmıştır.

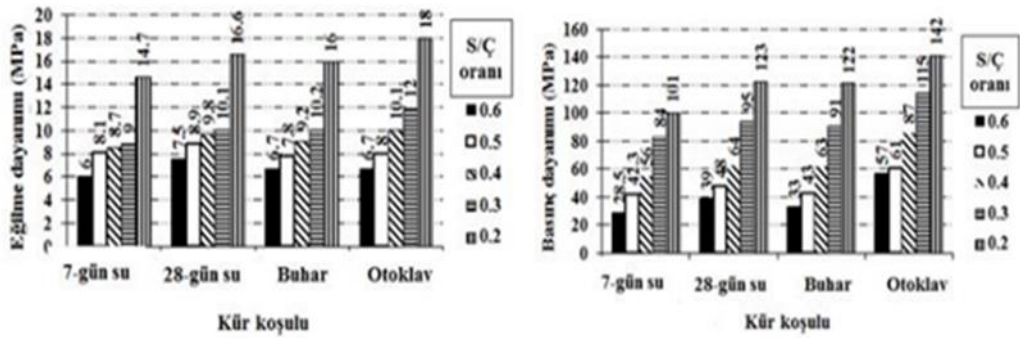
Yalçinkaya ve diğer.(2014) RPC'nin aşınmaya maruz kalan inşaat mühendisliği yapılarında kullanım potansiyeli yüksek olduğu belirtilebilir. Çelik mikro fiberler kullanılarak aşınma direnci ve mekanik özellikler iyileştirilebilir. Liflerin pozitif etkisi W / C oranı azaltılarak arttırılabilir. Ayrıca, W / C oranına bağlı olarak aşınma direncindeki farklılıklar, % 3 fiber hacmi kullanılarak elimine edilebilir. RPC içeren elyafların basınç dayanımı ve tokluk değerleri aşınma kaybı değerleri ile ilişkilendirilmiş ve iyi bir korelasyon elde edilmiştir. suyu drenaj sistemleri için prefabrike RPC elemanları giderek daha fazla kullanılmaktadır. Yoğun trafik yükleri nedeniyle mekanik aşınmaya maruz kalmada RPC'nin iyi bir alternatif malzeme olduğu anlaşıyor.

Yalçinkaya ve diğer.(2013) UYPB, 'kendiliğinden yerleşen kıvamda üretilmektedir. Ancak viskoz ve yoğun kıvamı sebebiyle hava sürüklenme eğilimi belirgindir. Ayrışmaya karşı yüksek direnci sayesinde sıkışık hava içeriğini azaltmak için vibrasyon uygulanabilir. SA içeriğinin %2,4'ten %3,8'e çıkması ile priz süreleri önemli oranda uzamaktadır. Sıcaklığın 10°C artışı, priz gelişimini önemli ölçüde hızlandırmaktadır. İlk 24 saatteki maksimum deformasyon değeri tüm karışımlar için -550 ila -600µε aralığındadır. Ortam sıcaklığının artışı priz başlangıcından itibaren büzülme eğilimini hızlandırırken, 24 saat içindeki maksimum büzülmeyi önemli oranda değiştirmemiştir. Katkı dozajının artışı, efektif S/B oranını yükseltmektedir. Bu sebeple SA'nın artışı maksimum büzülmeyi belirgin ölçüde arttırmamıştır. Basınç mukavemeti 1. gün sonunda iki farklı SA oranı ve sıcaklık için 67 – 90 MPa aralığında elde edilmiştir. Erken yaş ortam sıcaklığının artışı ilk günlük mukavemet gelişimini hızlandırırken, su kürü ile elde edilen uzun dönemli mukavemetleri düşürmüştür. Bu etki düşük SA dozajında daha belirgindir. 28 günlük mukavemetler 140 – 153 MPa arası elde edilmiştir. SA artışı ile efektif S/B oranının artışı dayanımı düşürmüştür'(S.4).

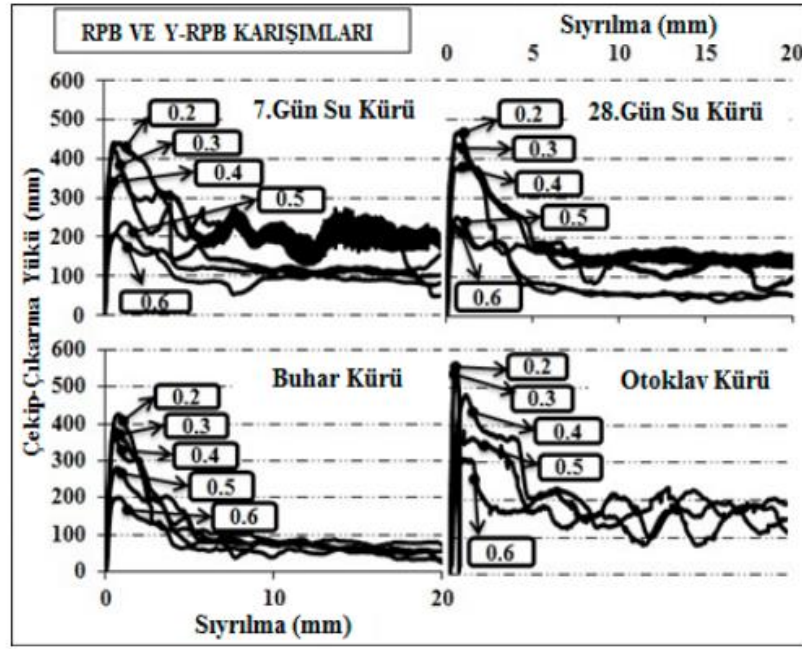


Şekil 1.2 Erken ve uzun dönemde basınç dayanımı gelişimi (Yalçinkaya ve diğer,2013)

Beglarigale ve Yazıcı ,(2015) Lif-matris aderansı çimento esaslı lifli kompozitlerin performansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Lif türü ve geometrisi, matris dayanımı, lif-matris arayüzey özellikleri ve kür koşulları gibi birçok parametre lif-matris aderansını etkilemektedir. Çalışma kapsamında çeşitli su/bağlayıcı oranına sahip karışımlar tasarlanmış ve farklı kür yöntemleri uygulanarak, lif-matris aderansları çekip-çıkarma deneyi ile incelenmiştir. Otoklav kürü sonrası çarpıcı aderans artışları içyapı analizleri ile açıklanabilmektedir. Ayrıca su/bağlayıcı oranının önemi kapsamlı olarak irdelenmiştir.



Şekil 1.3 Farklı S/B oranlarına sahip Y-RPB karışımların eğilme ve basınç dayanımları (Beglarigale ve Yazıcı, 2015)



Şekil 1.4 RPB ve Y-RPB karışımlarına gömük çelik lifin yük –sıyırılma eğrileri (Beglarigale ve Yazıcı, 2015)

Aydın ve diğer. (2015) çalışma kapsamında 900 ° C'ye kadar yüksek sıcaklıkların normal mukavemet, su kürü ve otoklav kürü yüksek dayanımlı harçlara etkileri incelenmiştir. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, elastikiyet modülü ve numunelerin ağırlık kaybı gibi mekanik özellikler belirlenmiştir. Polipropilen (PP) ve çelik elyafların birleştirilmesinin yüksek mukavemetli harçların yüksek sıcaklık davranışları üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Mikroyapı incelemeleri de SEM analizleri ile yapılmıştır. Test sonuçları, tüm karışımların basınç dayanımının, 300 ° C'ye kadar artan sıcaklıkla arttığını arttırdığını gösterdi. Bununla birlikte, 300 ° C'nin üzerinde bütün numuneler, normal dayanımlı harçlar dışında ve PP elyaflı yüksek dayanımlı harçlar dışında patlayıcı parçalanma gösterdi. PP elyafların katılması, yüksek mukavemetli harçların patlayıcı parçalanma davranışının önlenmesinde etkili görünmektedir. Öte yandan, çelik lifler yüksek sıcaklık direncini iyileştirmedir. Yayılmayı önlemek için, otoklav ve su ile kürlenmiş yüksek mukavemetli harçlar için minimum PP dozu sırasıyla% 0,2 ve% 0,1 olarak belirlenmiştir.

Yalçınkaya ve Yazıcı (2016) Yüksek miktarda çimento esaslı malzeme ve düşük su / bağlayıcı (W / B) oranı büzülme gerilimini artırır, bu da ultra yüksek performanslı betonun (UHPC) çatlak oluşum riskini artırır. Bu çalışmada silis dumanı değiştirme

oranının reolojik özellikler ve UHPC macununun otojen büzülmesi üzerine etkileri incelenmiştir. Çok düşük W / B oranına sahip dört macun (0,20) üretildi. Bir bilya ölçüm sistemine sahip reometrenin yanı sıra, reolojik özellikleri belirlemek için mini çökme ve V-huni testleri uygulanmıştır. Ayrıca, erken yaşta bir lazer sistemi kullanılarak otojen büzülme ölçülürken, uzun süreli ölçümler için mekanik bir karşılaştırmacı kullanılmıştır. Sonuç olarak,% 20'ye kadar SD'ye sahip olan macunlar dilatan davranış sergilemiştir. Erken yaşta büzülmenin, uzun süreli büzülmeden çok daha yüksek olduğu tespit edildi. SD replasmanının bir sonucu olarak hem erken yaş hem de toplam otojen deformasyon artmıştır. Uzun süreli ve toplam deformasyonlar, SD replasmanının% 20'den% 30'a çıkarılmasıyla önemli ölçüde artmıştır.

Beglarigalea ve diğer. (2013) Çalışma sonucunda hacimce %2 çelik lif kullanımı ve çimentoya %20 silis dumanı ikamesi ile basınç dayanımı 213 MPa'ya, eğilme dayanımı 30 MPa'ya ulaşan çimento esaslı kompozit malzeme üretilmiştir. Çalışmada silis dumanının iki önemli etkisi tartışılmıştır. Bunlardan ilki lif içermeyen yalın matristeki mukavemetin artışı (C-S-H yapısının güçlenmesi) bir diğeri de arayüzey özelliklerinin geliştirilmesidir. Kompozitin dayanımına hızlı ulaşması ve mekanik özelliklerinin geliştirilebilmesi açısından otoklav kürü büyük bir potansiyele sahiptir. Ancak otoklav küründen beklenen performansı alabilmek için gerekli SiO₂ kaynağını kullanarak içyapı ürünlerinin mikro boyutta tasarlanması gerekmektedir. Böylelikle α-C₂SH yapısının tobermorit yapısına dönüştürülmesi sağlanabilmektedir. Ayrıca karışımda kullanılan çelik lifler ile matris arayüzeyinin güçlendirilmesi açısından silis dumanı kullanımı halen en sık başvurulmuş çözüm yöntemidir. Lif – matris arayüzeyinin çeşitli nano boyutlu parçacıklarla güçlendirilmesi, bu bölgenin karakterizasyonunun tasarıma daha pratik biçimde yansıtılabilmesi, RPB üretimine uygun çimento üretimi gibi konular önerilebilecek çalışmalardır.

Gesoglu ve diğer. (2015) Orta Doğu'nun birçok yerindeki agregalar alçı ile kirlenmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada, alçı ile kirlenmiş doğal kum kullanımının ultra yüksek performanslı elyaf takviyeli çimentolu kompozitlerin (UHPRCC'ler) basınç dayanımı ve genleşmesi üzerindeki etkileri bir yıl boyunca araştırılmıştır. İki grup UHPRCC, Portland çimentosu, silis dumanı ve / veya öğütülmüş granül yüksek fırın

cürufunun ikili ve üçlü çimento esaslı harmanları ile tasarlanmıştır. Her grup, farklı SO₃ içeriği ağırlıkça% 0,11 ile% 4,5 arasında doğal kum olan beş karışımdan oluşuyordu. Her karışım için, numuneler 48 saatlik bir süre boyunca su ile kürlendi veya buharla kürlendi. Çimentolu kompozitlerin mikro yapısı da SEM-EDX tarafından incelenmiştir. Ayrıca, bazı UHPFRCC bulguları Portland çimentosu harçlarınıninkiyle karşılaştırıldı. Test sonuçları, UHPFRCC'lerin, harçların aksine, özellikle buhar kürü altında bir kuvvet artışı ve aşırı sülfat varlığında bile önemsiz bir genleşme gösterdiğini göstermiştir.

Shi ve diğer. (2015) çimento - silis dumanı - yüksek fırın cürufu bağlayıcılı UYPB'nin hidrasyonunu ve içyapı özelliklerini araştırmıştır. Faktöriyel tasarımı kullanılan çalışmada silis dumanının uygun oranının işlenebilirliği ve basınç dayanımını arttırırken porozite ve kalsiyum hidroksit değerlerini azaltabildiği belirlenmiştir. Yüksek fırın cürufunun ise basınç dayanımını azalttığı görülmüştür. Silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beraber kullanımı ile 3 günlük basınç dayanımının arttığı, negatif sinerjik etki olarak hidrasyon ısısının, porozitenin ve kalsiyum hidroksit miktarının yükselebildiği belirlenmiştir.

Wille ve Boisvert-Cotulio (2015) UYPB tasarımında mekanik özellikleri ve maliyeti optimize etmek için hamur fazı, çimentolu matris fazı ve lifli kompozit fazı olmak üzere üç fazda çalışma yürütmüştür. İzlenen yöntemin UYPB tasarımı için kullanılabilirliği ortaya konulmuş, 155 ila 200 MPa basınç dayanımında ekonomik karışımlar elde edilmiştir.

Vaitkevičius ve diğer. (2014) cam tozunun UYPB içyapısına etkisini araştırmıştır. Cam tozunun C-S-H yoğunluğunu arttırdığı, 30 MPa basınç dayanımı artışı sağlayabildiği, silis dumanına iyi bir rakip olabileceği, düşük olan puzolanik özelliğinin birincil faydasının olmadığı belirlenmiştir.

Aydın ve diğer. (2010) tarafından yapılan çalışmada farklı agregalar kullanılarak (kuvars, boksit, kireçtaşı, bazalt, granit, korund) RPB'ler üretilmiş ve agrega türünün mekanik özelliklere önemli etkileri olduğu ortaya konmuştur. Kireçtaşı agregası ile de

RPB sınıfında kompozitler üretilebileceği fakat 400 MPa gibi çok yüksek dayanımlara ancak boksit gibi daha özel agregalarla ve priz aşamasında basınç altında sıkıştırma uygulanmasıyla ulaşılabileceği gözlenmiştir. RPB'de toz boyuttaki agregaya 8 mm iri kuvars agregası ikamesi sonucu basınç performansının azalmadığı, donatı-beton aderansının arttığı belirlenmiştir (Collepardi ve diğer. 1997).

Yang ve diğer. (2014) iri agrega içeren UYPB karışımlarının genel özelliklerini araştırmıştır. Araştırmacılar 56 gün sonunda 150 MPa basınç dayanımına sahip, yüksek akıcılıkta bir karışımın iri agrega kullanımıyla mümkün olduğunu göstermiştir.

Zhao ve diğer. (2014) demir cevheri tortusunun UYPB üretiminde ince agrega olarak kullanımını araştırmıştır. Doğal agreganın tamamının demir cevheri tortusu ile değiştirilmesi sonucunda işlenebilirlik ve basınç dayanımları önemli oranda azalmıştır. %40 oranında cevher kullanımı sonucu buhur kürü ve uzun süreli su kürü altında mekanik özelliklerdeki olumsuzlukların azaldığı belirlenmiştir. Araştırmacılar cevher tortusu kullanımının poroziteyi artırdığını, porozitenin basınç dayanımı ile güçlü bir ilişkiye sahip olduğunu belirlenmiştir.

Ambily ve diğer. (2015) bakır cürufu UYPB'nin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Araştırmacılar bakır cürufu kullanımı ile 150 MPa basınç dayanımına sahip UYPB üretiminin mümkün olduğunu, basınç dayanımında 28 gün standart kür sonrası %15 ila %25 kayıp olabileceğini, eğilme yükleri altındaki performansın ise benzer olduğunu tespit etmiştir.

Yu ve diğer. (2014) atık taban külü agregası kullanılarak üretilmiş UYPB'nin özelliklerini araştırmıştır. Araştırmacılar taban külü içerisinde bulunabilen alüminyum parçacıklarının alkali çözeltiyle reaksiyonu sonucu oluşan hidrojenin makro çatlaklara sebep olabileceğini, mekanik özelliklerin olumsuz etkilenebileceğini saptamıştır. Nano silis ve karma lif (çelik ve polipropilen) kullanımı ile karşılaşılan olumsuzlukların giderilebileceği, tatmin edici eğilme dayanımlarına ulaşılabileceği tespit edilmiştir.

1.2 Lifli betonların çeşitli yetersizliklere sahip kirişlere uygulanması çalışmalar

Bu kısımda lifli beton uygulamasının çeşitli yetersizliklere sahip kirişlerde performans artırıcı olarak kullanıldığı çalışmalar özetlenmiştir.

Victor ve diğer. (1996) araştırmalarında; boyutları 304,8 mm x 76,2 mm x 12,7 mm olan dikdörtgen kesitli betonarme kirişler test etmişlerdir. Yükleme tekdüze olarak gerçekleştirilmiştir. Bir dizi test mikro parametrelerin kompozit çekme davranışı üzerindeki etkilerini incelemek için gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, deneysel çalışmanın değişkenlerini dikkate alacak şekilde en az üç çekme plakası örnekleri test edilmiştir. Buna göre, hacim oranı % 4 polietilen lifle güçlendirilmiş bir çimento macununun, düz çimento macununa göre 2 kat daha yüksek poroziteli olduğu bulunmuştur. Buna ek olarak tüm kompozitler net bir sözde-pekleşme davranışı göstermektedir. Ayrıca uzun lifler (16 ile 20 mm) ile teşkil edilmiş kompozitlerin daha büyük bir gerilme kapasitesi verdiği görülmüştür. Yükleme sırasında bu kompozitlerde çoklu çatlama (cihazsız görsel inceleme ile 7 çatlak) gerçekleştirdikleri gözlenmiştir. Numune kalınlığı sadece 12,7 mm olduğundan 16 mm ve 20 mm lifli kompozitler için matris içinde fiber yönlendirme çoğunlukla iki boyutlu olmaktadır. Buradaki verilere göre mikroskobik çekme gerilme eğrilerine dayanarak yüksek fiber hacmine sahip kompozitin güçlendirilmesinde etkinliği uzun lif uzunluğu ve sağlanan bağ özelliğine bağlıdır. Ancak başarısız örneklerin yüzeyinin dikkatli incelenmesi ile 6 mm üzeri uzun fiberlerin dışında, sorunun genellikle örneklerin kenarından başlayarak sadece bir ya da iki çatlak oluşması olarak ortaya çıktığı görülmektedir. Gerçekleştirilen deneylerde sadece uzun lifli kompozitin sözde pekleşmeye maruz kaldığı sonucuna varılmıştır. Bu kompozitlerde deney sırasında birden fazla çatlak gözlenmiş ancak numunede yükü boşalttıktan sonra bu çatlaklar kaybolmuştur.

Wuest (2006) gerçekleştirdiği çalışmanın detayları şu şekildedir. Betonarme yapılarındaki dayanım ve dayanıklılık problemlerini çözmek ve yük taşıma kapasitesini artırmak için güçlendirmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Ultra Yüksek Performanslı Fiber Takviyeli Beton (UHPFRC); mükemmel mukavemete sahip, kolay dökümü gerçekleştirilen, UHPFRC tabakalardan koruyucu bir tabaka oluşturarak

mevcut elemanların "yüzey iyileştirmesi ve sertleşmesi" için kullanılan ve dayanıklılık sağlayan özellikleri bünyesinde bir araya getirilmesi nedeniyle mevcut yapıların güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu makalede incelenen kompozit elemanların yük taşıma kapasitesini artırmak ve dayanıklılığı geliştirmek amacıyla iki UHPFRC katman ile göbek betonarme betonu birleştirilerek oluşturulan kompozit test elemanları test edilmiştir. Deneysel araştırmada 6 adet UHPFRC-beton kompozit elemanı test edilmiştir. UHPFRC katmanının altında bulunan büzülme ve eğilme elemanları göçme yüklerine kadar test edilmiş ve sonuçları araştırılmıştır. UHPFRC rehabilitasyon potansiyelini değerlendirmek için, güçlendirme sonrası kompozit elemanların yapısal davranışları araştırılmıştır. Deneysel sonuçlara göre uygulanan UHPFRC katmanları uygulandığı elemanlarda rijitliğin artmasını sağlamaktadır. Ayrıca kompozit elemanlarda ara yüz pürüzlülüğün farklı olması yapısal davranış doğrudan etkilememiştir.

Brühwiler ve Denarié (2008) Ultra Yüksek Performans Fiber Takviyeli Betonu güçlendirme malzemesi olarak kullanmışlardır. Betonarme yapılar ciddi çevresel etkilere ve zamanla artan yüklere maruz kalmaları nedeniyle yapısal davranış ve dayanıklılığının geliştirilmesi gerekmektedir. Betonarme yapıların güçlendirilmesi sosyoekonomik açıdan ağır bir yük olduğundan ülkeler için önemli maliyetlerine neden olmaktadır. Bunun bir sonucu olarak, betonarme yapıların güçlendirilmesi için yeni yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bazı durumlarda betonarme yapıların için servis aksaklıkları gidermek için sadece koruyucu bakım ve asgari müdahaleler gerekebilir. Son 10 yılda yapı davranışını iyileştirmek için çimentolu malzemelerin liflerle birleştirilmesinden Beton Ultra Yüksek Performans Fiber Takviyeli (UHPFRC) ortaya çıkmıştır. Bu malzemenin yukarıda belirtilen durumlar için onarım ve güçlendirmede sağlayacağı katkıyı değerlendirmek bu bağlamda önemlidir.

Bu malzemeyi kullanmaktaki ana fikir, şiddetli çevresel etkilere ve yüksek mekanik yüklenmeye maruz kalan betonarme elemanların, Ultra Yüksek Performans Fiber Takviyeli Betonu (UHPFRC) ile onarılarak yapının yetersiz bölgelerinin güçlendirilmesidir. Bu TEZ UHPFRC'nin dayanım ve dayanıklılık özelliklerini güçlendirme çalışmalarında kullanarak betonun yapısal performansını artırmak için

etkili bir korumayı bir araya getirmek amaçlanmaktadır. Böylece bu çalışma ile betonarme yapıların iyileştirilmesi ve güçlendirilmesi için orijinal bir konseptin sunulması amaçlanmaktadır. Çalışmada öncelikle UHPFRC kavramı tanımlanmıştır, UHPFRC ile güçlendirilmiş betonarme elemanların yapısal davranışı ile ilgili detaylı bir ön çalışma gerçekleştirilmiştir. Daha sonra UHPFRC kullanılarak betonarme yapılarda çevresel etkiler ve yüksek mekanik yüklemeye karşı dayanım ve dayanıklılığını arttırmak için kompozit bir malzeme geliştirmiştir. Geliştirilen bu malzemenin geçerliliği gerçekleştirilen bazı uygulamalar vasıtasıyla doğrulanmıştır. Bu araştırma ile saha koşullarında döküm için uygun olan UHPFRC teknolojisi ve ön fabrikasyon beton üretimi için hangi standart donanım kullanılması gerekliliği incelenerek ortaya konulmuştur. Bu makale betonarme yapıların UHPFRC kullanılarak geliştirmek için gerçekleştirilen 12 yıllık yoğun araştırmanın özetidir.

Martinola ve diğer. (2010) gerçekleştirdikleri çalışmada yüksek Performanslı Fiber Takviyeli Beton’u kirişlerde katkısını incelemiştir. Günümüzde Fiber Takviyeli Beton (FTB) yapısal güvenlik açısından fiber polimerin kullanılmadığı durumlarda yaygınca kullanılmaktadır. Bu uygulamaların yanı sıra fiber polimer takviyenin yerine (nervürlü demir ya da kaynaklı tel) kısmen veya tamamen kullanıldığı yeni tarzda bazı uygulamalar da mevcuttur. Fiber Takviyeli Beton kirişlerde kesme takviyesi sağlamak için üretilen parçaların imalatında veya narin gövdeli elemanlarda güçlendirme elemanı olarak da kullanılabilir. Yük altındaki elemanda gerilme artışları sonrası elemanda gerilimde boşalması durumunda güçlendirilecek elemana FTB adapte edilebilir. Artan yükler altında sertleşme gösteren FTB malzemeleri ya da bir diğer adlarıyla “Yüksek Performanslı Fiber Takviyeli Beton (YPFTB)” malzemeleri, pratik kullanıma elverişli olup daha yeni uygulama alanları da bulunmaktadır. Bu malzemeleri kullanılarak şekil ile ilgili sınırlandırmalara bağlı kalmaksızın yeni geometri ve şekillere sahip güçlendirme detayları tasarlamak mümkündür. Bu çalışmada, 4,55 m uzunluğunda güçlendirilmiş betonarme kirişler test edilmiştir. Betonarme kirişlere güçlendirme malzemesi olarak yük altında sünek davranabilen fiber takviyeli betondan manto olarak uygulanmıştır. Uygulanan mantolar 40 mm kalınlığında olup kiriş yüzeylerine doğrudan uygulanmıştır. Bu çalışma kapsamında kirişlerin hem onarımı, hem de güçlenmesi değerlendirilmiştir. Deney elemanları

öncelikle belli bir hasar seviyesine kadar yüklenmiş daha sonra onarılmıştır. Gerçekleştirilen bu onarım ve güçlendirme davranışını daha iyi anlayabilmek için ayrıca sayısal bir analiz de yapılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçlar, önerilen bu tekniğin etkinliğini, hem nihai hem de kullanılabilir limit durumları için göstermektedir. Buna göre, güçlendirme malzeme ince bir tabaka halinde dökülebilir. Bu malzeme mevcut kiriş yüzeyine kumlama işlemi ve astar kullanmaksızın yapıştırılabilir. Deney sonuçlarına göre güçlendirme uygulamasından sonra küçülen çatlaklar ve uygulanan YPFTB matrisinin yoğunluğu, YPFTB uygulamasının yapı mukavemetini artırmada etkin bir yöntem olarak kullanılabilirliğini göstermektedir.

Hussein ve diğer. (2012) gerçekleştirdiği çalışmanın detayları şu şekildedir. Yapıları başarılı bir şekilde güçlendirmeyi etkileyen en önemli faktörlerden birisi, güçlendirmede kullanılacak materyalin seçimidir. Güçlendirilecek eleman ile güçlendirici madde arasındaki uyum, güçlendirmede kullanılacak materyalin seçimindeki kilit faktördür. Çimento bazlı materyaller, maliyet, bulunabilirlik ve inşa edilebilirlik gibi özelliklerinin yanı sıra, uyumlu mekanik ve fiziksel özelliklerinden ötürü genel olarak betonarme yapıların onarımı ve güçlendirilmesi için uygundur. Betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan, kirişin alt yüzeyine dökülen “Pekleşen Çimentolu Kompozitler (PÇK)” katmanı, yakın zamanda araştırma konusu olmuştur. Bu çalışma, gerilim lokalizasyonunun güçlendirilmiş kirişin sünekliğini sert bir şekilde kısıtlayan, Pekleşen Çimentolu Kompozit katmanında oluştuğunu göstermiştir. Bu makalede, çelik takviyeli Pekleşen Çimentolu Kompozit katmanı ile güçlendirilmiş (0,3% ve 0,6% çelik takviye oranında) betonarme kirişler üzerinde yapılan testler sonucu süneklik iyileştirilmesi sonuçları değerlendirilmiştir. Çelik takviyesiyle kombine edilmiş Pekleşen Çimentolu Kompozit, nihai yük altında güçlendirici Pekleşen Çimentolu Kompozit katmanında daha yüksek gerilime yol açmakta ve gözlemlenen erken gerilme tayinini engellemektedir. Nihai yük altında 0,3% ile 0,6% çelik takviyeli Pekleşen Çimentolu Kompozit-Güçlendirme katmanının kayda alınmış ortalama gerilimi, takviyesiz Pekleşen Çimentolu Kompozit katmanından sırayla 2,10 ve 3,76 kat daha fazladır. Ayrıca, 0,6% ‘lık takviye oranının kullanımı, Pekleşen Çimentolu Kompozit ile güçlendirilmiş kirişlerin başarısızlık durumunu “kırılgan” dan “sünek” davranışa değiştirmiştir. Dahası, 0,6% takviye

oranlı Pekleşen Çimentolu Kompozit-Güçlendirme katmanı, başarısızlığın gerçeklemek üzere olan tek belirtisi olarak, düzgün biçimde dağılım gösteren belirgin çatlaklar oluşturmuştur.

Betonarme yapıların tamir ve güçlendirilmesi ile ilgili çalışmalar, yapılarda ortaya çıkan aşırı sehim, servis yükü altında zayıf performans göstererek çatlama, inşaat hataları, tasarım hataları, aşırı yıpranma ve yapının kullanım durumunun değişikliği nedenlerinin sıkça görülmesi nedeniyle son yıllarda artmıştır. Betonarme kirişleri tamir etmek için ince çelik liflerin beton mantolamayla birlikte kullanılması maksimum kırılma yükünü artırmak dışında yangın dayanımının artırmak ve çelik levhayla görünen korozyon problemlerinin önlemek gibi birçok avantaja sahiptir. Güçlendirme ve kısa süreli tekrarlanan yüke maruz elemanlar için çelikte karıştırılmış liflerin beton mantolamada (MSFCJ) kullanılarak betonarme kirişlerin tamiri için yapılan çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada amaca uygun olarak kesiti 120×300 mm ve toplam uzunluğu 2300 mm olan on dört betonarme kiriş üç noktadan eğilme yükleri altında test edilmiştir. Beton karışımı için iki farklı biçimli (kıvrımlı ve çengelli) çelik lif kullanılmıştır. Öncelikle iki kiriş güçlendirme yapılmadan referans elemanı olabilmesi için imal edilmiştir. Bu kirişlerden biri statik yükler altında göçme yüküne kadar test edilmiştir. İkinci kiriş kısa süreli tekrarlanan yükler altında göçme yüküne kadar test edilmiştir. 12 kirişten 6'sı değişik kalınlıktaki U şeklinde MSFCJ ile güçlendirilmiştir. Geriye kalan 6 kiriş ise maksimum statik yükün %50'sine kadar yüklenmiş ve sonra MSFCJ kullanılarak onarılmıştır. MSFCJ uygulanan tüm 12 kiriş tekrarlanan yük altında test edilmiştir. Test sonuçlarına MSFCJ uygulanan tüm kirişler servis yüklerine ve nihai yüklere karşı yeterli dayanım ve rijitlik göstermektedir (Yehia ve diğer, 2013).

Ferrari ve diğer. (2013)'de kaleme aldıkları bu makalede, yüksek performanslı fiber katkılı çimento esaslı kompozit (HPFRCC) ve karbon fiber katkılı polimerleri (CFRP) bir arada kullanan bir güçlendirme yöntemi sunulmaktadır. Bu yaklaşımın performansının değerlendirilmesi için, eğilme yetersizliğine sahip betonarme kirişler CFRP levhalar ile güçlendirilmiş ve test edilmiştir. Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) betonarme (RC) yapıların güçlendirilmesinde yüksek dayanım-düşük ağırlık

oranı, korozyon direnci ve uygulama kolaylığı gibi birçok avantaj sunan, son yıllarda kabul görmüş önemli bir güçlendirme malzemesidir. Daha iyi beton çatlama kontrolü elde etmek için ve güçlendirmede uygulanan CFRP levhalarının yüzeyden ayrılmasını geciktirmek ya da önlemek için yüksek performanslı bir malzeme tasarlanmış, bu malzeme mikro HPFRCC ile karıştırılarak bir geçiş tabakası şeklinde deney elemanlarına uygulanmıştır. Gerçekleştirilen bu uygulama sonucunda, sahte gerilme sertleşmesi davranışı olan bir malzemenin yüksek mukavemeti ve kırılma dayanıklılığı elde edilmiştir. HPFRCC oluşturduğu geçiş tabakası yüzeyinde CFRP uygulanması önemli ölçüde test numunelerin performansı geliştirmiştir. Sonuçlar deneysel çalışma kapsamında gerçekleştirilen bu tekniğin betonarme kirişlerin eğilme güçlendirilmesi için daha güvenli bir alternatif sunabilir olduğunu göstermektedir.

Iskhakov ve diğer. (2013) bu çalışmada ultra yüksek performanslı betonun mekanik katkısını incelemişlerdir. İçerisinde fiber barındıran yüksek dayanımlı betonlar (SFHSC) betonarme elemanların onarımında kullanılan önemli malzemelerdendir. SFHSC kullanılarak onarılacak normal betonların (NSC) dizaynları iki farklı katmandan oluşan betonarme kirişlerin genel davranışlarıyla açıklanabilir. Bu elemanlarda basınç bölgesinde SFHSC betonu bulunurken çekme bölgesinde fiber bulunmayan NSC bulunmaktadır. Daha önce gerçekleştirilen çalışmalarda bu tip elemanların büyük eğilme momentleri taşımada başarılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. İçerisinde çelik lifler bulunan yüksek dayanımlı betonlar uygulandığı elemanın nihai deplasman kapasitesini içerisinde bulunan fiberler nedeniyle önemli oranda artırdığı çalışmada belirtilmiştir. Bu deneysel çalışma onarımı gerçekleştirilecek elemanlarda süneklik düzeyini artırmak için en optimal fiber içeriğini belirlemeye çalışmaktadır. Ayrıca fiberlerin kesit içerisinde dağılımı ve bu dağılım iki ayrı katmanda oluşunun etkisi de çalışma kapsamında incelenmiştir.

Deneysel çalışmada 3 adet 4,55 m uzunluğunda 500x300 mm enkesitinde dikdörtgen kiriş dört noktadan eğilme yükleri altında göçme yüküne kadar test edilmiştir. İlk kiriş referans deney elemanı olup bu elemanda herhangi bir yüksek dayanımlı mantolama uygulanmamıştır. İkinci deney elemanında 40 mm kalınlığında yüksek dayanımlı lifli beton ile uygulanmıştır. Son deney elemanı ise eğilme

kapasitesine ulaştırıldıktan sonra üzerindeki yük kaldırılmış daha sonra yüksek dayanımlı beton ile tekrar onarılmıştır. Uygulanan katmanların beton basınç dayanımı 180 Mpa olup içerisinde küçük elik lifler bulunmaktadır.

Bu alışma kapsamında elde edilen sonuçlar SFHSC kullanılarak onarılacak normal betondan yapılmış kiriş ve döşemelerin davranışının değerlendirilmesinde nc olacaktır.

Lima ve diğer. (2014)'in gerçekleştirdiği çalışmanın detayları şu şekildedir. Betona uygun hacimde elik lif eklenmesi, betonun gerilme mukavemetini ve sünekliliği artırmaktadır. Ancak, betona eklenen bu elik liflerin rastgele dağılımı ve yöneliminden sonra bu malzemeden elde edilen katkının alışılmış bir takviye ile sağlanacak katkıdan fazla olmamasına neden olabilir. Dolayısıyla, liflerin keşişmesi her yönde oluşarak, elemanın çatlama mukavemetini arttırması ve buna bağlı olarak çekme dayanımını arttırması gerekmektedir. Bu nedenlerden dolayı elik elar kesme yüklerine maruz kaldıklarında önemli ölçüde beton mukavemetine katkıda bulunur. Bu çalışmanın temel amacı, %1 ve %2 oranında elik liflerin a/d oranı 3'den küçük olan betonarme kirişlerin kesme dayanımına katkısını değerlendirmektir. Ayrıca, bu çalışmada bazı ampirik modellerin yüksek elik lif içeriği olan betonarme kirişlerin kesme mukavemeti tahmin etmede yeterliliğinin değerlendirilmesidir. Bu bağlamda bu çalışmada; elik lif takviyeli beton kirişlerin kayma mukavemetini ve mekanik davranışını test etmeyi amaçlanmaktadır. Kesme kuvvetlerine maruz altı betonarme kiriş göçme gerçekleşinceye kadar test edilmiştir. Ayrıca, beton kesme dayanımına lifkatkısını değerlendirmek için lifli beton ile üretilmiş prizmalar test edilmiştir. elik lifler düz, kanca uçlu, 35 mm uzunluğunda ve 65 mm uzunluğunda olacak şekilde seçilmiştir. Betona karıştırılan elik lifler hacimsel olarak %1,0 ve %2,0 oranındadır. Deney sonuçları betonarme kirişler de çatlak genişliği azaltmak için elik liflerin kullanımının etriye miktarını azaltılabileceğini ve kesmede önemli katkı sağladığını göstermiştir. Deneyssel olarak elde edilen deney sonuçları ampirik denklemler ile değerlendirilmiş ve elik lif takviyeli beton kirişlerin nihai kayma mukavemetinin tahmin edilmesinde yüksek değişkenlik sağladığını grlmştir. Kesme kuvvetine

takviye olarak kullanılan bu liflerin beton çatlama kontrolüne katkı sağlayarak çatlak genişliğini azaltabildiği deney sonuçlarından görülmektedir.

Gonzalo ve diğer. (2014)'in gerçekleştirdiği çalışmanın detayları şu şekildedir. Betonarme yapıları onarmak veya güçlendirmek için birçok farklı yöntem bulunmaktadır. Çelik plakalar, lifli polimerler veya beton katman ekleme bu yöntemlerden bazılarıdır. Betonarme yapılarda genellikle güçlendirme için beton katman ekleme ya da çelik plaka yapıştırma tercih edilmektedir. Literatürde bu yöntemlere alternatif bazı güçlendirme yöntemleri de bulunmaktadır. Yapıştırma ile gerçekleştirilen güçlendirmede en önemli sorun güçlendirme tabakasının yapışması ve dayanıklılığı olmuştur. Betonarme yapılarda gerçekleştirilen güçlendirmelerde güçlendirme tabakası / beton kırılma eğilimi gibi ara yüz yetersizliklerini gidermek için lif takviyeli beton (FRC) kullanılabilir. Lifle güçlendirilmiş polimer ile karşılaştırıldığında, fiberle güçlendirilmiş çimento kompozitleri yüksek sıcaklığa karşı yüksek direnç sunar ve ultraviyole radyasyon, daha uzun vadeli dayanıklılık ve alt-tabaka ile temelde daha uyumlu olmaktadır. Bu malzeme ayrıca liflerin kullanımı ile güçlendirme beton katmanlarında büzülme çatlama kontrolünde de yardımcı olmaktadır.

Lifler de en önemli geometrik özellik en boy oranıdır (uzunluk / çap). Lif şeklindeki bu elyaflar düz ya da bazen farklı bir kombinasyonu da kullanılabilir. Kısa lifler, ince çatlaklar (0,2-0,3 mm) arasında köprü kurmaktan sorumludurlar. Daha uzun lifler ise geniş çatlaklar dikilirken süneklik gelişimi sağlayarak büyük deformasyonların oluşmasını sağlamakta ve uygulandığı elemanın dayanımını geliştirmektedir.

Bu çalışmada kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin performansını iyileştirmek için çelik lif katkılı beton (SFRC) malzemesi güçlendirme malzemesi olarak kullanılmış, kirişler bu malzeme ile mantolama yapılmış ve test edilerek performansları değerlendirilmiştir.

Kesme yetersizliğine sahip betonarme kirişlerde eğilme problemi olmaması için yeterli boyuna donatı bulunmaktadır. Ancak kesme donatısı kesme güvenliğini

sağlayamayacak oranda yerleştirilmiştir. Bu kirişlerin bazıları çok yüksek mukavemetli sıvı SFRC mantolama ile güçlendirilmiştir. Bu kirişlerin bir kısmı, öncelikle kesme yükleri altında test edilmiş ve kirişlerde hasar oluşması sağlanmıştır. Daha sonra bu kirişler aynı teknikle onarılmıştır. Kirişlerde nervürsüz donatı ve beton içerisinde de iki farklı lifdozaj, 30 kg / m³, 60 kg / m³ ile SFRC, takviye için kullanılmıştır.

Onarılan kirişler, yeterli mukavemet ve deformasyon kapasitesi göstermişlerdir. Güçlendirilmiş kirişlerde yük taşıma kapasitesinde artış meydana gelmiştir. Ayrıca betona liflerin eklenmesiyle kirişlerde mantolama sonrası görülebilecek bağ açılmasının önlenmesinde önemli bir rol oynamıştır.

İki farklı betonun birbirleriyle bağlanması durumunda ara yüz davranışı nihai davranışı doğrudan etkilemektedir. Eski betonun farklı yöntemlerle hazırlanması ve bu hazırlıkların nihai davranışa olan etkisinin incelenmesi mevcut çalışmada ara yüz için uygulanacak yöntemin belirlenmesinde etkili olacaktır. Bu nedenle ara yüz davranışının incelendiği çalışmalar incelenmiştir.

Eduardo ve diğer. (2004) çalışmalarında bağ davranışını incelemiştir. Deneysel çalışma iki farklı katman arasındaki bağ davranışını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. İki farklı katmandan alt tabaka yüzeyinin pürüzlülüğü artırmak için farklı teknikler çalışma kapsamında değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında test edilen toplam 25 eğik kesme örnekleri ve 25 çekme örneğinin alt tabaka yüzeylerinin telle fırçalanmasıyla yüzey hazırlığı sağlanmıştır. Daha sonra bu elemanlarda kumlama; hafif bir çekiç ile yontma yöntemlerle yüzey hazırlığı tamamlanmıştır. Yüzey hazırlığı tamamlanan bu elemanlara üç ay sonra, yeni beton eklenmiştir. Deneysel çalışmada çekme testleri yeni beton ve eski beton arasındaki bağ gücündeki gerilimi değerlendirmek için yapılmıştır. Eğik kesme testleri ise kesme bağ kuvvetini ölçmek için yapılmıştır. Gerçekleştirilen testlerde; alt tabakanın beton karışımı, kullanılan onarım malzemeleri, örneklerin yaşları, sıcaklık ve bağıl nem koşulları, bağlayıcı maddelerin nihai kullanımı gibi farklar değerlendirilmiştir. Literatürde kabul

gören pürüzlendirme tekniklerini değerlendirmek için gerçekleştirilen uygulamalarda aşağıdaki durumlar dikkate alınmıştır.

Beton dökümünden önce yüzey çelik fırça ile hazırlanmış, yüzey kısmen yontulmuş ve su doygunluğuna artı olarak beton döküm öncesinde 24 saat yüzey kumlama ile işlenmiştir. Çalışmada, yeni beton döküm öncesi özgün beton yüzeyini ön ıslatma avantaj olarak kabul edilmiştir. Deney sonuçlarına göre eski ve yeni beton yapışma gücü en yüksek seviyeye kumlama ile ulaşılmıştır. Kum püskürterek temizlenmenin; alt-tabaka yüzeyinin hazırlamadaki tüm kabul tekniklerinden en yüksek değerleri veren yöntemi olduğunu kesme ve gerilme için yapışma gücü değerleriyle sunulmuştur. Ön-ıslatma alt tabaka yüzeyinin etkisiyle ilgili olarak, eğik kesme test sonuçları ve çekme test sonuçları arasında iyi bir ilişki gözlenmiştir. Deney sonuçlarına göre, çekme testleri yerinde bağ gücünü tahmin etmek yeterlidir. Ayrıca deney sonuçlarına göre alt-tabaka yüzeyine ön-ıslatma yapılmasının bağ mukavemetinin etkilemediği görülmüştür.

Santos ve diğer. (2012), Betonu Betona bağlamak, yeni yapılarda ve mevcut yapıların güçlendirilmesi oldukça yaygın bir uygulama şeklidir. Genelde mevcut betona sertleşmiş ya da ıslak beton yerleştirilir. Mevcut betonu sertleşmiş beton ile birleştirmek prekast elemanlarda yaygın bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu tür uygulamalar genellikle öngermeli viyadük ve köprüde kullanılmaktadır. Islak beton prekastlar ise sıklıkla güçlendirmede kullanılır. Bu teknikler güçlendirme, beton mantolama olarak kolon giriş gibi elemanlarda kısmen ya da tamamen yerinde dökme olarak sahada kullanılmaktadır. İki beton arasında yüzey yani betonlar arasındaki bağ gücünü artırmak için alt-tabaka yüzeyinin beton katman pürüzlülüğünü artırmak levhalarla güçlendirmede önemli bir yer tutmaktadır. Bu tip uygulamalarda iki ayırt edici durum tespit edilmektedir: Viyadük ve köprüler de prekast elemanlar, sertleşmiş betonun bir diğer sertleşmiş betona yerleştirilmesidir. Prekast elemanlar ile gerçekleştirilen güçlendirmede prekast elemanlar güçlendirilecek elemanlara sahada yerleştirilir. Bu uygulamalarda bazı parametreler gerçekleştirilen uygulamayı etkilemektedir. Bu çalışmada iki betonun birbirine bağlanması durumunda etkili olacağı düşünülen yüzey hazırlama; bağlayıcı madde kullanımı; zayıf beton basınç

dayanımı; alt-tabakanın nem içeriği; sertleştirme koşulları; ara yüzü gerilme durumu; çatlak oluşumu ve iki ara yüz arasındaki çelik donatı miktarı gibi parametreler incelenmiştir.

Bu çalışma somut ara yüzü betonun yapışma gücü yüzey hazırlığı ve yapıştırma maddesinin etkisini değerlendirmek için yapılan bir deneysel çalışmasını sunmaktadır. Bu çalışmada yüzey nem katkısı da ele alınmaktadır. Farklı yaşlarda beton katmanlar arasındaki bağa duyarlı etken parametrelere çift-yüzey kesme testinde etkili olduğunu kanıtlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmada taze halde betonun sertleştirilmiş alt tabaka karşı dökümünde, yüzey pürüzlülüğünde iyileşme sağlanmıştır ve bağ gücü için önemli bir katkı ortaya koyulmuştur. Ayrıca, ara yüzde bir bağlama maddesinin kullanılmasının avantaj sağladığı görülmüştür. Bununla birlikte, tür kumlama ile elde edilen daha pürüzlü yüzeylerde ise, bağlayıcı madde etkisi daha az belirgindir.

Santos ve Júlio (2013) gerçekleştirdiği çalışmanın detayları şu şekildedir. Yüzey pürüzlülüğü beton ile betonun birleştirildiği ve ara yüzlerin etkili olduğu durumlarda önemli bir rol oynar. Genel olarak yüzey hazırlığında kumlama ve su ile tahrip gibi yöntemler tercih edilmekte ve beton yüzeyin pürüzlülüğü arttırmak için tercih edilmektedir. Literatürde eski betonun pürüzlülük seviyesini belirlemek için görsel inceleme genellikle tercih edilen bir yöntemdir. Ancak bu işlemde görsel olarak yüzey pürüzlülüğüne karar veren teknik elemanın öznel görüşü dikkate alındığı için yanlış sonuçlara yol açabilir. Eski beton yüzeyinin koşullarını kontrol etmek için belirli bir yöntem ya da cihaz yoktur. Eski beton yüzeyinin durumu, mevcut betonarme yapıların yapısal rehabilitasyon sırasında önemlidir. Beton ile betonun birleştirildiği ve ara yüzlerin davranışının önemli olduğu durumlarda eski betonun mukavemetine ve rijitliğine; eski betonun nem oranına; eski betonda mikro-çatlak varlığına ve yeni beton rötesine bağlı olarak davranış farklılığı ortaya çıkmaktadır.

Ayrıca yüzeyin temizliği ve bağlayıcı maddelerin kullanımı gibi diğer parametrelerde etkilidir. Tel-fırçalama, Püskürtülen kum, atış ile kumlama ve su ile tahrip, yongalama gibi yöntemler genellikle eski beton yüzeyi hazırlamak için benimsenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü uygulanan hazırlama yöntemine bağlıdır, ancak

aynı zamanda birçok başka parametreler tarafından etkilenir,(a) yüzey üzerinde uygulanan basıncı;(b) çalışma süresi;(c) teknisyenin uzmanlığı;(d) malzeme yaşı ve diğerleri gibi.

Bu nedenle betonarme yapıların güncel tasarım kodlarında iki beton birleştirildiği durumlarda çeşitli kısıtlamalar sunmaktadır. Bu kısıtlamaların üstesinden gelebilmek için (1) yüzey dokusunu 2D profiller ya da 3 boyutlu yüzeyler ile tanımlanması; (2) Pürüzlülük parametrelerinin değerlendirilmesi, (3) Pürüzlülük parametreleri ile uyum ve sürtünme katsayıları tanımlanması; (4) Beton betona ara yüz yapışma gücü değerlendirmesi bilinmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi için gerekli olan pürüzlülük parametreleri hesaplamak için kullanılan pürüzlülük ölçümü yöntemleri incelenmiş ve birbirlerine karşı sahip oldukları avantajlar değerlendirilmiştir.

BÖLÜM İKİ

UYPB TASARIMI LAMİNE ELAMAN ÜRETİMİ VE DENEYLER

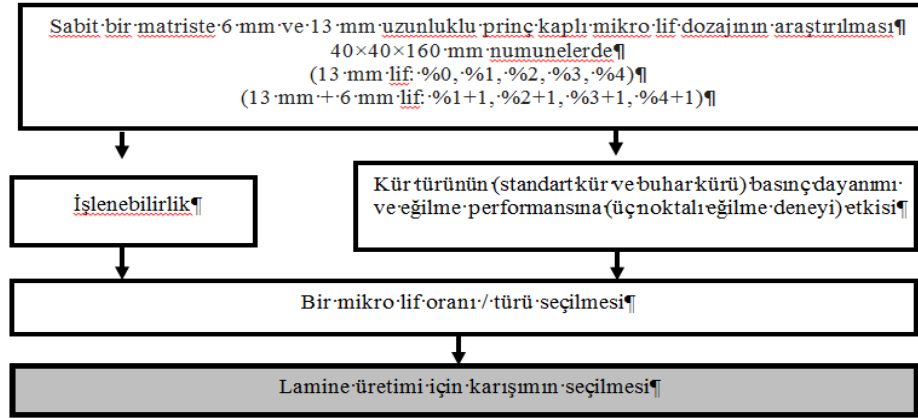
2.1 Genel

Çalışma kapsamında UYPB lamineler kesme ve eğilme yetersizliğine sahip betonarme kirişlere farklı bağ yöntemleri ile uygulanacaktır. Dışarıdan uygulanan lamineler yardımıyla yetersizliğe sahip betonarme kirişlerin dayanım ve davranışlarının iyileştirilmesi, göçme şekillerinin geliştirilmesi ve kısaca performanslarının artırılması hedeflenmektedir. Bu nedenle öncelikle güçlendirme malzemesi olarak kullanılabilecek uygun özelliklere sahip yüksek performanslı beton üretimi gerçekleştirilecektir. Geliştirilecek bu betonun sahip olduğu özellikler doğrudan uygulanacağı elemanın performansını etkileyeceği için detaylı bir malzeme geliştirme çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın detayları aşağıda sunulmuştur.

Daha sonra, uygun özelliklere sahip olduğu malzeme testleri ile ortaya konulan yüksek performanslı betonun gerçek boyutlu lamine halinde üretilmesi adımına geçilecektir. Gerçek boyutlu olarak üretilen laminelerin davranışlarının değerlendirilmesi için özel bir deney prosedürü çalışma kapsamında oluşturulmuştur. Lamineler 4 noktadan eğilme yükleri altında test edilmiş, sahip oldukları performans tek başlarına bulunmaları durumunda değerlendirilmiştir. Gerçek boyutlu lamine üretimi adımları ve test sonuçları bu bölümde sunulmuştur.

2.2 UYPB beton üretimi

Araştırmaya konu olan değişkenler ve belirlenen özellikler Şekil 2.1'de UYPB beton üretimi akış şemasında özetlenmektedir.



Şekil 2.1 Deneysel çalışmanın akış şeması

Çalışmada detayları ileride verilecek olan iki tür mikro lif kullanılmıştır. Bu mikro liflerin işlenebilirlik ve mekanik özelliklere etkisi (su ve buhar kürleri altında), 40×40×160 mm'lik prizmatik örnekler kullanılarak belirlenmiştir. Üç noktalı eğilme dayanımı ile yük-sehim eğrileri elde edilmiş, eğilme sonrası basınç dayanımları tespit edilmiştir. Kullanılan lif kombinasyonları 13 mm'lik mikro lifler için hacimce %0, %1, %2, %3 ve %4'tür. Daha sonra her bir 13 mm lif oranına ilaveten %1'er 6 mm uzunluklu mikro lif takviyesinin etkileri %1+1, %2+1, %3+1 ve %4+1 kombinasyonlarıyla araştırılmıştır.

2.1.1 Kullanılan Malzemeler

Çalışmada CEM I 42,5 R türü Denizli Çimento ürünü çimento (Ç) kullanılmıştır. Çimentonun özgül ağırlığı 3,12'dir. Silis dumanı (SD), BASF firmasının tedarik ettiği Meyco MS610 kodlu üründür. SD'nin özgül ağırlığı 2,2'dir. Çimentonun ve SD'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri sırasıyla Tablo 2.1 ve Tablo 2.2'de sunulmaktadır.

Tablo 2.1 Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal özellikler		Fiziksel özellikler	
SiO ₂ (%)	19,1	Özgül yüzey (Blaine) (m ² /kg)	369
Al ₂ O ₃ (%)	4,4	Priz başlangıcı (dk)	110
Fe ₂ O ₃ (%)	3,96	Priz sona ermesi (dk)	166
CaO (%)	61,85	Hacim Genleşmesi (mm)	1
MgO (%)	2,05	Basınç Dayanımı	
Na ₂ O (%)	0,27		
K ₂ O (%)	0,7		
SO ₃ (%)	3,72	2 günlük (MPa)	27,1
Cl ⁻ (%)	0,0004	7 günlük (MPa)	43,3
Kızdırma kaybı (%)	1,82	28 günlük (MPa)	56

Tablo 2.2 SD'nin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Kompozisyon	(%)
SiO ₂	92,26
Al ₂ O ₃	0,89
Fe ₂ O ₃	1,97
CaO	0,49
MgO	0,96
Na ₂ O	0,42
K ₂ O	1,31
SO ₃	0,33
Cl ⁻	0,09
Fiziksel Özellikler	-
Özgül yüzey m ² /kg	≈20000
Puzolanik aktivite indeksi, ASTM C-311 (28 gün), (%)	>95

Çalışmada Pomza Export firmasından temin edilen, Manisa yöresine ait kuvars agregaları kullanılmıştır. İlk aşamada üreticinin temin ettiği iki boyut aralığında kuvars agregası kullanılmıştır; 0 – 0,4 mm, 0,5 – 1 mm. Kullanılan agregaların özgül ağırlığının 2,65, su emmesinin 0,12 olduğu belirlenmiştir. Agregaların bazı kimyasal özellikleri Tablo 2.3'te, elek analizleri Tablo 2.4'de sunulmaktadır. Tablo 2.4'den görüleceği üzere 0,5 – 1 mm aralığı için %26 oranında 1 mm'den büyük tane bulunmaktadır. Bu tanelerin 1,2 mm çapına kadar olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kırma

olan kuvars kumlarında çok fazla oranda kusurlu, kübik yapıdan uzak kum taneleri gözlenmiştir. Elek analizindeki maksimum tane çapı farklılığının temel sebebi budur. Şekil 2.2'de karışımlarda kullanılan bağlayıcı maddelerin ve agregaların görünümü sunulmaktadır.

Tablo 2.3 Kuvars agregalarının kimyasal kompozisyonu

Kimyasal Kompozisyon	(%)
SiO ₂	99,79
Al ₂ O ₃	0,06
Fe ₂ O ₃	0,02
CaO	0,02
MgO	0,01
Na ₂ O	0,02
K ₂ O	0,01
SO ₃	-
Cl-	-

Tablo 2.4 Kuvars agregalarının elek analizleri

Elek Açıklığı (mm)	0,5 – 1 mm	0 – 0,4 mm
8	100	100
4	100	100
2	100	100
1	74	100
0,500	0	100
0,250	0	76,0
0,125	0	8,4
0,090	0	5,9
0,075	0	4,0
0,063	0	2,1
0,053	0	1,7

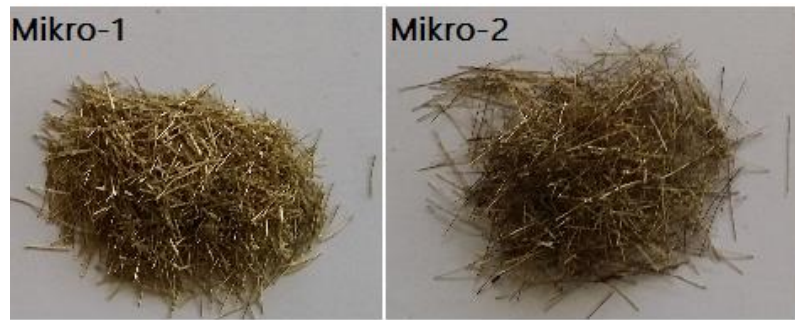


Şekil 2.2 Çalışmada kullanılan bağlayıcı maddeler ve agregalar(Kişisel arşiv, 2018)

Kullanılan mikro çelik lifler 6 mm ve 13 mm uzunluğa, 0,20 mm çapa sahip pirinç kaplı çelik liflerdir. Çalışmada kullanılan liflerin bazı özellikleri Tablo 2.5'de sunulmuştur. Kullanılan liflerin görüntüleri Şekil 2.3'de sunulmaktadır.

Tablo 2.5 Lif türleri ve bazı özellikleri

Lif türü	Uzunluk (mm)	Çap (mm)	Narinlik (uzunluk/çap)	Çekme dayanımı (MPa)	Özgül ağırlık	Geometri
Mikro-1	6	0,20	30	2750	7,17	—
Mikro-2	13	0,20	65	2750	7,17	—



Şekil 2.3 Çalışmada kullanılan lif türleri (Kişisel arşiv, 2018)

Hiperakışkanlaştırıcı olarak BASF firmasının geliştirdiği Glenium ACE 450 kullanılmıştır. Bu katkının genel özellikleri Tablo 2.6'da sunulmaktadır.

Tablo 2.6 Hiperakışkanlaştırıcı katkının genel özellikleri

Malzemenin yapısı	Polikarboksilik Eter Esaslı
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,082 - 1,142 kg/litre
Klor içeriği % (EN480-10)	< 0,1
Alkali içeriği % (EN 480-12)	< 3

2.2.2 Karışım Oranları

Çalışma kapsamında ilk olarak 13 mm'lik mikro lif dozajı Tablo 2.7'deki karışım oranları kullanılarak araştırılmıştır. Karışımların su/çimento oranı, silis dumanı oranı, çimento dozajı vb. parametreler ön denemeler. Karışımlarda yüksek oranda lif denemeleri yapılacağından matriste hamur hacminin yüksek tutulmasına ve işlenebilirliğin sağlanmasına çalışılmıştır. Ayrıca ön denemelerde 6 mm uzunluğundaki mikro lifler ile deformasyon sertleşmesi davranışının elde edilmesinin güç olduğu, çok yüksek lif dozajları gerektiği (> %5) görülmüştür. Bu sebeple temel lif fazı olarak 13 mm uzunluğundaki mikro lifler çalışmanın ana araştırma alanını oluşturmuştur. Kullanılan matris 1 mm maksimum tane çapına, 0,16 su/bağlayıcı oranına ve 0,20 su/çimento oranına sahiptir. Çimento ağırlığının %25'i oranında silis dumanı kullanılmıştır.

Tablo 2.7 13 mm uzunluklu mikro lif taramasına konu olan karışım oranları

Bileşen (kg/m ³)	Karışımlar				
	%0	%1	%2	%3	%4
Su	200	200	200	200	200
Çimento	1000	1000	1000	1000	1000
Silis dumanı	250	250	250	250	250
0,5 – 1 mm kuvars	585	566	549	531	512
0 – 0,4 mm kuvars	251	243	235	227	220
Mikro çelik lif (13 mm)	-	71,7	143,4	215,1	286,8
Akışkanlaştırıcı (ACE450)	25	25	25	25	25
Tasarım Özellikleri					
Mikro çelik lif hacmi (%)	0	1	2	3	4
Agrega hacmi (%)*	32				
Hamur hacmi (%)	68				
Su /Çimento	0,20				
Su / Çimento**	0,21				
Su/Bağlayıcı	0,16				
Su/Bağlayıcı**	0,17				

*Lifler agrega hacmine dahil edilmiştir. ** Katkıdan gelen su ile.

Çalışma kapsamında Tablo 2.7'de verilen karışımlara 6 mm uzunluğundaki mikro lifler %1 oranında ilave edilerek ikinci bir çalışma paketi oluşturulmuştur (Tablo 2.8). 6 mm uzunluklu mikro liflerle ise ilk çatlak dayanımının ve homojenliğin artırılması amaçlanmıştır. Bu araştırma paketindeki matris (lifsiz karışım) Tablo 2.7'de verilen ile aynıdır. Tablo 2.7 ve Tablo 2.8'de verilen karışımlar standart su kürü ve buhar kürü sonrası 40×40×160 mm prizmatik numuneler kullanılarak üç noktalı eğilme dayanımı ve eğilme sonrası basınç dayanımı deneylerine tabi tutulmuştur.

Tablo 2.8 13 mm + 6 mm uzunluklu mikro liflerin taramasına konu olan karışım oranları

Bileşen (kg/m ³)	Karışımlar				
	%0	%1+1	%2+1	%3+1	%4+1
Su	200	200	200	200	200
Çimento	1000	1000	1000	1000	1000
Silis dumanı	250	250	250	250	250
0,5 – 1 mm kuvars	585	549	531	512	493
0 – 0,4 mm kuvars	251	235	227	220	211
Mikro çelik lif (13 mm)	-	71,7	143,4	215,1	286,8
Mikro çelik lif (6 mm)	-	71,7	71,7	71,7	71,7
Akışkanlaştırıcı (ACE450)	25	25	25	25	25
Tasarım Özellikleri					
Mikro çelik lif hacmi (%)	0	2	3	4	5
Agrega hacmi (%)*	32				
Hamur hacmi (%)	68				
Su /Çimento	0,16				
Su / Çimento**	0,17				
Su/Bağlayıcı	0,20				
Su/Bağlayıcı**	0,21				

*Lifler agrega hacmine dahil edilmiştir. ** Katkıdan gelen su ile.

2.3 Kullanılan Cihazlar ve Yöntem

2.3.1 Karıştırma Prosedürü ve İşlenebilirlik

Karışımların hazırlanmasında yüksek devirde dönebilen, güçlendirilmiş bir Hobart mikser kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan hobart mikserin fotoğrafı Şekil 2.4’de sunulmuştur. Bağlayıcı maddeler, karışım suyunun 3/4’ü ve akışkanlaştırıcının 1/4’ü karışımıyla ıslatılmıştır. Tüm taneler ıslandıktan sonra kalan katkı ve su karışıma eklenerek hızlı karıştırma uygulanmıştır. Karıştırma, 3 dakika yavaş kuru karışım, 2 dakika yavaş ıslak karışım ve 5 dakika katkının da ilave edilmesinin ardından hızlı karışım olacak şekilde toplamda 10 dakikada tamamlanmıştır. Karıştırmanın ardından

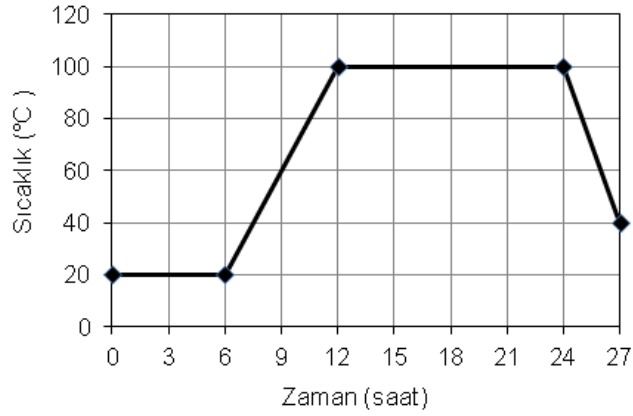
10 cm alt çaplı mini çökme hunisi kullanılarak ASTM C1437 standardına uygun olarak yayılma çapları belirlenmiştir.



Şekil 2.4 Hobart Mikseri (Kişisel arşiv, 2018)

2.3.2 Kür Yöntemi ve Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Çalışmada 28 gün standart su kürü ve buhar kürü yöntemleri uygulanmıştır. Uygulanan buhar kürü rejimi Şekil 2.5’de şematize edilmiştir. Numuneler döküm sonrası kalıbıyla birlikte buhar kürü kabinine konulmuştur. Buhar kürü kabininde 6 saat $20\pm2^{\circ}\text{C}$ neme doygün ortamda bekleme sonrası cihaz otomatik olarak ısıtma sürecini başlatmıştır. 6 saat ısınma ile 100°C ’ye çıkılmış, 12 saat bu sıcaklıkta kürden sonra ısıtma durdurulmuş ve kapaklar otomatik olarak az miktarda aralanarak tedrici soğuma safhası başlamıştır. Buhar kürünün 100°C ’de 12 saat uygulanması ile gerçek üretimde kullanılabilecek, makul bir kür yöntemi oluşturulması amaçlanmıştır.



Şekil 2.5 Buhar kürü rejimi

Mikro lif araştırmalarında eğilme dayanımlarının belirlenmesinde en az 5 adet $40 \times 40 \times 160$ mm numune kullanılmıştır. Kapalı devre elektromekanik eğilme test cihazında gerçekleştirilen deneylerde yükleme hızı 0,5 mm/dakika orta nokta sehimidir. Üç noktalı eğilme deneyinde kullanılan mesnet açıklığı 130 mm'dir. Orta nokta sehimleri, yükleme yüzüne paralel alt yüzey ortasına yakın konuşturılan bir kodlayıcı ile alınmıştır (Şekil 2.6). $40 \times 40 \times 160$ mm numunelerde lifsiz karışımlar kırılana kadar, lifli karışımlar ise 6 mm orta nokta sehimine ulaşana kadar deney sürdürülmüştür. Eğilme deneyi sonucu tokluklar, yük - sehim eğrisi alt alanı kullanılarak hesaplanmıştır. Eğilme sonrası çıkan parçalara 240 kgf/saniye yükleme hızında basınç deneyi uygulanmıştır.

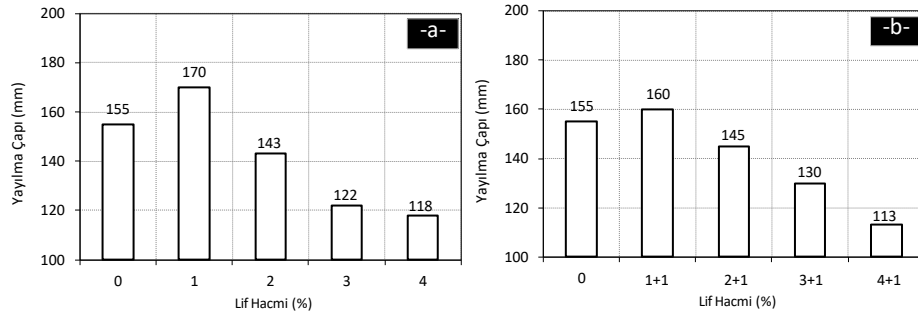


Şekil 2.6 Üç noktalı eğilme deney düzeneği (Kişisel arşiv, 2018)

2.4 Deney Verilerinin Değerlendirilmesi

2.4.1 Lif Hacminin İşlenebilirliğe Etkisi

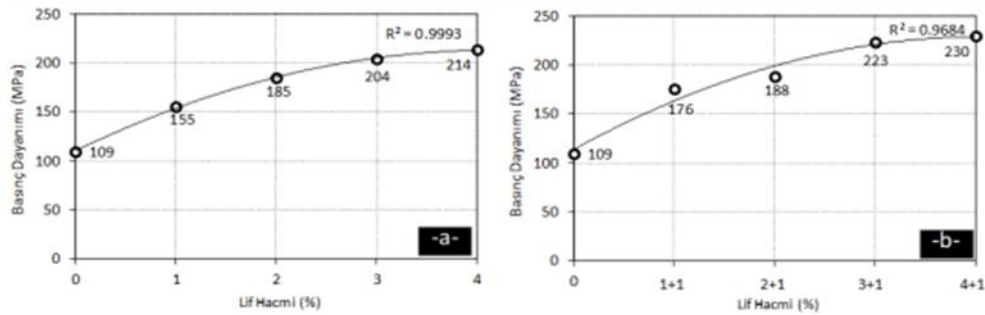
13 mm uzunluklu mikro lif hacminin (Şekil 2.7-a) ve 13 mm + 6 mm hibrit lif kullanımının (Şekil 2.7-b) taze UYPB'nin işlenebilirliğine etkisi Şekil 2.7'de verilen yayılma çapları ile sunulmaktadır. 100 mm alt çaplı mini yayılma konisi kullanılarak 25 düşürme sonrası elde edilen lifsiz karışım yayılma çapı 155 mm'dir. 13 mm uzunluklu mikro liflerin %1 hacminde kullanımı ile yayılma çapı artmaktadır. Karıştırma sırasında lif kullanımının Hobart mikser paleti ile karışım arasında etkileşimi arttırması, karışıma uygulanan kesme kuvvetlerini arttırmaktadır. %2, %3 ve %4 lif dozajlarında ise matris ve lifler arasındaki kilitlenme davranışı işlenebilirliği düşürmektedir (Şekil 2.7-a). Hibrit lif kullanımında da benzer durum görülmektedir (Şekil 2.7-b). Ancak kullanılan toplam lif hacminde ortalama narinliğin azalması işlenebilirliği iyileştirmektedir. Lifler uzadıkça akış halindeki kilitlenme artmaktadır. Yapılan gözlemsel incelemelerde %4 ve üzeri lif hacminde yerleşebilirliğin azaldığı, perdahlama işleminin neredeyse imkansız hale geldiği görülmüştür. Tüm karışımlar üç kademedeki şişleme ve aynı esnada 10 saniyelik kısa süreli vibrasyon uygulamasıyla kalıba yerleştirilmiştir. %4 ve üzeri lif hacimlerinde kalıp yüzeylerinde gözenek oluşumunun belirgin hale geldiği saptanmıştır.



Şekil 2.7 13 mm uzunluklu lif (a) ve 13 mm + 6 mm uzunluklu hibrit lif (b) kullanımının işlenebilirliğe etkisi

2.4.2 Lif Hacminin Basınç Dayanımına Etkisi

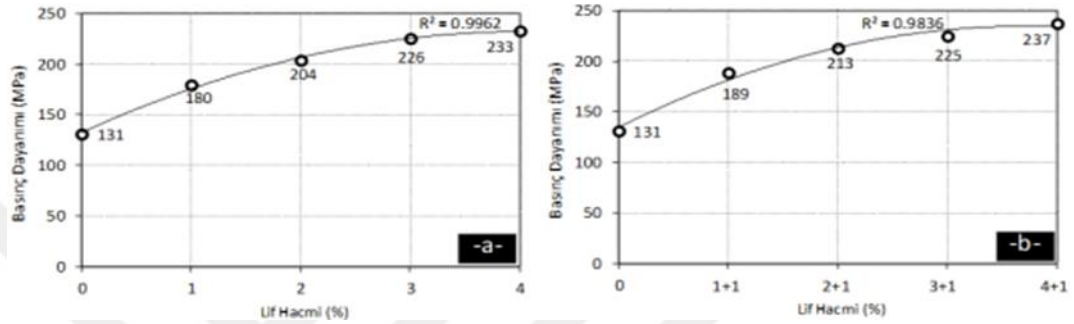
Şekil 2.8'te 13 mm'lik mikro lif ve 13 mm + 6 mm hibrit mikro lif dozajına bağlı olarak 28 gün su kürü sonrası elde edilen basınç dayanımları en az 6 numunenin ortalaması olarak sunulmaktadır. Hibrit mikro lif kullanılan karışım isimlerinde, örneğin %2+1 ifadesinde, 13 mm uzunluklu mikro lif dozajı %2, 6 mm uzunluklu mikro lif dozajı %1'dir. Su kürü altında yalın (lifsiz) matrisin basınç dayanımı 109 MPa'dır. 13 mm'lik lif hacminin %1, %2, %3 ve %4 değeri için ulaşılan basınç dayanımları sırasıyla 155, 185, 204 ve 214 MPa'dır. %3 lif hacmi ile 200 MPa dayanım mertebesine erişildiği görülmektedir (Şekil 2.8-a). 6 mm'lik mikro liflerin %1 oranında tüm 13 mm lif hacimlerine ilavesi sonucu oluşturulan karışımların basınç dayanımı %1+1, %2+1, %3+1 ve %4+1 için sırasıyla 175, 188, 223 ve 230 MPa'dır (Şekil 2.8-b). Lif hacminin artışı ile basınç dayanımı mertebeleri azalarak artmaktadır. UYPB karışımlarının tarifinde genellikle kullanılan 200 MPa basınç dayanımı mertebesine erişmek için su kürü altında en az %3 13 mm'lik lif dozajının gerekli olduğu anlaşılmaktadır. İlave olarak takviye edilen %1'er 6 mm uzunluklu mikro lif takviyesi, toplam lif hacmi dikkate alındığında basınç dayanımını olumsuz etkilemiştir. Örneğin %3 13 mm lif içeren karışımın basınç dayanımı 200 MPa iken, %2+1 karışımının basınç dayanımı 188 MPa'dır. Mikro lif narinliğindeki artışın, basınç dayanımı arttırdığı söylenebilir. Lif dozajındaki artışla işlenebilirlik düşüşü ve buna bağlı olarak sıkışık havanın artışı sebebiyle dayanım kazanımı azalan bir eğilim göstermiştir. Lif hacmi açısından bir doygunluktan söz edilebilir.



Şekil 2.8 13 mm'lik mikro lif dozajına (a) ve 13 mm + 6 mm hibrit mikro lif dozajına (b) bağlı olarak su kürü altında elde edilen basınç dayanımları

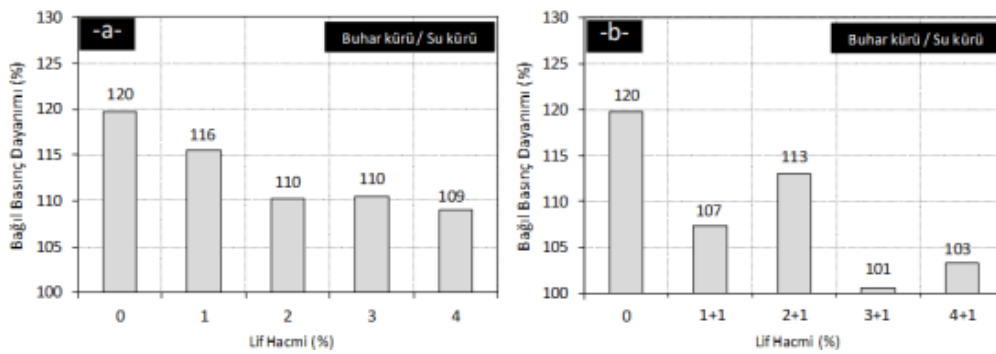
Şekil 2.9'te 13 mm'lik mikro lif ve 13 mm + 6 mm hibrit mikro lif dozajına bağlı buhar kürü sonrası elde edilen basınç dayanımları en az 6 numunenin ortalaması olarak

sunulmaktadır. Lifsiz yalın matrisin dayanımı buhar kürü altında 131 MPa elde edilmiştir. %1, %2, %3 ve %4 13 mm lif kullanımı sonucu sırasıyla 180, 204, 226 ve 233 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır. %1'er 6 mm'lik mikro lif ilavesi ile %1+1, %2+1, %3+1 ve %4+1 için basınç dayanımları sırasıyla 189, 213, 225 ve 237 MPa olarak elde edilmiştir. Su küründekine benzer şekilde %1'er hacimde 6 mm lif takviyesi sonucu yalnızca 13 mm uzunluğundaki aynı mikro lif hacmine kıyasla basınç dayanımları azalmaktadır.



Şekil 2.9 13 mm'lik mikro lif dozajına (a) ve 13 mm + 6 mm hibrit mikro lif dozajına (b) bağlı olarak buhar kürü altında elde edilen basınç dayanımları

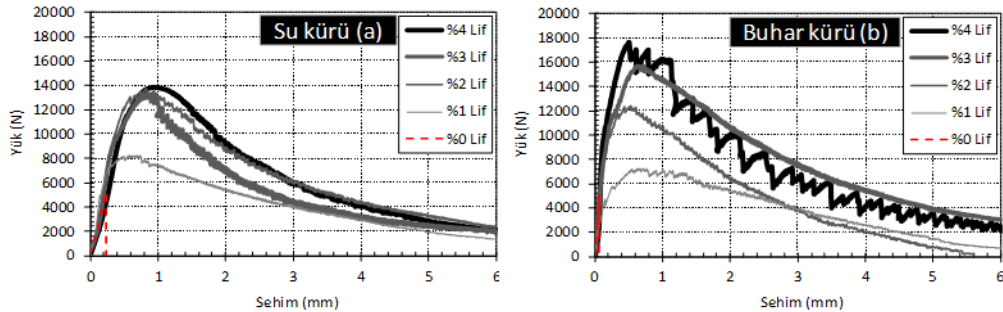
Şekil 2.10'da 13 mm'lik mikro lifler (Şekil 2.10-a) ve 13 mm + 6 mm hibrit mikro lif kullanımıyla (Şekil 2.10-b) elde edilen buhar kürü basınç dayanımları su kürüne kıyasla bağlı olarak verilmektedir. Buhar kürünün lifsiz yalın matrisin dayanımını %20 oranında arttırdığı, genel bir eğilim olarak da artan lif dozajıyla beraber buhar kürünün su kürüne kıyasla dayanım arttırıcı etkisinin azaldığı görülmektedir. Diğer bir ifadeyle basınç dayanımı noktasında lif hacmi, kür türünden daha baskın bir etkiye sahiptir. 200 MPa dayanımına erişilebilen toplam %3 lif hacmi için buhar kürünün katkısı uzun mikro lif kullanımında %10, hibrit kullanımda %13 olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.10 13 mm'lik mikro lif (a) ve 13 mm + 6 mm hibrit mikro lif (b) kullanımına bağlı olarak buhar kürü / su kürü bağlı dayanımları.

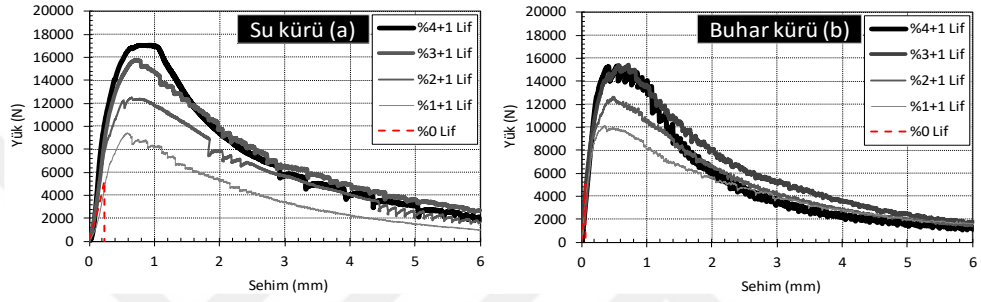
2.4.3 Lif Hacminin Eğilme Performansına Etkisi

Şekil 2.11'de 40×40×160 mm boyutlarında beş adet numunenin ortalaması değerlendirilerek 13 mm uzunluklu mikro lif hacminin su (Şekil 2.11-a) ve buhar kürleri (Şekil 2.11-b) altında eğilme yükü - sehim eğrilerine etkisi sunulmaktadır. Şekil 2.11-a incelendiğinde lifsiz karışımın (%0) pik yükünün lif kullanımıyla önemli oranda arttığı, gevrek davranışın kaybolduğu, 3 mm orta nokta sehiminde dahi lifsiz matrisin eğilme yükü taşıma kapasitesi kadar yükün taşınabildiği görülmektedir. Ayrıca tokluk ve süneklik mertebeleri önemli oranda artmaktadır. Deformasyon sertleşmesi davranışı belirgindir. Lifsiz yalın matrise %1 oranında lif katılması ile de elde edilebilen deformasyon sertleşmesi davranışı daha yüksek oranda lif kullanımı ile önemli mertebelere çıkmaktadır. %2 ve üzeri lif kullanımında su kürü altında benzer eğilme yükü - sehim eğrileri elde edilmiştir. Şekil 2.11-b'de buhar kürü sonrası elde edilen eğilme yükü - sehim grafikleri incelendiğinde lifsiz yalın matrisin ve lifli matrislerin rijitliğinin arttığı, diğer bir ifadeyle ilk yükleme noktalarında (<0,2 mm) daha az deplasman okunduğu dikkati çekmektedir. Ayrıca buhar kürü uygulaması sonucu lif hacminin artışı ile daha belirgin performans artışı elde edilebilmektedir. Bu etki %3 ve %4 lif dozajlarında söz konusudur. %2 hacmine kadar lif kullanımında su kürü, daha yüksek lif hacimlerinde ise buhar kürü sergilenen performansı arttırmaktadır. Bunun sebebi ideal su kürü koşullarına kıyasla ısı kürleri altında matriste gelişebilen mikro çatlaklı yapının %3 ve üzeri lif hacimlerinde performansı düşürmeyecek seviyeye inmesi olabilir. İki kür türü birlikte değerlendirildiğinde %3 lif hacmine kadar performansın önemli oranda arttığı, daha fazla lif kullanımı durumunda beklenen etkinin yakalanamadığı görülmektedir.



Şekil 2.11 13 mm'lik mikro lif hacmine bağlı olarak su kürü (a) ve buhar kürü (b) altında elde edilen eğilme yükü - sehim eğrileri

Şekil 2.12'de 40×40×160 mm boyutlarında beş adet numunenin ortalaması değerlendirilerek 13 mm + 6 mm uzunluklu mikro lif hacminin su (Şekil 2.12-a) ve buhar kürleri (Şekil 2.12-b) altında eğilme yükü - sehim eğrilerine etkisi sunulmaktadır. Şekil 12-a incelendiğinde %3+1 lif hacmine kadar pik yükün belirgin derecede arttığı, %4+1 lif dozajında ise belirgin bir performans artışı yakalanamadığı görülmektedir. Şekil 2.12-b'ten buhar kürü davranışı incelendiğinde %3+1 hacmine kadar performansın su kürü ile benzer olduğu, %4+1 karışımın ise ilave bir performans artışı yaratmadığı görülmektedir.

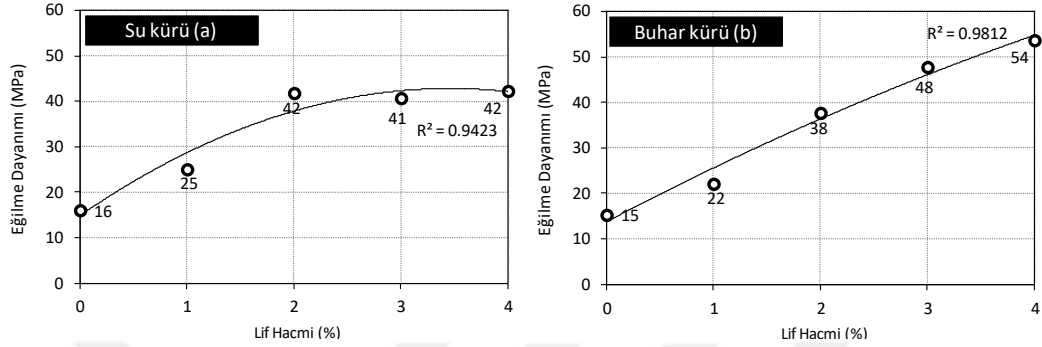


Şekil 2.12 13 mm + 6 mm mikro lif hacmine bağlı olarak su kürü (a) ve buhar kürü (b) altında elde edilen eğilme yükü - sehim eğrileri

Şekil 2.11 ve Şekil 2.12 kıyaslandığında toplam %3 lif hacmine kadar uzun mikro lif ve uzun+kısa mikro lifleri için yalnız uzun mikro lif kullanımı ile (13 mm) daha yüksek performans sergilendiği görülmektedir. Kullanılan iki tür mikro lif de benzer maliyete sahiptir. Ekonomik olarak değerlendirme yapıldığında da %3 toplam lif hacmine kadar 13 mm'lik lifin tek başına kullanımı ile daha yüksek verim elde edilmektedir.

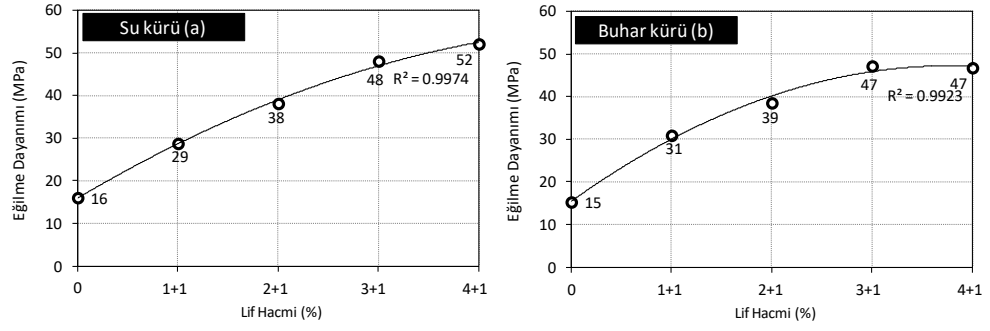
Şekil 2.13'de 13 mm uzunluklu lif hacmine bağlı olarak su ve buhar kürleri altında elde edilen eğilme dayanımları verilmektedir. Dayanımlar, Şekil 2.11'de sunulan ortalama eğilme yükü - sehim eğrilerinin pik yükleri kullanılarak hesaplanmıştır. Su kürü ile %0 (lifsiz), %1, %2, %3 ve %4 lif hacimleri ile sırasıyla 16, 25, 42, 41 ve 42 MPa eğilme dayanımı elde edilmiştir. Su kürü ile eğilme dayanımı noktasında %2'nin üzeri lif hacimlerinde dayanım artışı sağlanamamıştır (Şekil 2.13-a). Yalın matrisin eğilme dayanımı 16 MPa iken lif kullanımı sonucu matrisin ilk çatlak dayanımı 18 ila 22 MPa seviyesine yükselmiştir. Lif hacmi arttıkça ilk çatlak dayanımı artmaktadır. Buhar kürü altında ise %3 ve üzeri lif hacimlerinde eğilme performansı su kürüne

kıyasla yükselmektedir. Buhar kürü ile %0 (lifsiz), %1, %2, %3 ve %4 lif hacimleri ile sırasıyla 15, 22, 38, 48 ve 54 MPa eğilme dayanımı elde edilmiştir (Şekil 2.13-b). Buhar kürü sonucu yalın matrisin eğilme dayanımı 15 MPa iken lif dozajının artışıyla artan ve 20 - 23 MPa aralığında ilk çatlak dayanımları elde edilmiştir.



Şekil 2.13 13 mm'lik mikro lif hacmine bağlı olarak su kürü (a) ve buhar kürü (b) altında elde edilen eğilme dayanımları

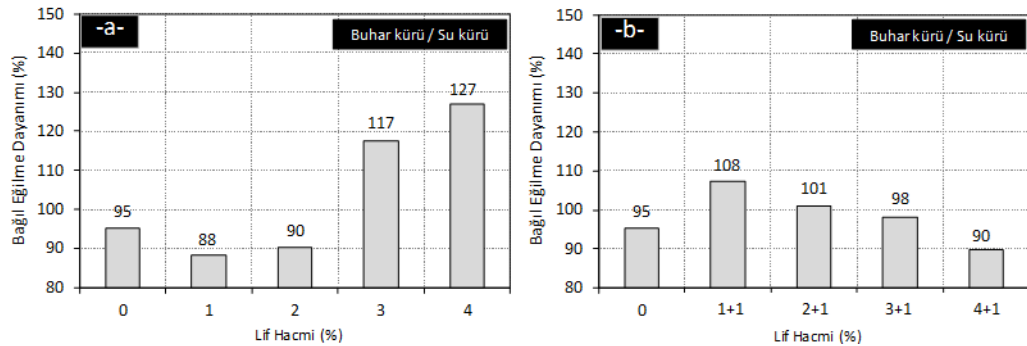
Şekil 2.14'de 13 mm + 6 mm hibrit lif hacmine bağlı olarak su ve buhar kürleri altında elde edilen eğilme dayanımları verilmektedir. Dayanımlar, Şekil 2.12'de sunulan ortalama eğilme yükü - sehim eğrilerinin pik yükleri kullanılarak bulunmuştur. Su kürü ile %0 (lifsiz), %1+1, %2+1, %3+1 ve %4+1 lif hacimleri ile sırasıyla 16, 29, 38, 48 ve 52 MPa eğilme dayanımına ulaşılmıştır (Şekil 2.14-a). Su kürü uygulaması sonucu yalın matris 16 MPa eğilme dayanımına sahipken lifli karışımların ilk çatlak dayanımları 16 - 24 MPa mertebesinde elde edilmiştir. Hibrit lif hacmi arttıkça eğilme dayanımı azalarak artmaktadır. Şekil 2.14-b'de sunulan buhar kürü verileri incelendiğinde buhar kürünün dayanımlar üzerinde önemli bir değişiklik yaratmadığı, %4+1 karışımında %10 dolayında düşüş yarattığı görülmektedir. Buhar kürü uygulaması sonucu yalın matris 15 MPa eğilme dayanımına sahipken lifli karışımların ilk çatlak dayanımları 18 - 23 MPa mertebesinde elde edilmiştir.



Şekil 2.14 13 mm + 6 mm hibrit lif hacmine bağlı olarak su kürü (a) ve buhar kürü (b) altında elde edilen eğilme dayanımları

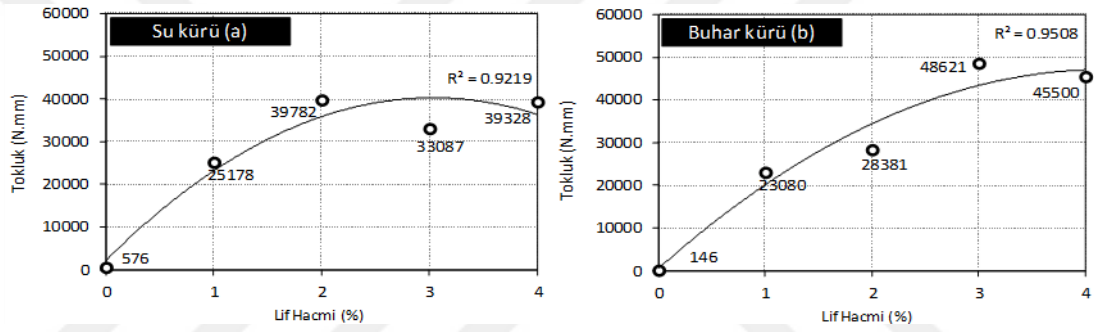
Şekil 2.13 ve Şekil 2.14 kıyaslandığında su kürü altında %3 toplam lif hacmine kadar uzun lifin tek başına kullanımının daha yüksek eğilme dayanımı sergilediği görülmektedir. Buhar kürü altında ise tüm lif hacimlerinde uzun mikro liflerin tek başına kullanımı avantaj sergilemektedir. Basınç dayanımı yorumlarında da belirtildiği üzere maliyeti benzer olan ve aynı kompozisyonda sadece boyları farklı olarak üretilen iki mikro liften yüksek narınlığı olanın mekanik özellikleri geliştirme yetisi daha yüksektir.

Şekil 2.15'de 13 mm'lik mikro lif (Şekil 2.15-a) ve hibrit lif kullanımı (Şekil 2.15-b) durumunda su kürüne kıyasla buhar kürü bağıl dayanımları sunulmaktadır. Hibrit lif kullanımında buhar kürünün dayanımlar üzerinde düzenli ve belirgin bir etkisi bulunmazken, tekil lif kullanımında buhar kürü ile %3 ve %4 lif hacminde performans belirgin derecede (sırasıyla %17 ve %27) arttırılabilmektedir. Su kürüne kıyasla daha düşük lif dozajlarında buhar kürü olumsuz etki yaratmaktadır.



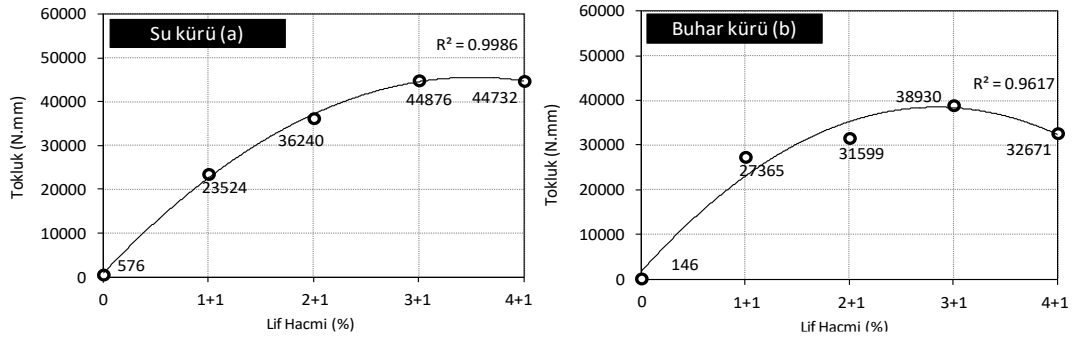
Şekil 2.15 13 mm (a) ve 13 mm + 6 mm hibrit lif (b) hacmine bağlı olarak su kürüne kıyasla buhar kürü eğilme dayanımları

Şekil 2.16'de Şekil 2.11'de sunulan, 13 mm'lik lif hacmine bağlı olarak elde edilen, ortalama yük-sehim eğrilerinin (6 mm sehime kadar) altında kalan alan hesaplanarak bulunmuş tokluk değerleri kür türüne bağlı olarak sunulmaktadır. Lifsiz yalın matrisin eğilme tokluğu su ve buhar kürü için sırasıyla 146 ve 576 N.mm mertebesinde iken lif kullanımı sonucu su küründe 70, buhar küründe 333 katına kadar yükselmektedir. %3 ve üzeri lif dozajlarında buhar kürü tokluk mertebesinde su kürüne kıyasla yükseltmektedir. Bu durumun temel sebebi Şekil 13'de verilen eğilme dayanımlarının (yani pik yüklerin) %3 ve %4 lif hacmi için yükselmesidir. Tüm kür türleri beraber değerlendirildiğinde eğilme tokluğunun %3 lif hacmine kadar arttırılabildiği genel bir eğilim göze çarpmaktadır. Bu sonuçlarda lifsiz matrisin tokluğunun su küründe (576 Nmm) buhar küründekine (146 Nmm) göre hayli yüksek olmasının etkisi de vardır.



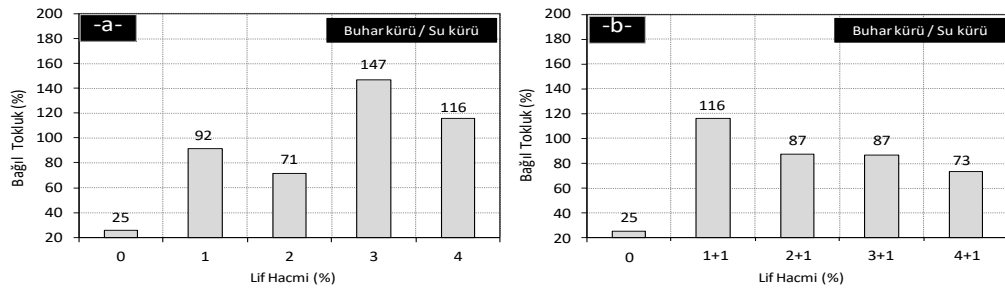
Şekil 2.16 13 mm'lik mikro lif hacmine bağlı olarak su kürü (a) ve buhar kürü (b) altında elde edilen eğilme toklukları

Şekil 2.17'te, hibrit mikro lif kullanımı için Şekil 2.12'de sunulan eğilme yük - sehim eğrisi altında kalan alanlar kullanılarak hesaplanmış eğilme toklukları verilmektedir. Lifsiz yalın matrisin su kürü altında 576 N.mm, buhar kürü altında 146 N.mm olan tokluk değeri, lif kullanımı ile su ve buhar kürü için sırasıyla 78 ve 267 katına kadar yükselmektedir. Genel bir eğilim olarak eğilme tokluğunun %3+1 lif oranının üzerindeki hacimde artmadığı görülmektedir. Su kürü (Şekil 2.17-a) ve buhar kürü (Şekil 2.17-b) kıyaslandığında su kürünün daha başarılı bir performans sergilediği söylenebilir. Bu sonuç eğilme dayanımlarıyla paralellik göstermektedir. Bu sonuçlarda lifsiz matrisin tokluğunun su küründe (576 N.mm) buhar küründekine (146 N.mm) göre hayli yüksek olmasının etkisi de vardır.



Şekil 2.17 13 mm + 6 mm hibrit lif hacmine bağlı olarak su kürü (a) ve buhar kürü (b) altında elde edilen eğilme toklukları

Şekil 2.16 ve Şekil 2.17 kıyaslanarak hibrit lif kullanımının etkisi incelendiğinde su kürü altında %4 ve üzeri toplam lif hacminde hibrit lif kullanımı, sadece 13 mm lif kullanımına göre tokluğu arttırmaktadır. Buhar kürü altında uzun mikro lifler başarılıdır. Şekil 2.18'de ise su kürüne kıyasla buhar kürü toklukları bağlı olarak sunulmaktadır. Buhar kürünün lif hacmine bağlı tokluk üzerinde belirgin bir eğilim yaratma etkisi bulunmamaktadır. Uzun mikro lif kullanımında %3 ve üzeri dozajlarda, hibrit kullanımda ise %1+1 karışımında tokluk artışı kaydedilmiştir. Genel değerlendirme olarak su kürü altında elde edilen tokluk mertebeleri daha yüksektir.



Şekil 2.18 13 mm (a) ve 13 mm + 6 mm hibrit lif (b) hacmine bağlı olarak su kürüne kıyasla buhar kürü toklukları

2.4.4 Malzeme Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar

UYPB'de 13 mm uzunluklu ve 13 mm + 6 mm uzunluklu hibrit lif kullanımının işlenebilirliğe, su ve buhar kürü altında mekanik özelliklere etkisinin araştırıldığı bu çalışmada aşağıdaki temel sonuçlara ulaşılmıştır:

- Lif hacminin %2'nin üzerine çıkması durumunda işlenebilirlik önemli oranda azalmaktadır. Narinlik arttıkça liflerin işlenebilirlik azaltıcı etkisi belirginleşmektedir.

%3'den yüksek lif dozajlarında kalıp yüzeyinde gözeneklilik artmakta, perdahlanabilirlik güçleşmektedir.

- Söz konusu karışımlar ile standart su kürü ve kısa süreli (12 saat) buhar kürü altında 200 MPa'dan yüksek basınç dayanımlarına ulaşmak mümkündür. 200 MPa basınç dayanımına erişebilmek için %3 ve üzeri lif kullanımı gerekmektedir. Lif narinliği arttıkça basınç dayanımı artmaktadır. Basınç dayanımları buhar kürü ile geliştirilebilirken, lif hacmi kür türünden daha baskın bir etkiye sahiptir.

- Lifsiz karışımın gevrek karakteri lif kullanımı ile tamamen değişmiş ve tüm lif dozajlarında belirgin deformasyon sertleşmesi davranışı elde edilmiştir. 15 - 16 MPa mertebesindeki lifsiz yalın matris eğilme dayanımı %3 ve üzeri lif dozajlarında tüm kür türleri için 40 MPa'yı aşmaktadır. Deformasyon sertleşmesi davranışı açısından narinliği yüksek 13 mm uzunluklu lif kullanımı hibrit kullanımdan daha verimlidir. Standart su kürü uygulaması ile de hedeflenen 200 MPa ve üzeri basınç, 40 MPa ve üzeri eğilme dayanımlarına ulaşılabilir.

- Lif kullanımı ile yalın matrisin tokluğu 70 ila 300 kat arttırılabilmektedir. Su ve buhar kürleri beraber değerlendirildiğinde özellikle %3 lif hacmine kadar tokluk belirgin derecede artmaktadır. Buhar kürünün özellikle %3 ve %4 lif oranı ve 13 mm uzunluklu mikro lif kullanımı durumunda tokluğu geliştirdiği görülmektedir.

- Kısa (6mm) ve uzun (13 mm) lifin hibrit kullanımı maliyet düşünüldüğünde sadece 13 mm lif kullanımına göre daha düşük bir performans sergilemektedir. Standart su kürü ile 200 MPa basınç dayanımı ve 40 MPa eğilme dayanımı hedeflerinin yakalanabildiği, perdahlanabilirliğin mümkün olduğu, mekanik özelliklerin önemli derecede geliştirilebildiği %3 hacminde 13 mm lif kullanımı çalışmanın devamı için seçilmiştir.

2.5 Lamine Üretimi

Malzeme deneylerinden elde edilen bu sonuçlar kapsamında gerçek boyutlu lamine üretimine geçilmiştir. Gerçek boyutlu lamine üretimi tamamlandıktan sonra gerçek boyutlu laminelerin performansları değerlendirilecek, laminelerin eğilme dayanımı yetersiz kırılganların davranışlarını iyileştirmede kullanılabilirliği test edilecektir.

2.5.1 Beton mikseri

Eğilme yetersizliğine sahip betonarme kirişlere uygulanmak üzere çeşitli kalınlıklarda UYPB lamineler üretildi. Lamine üretimi için en önemli aşama yoğun lif oranına sahip yüksek dayanımlı betonu karıştırabilmektir. Çok düşük su/çimento oranlı kompozitleri karıştırmada, özellikle de yüksek döküm miktarlarında, geleneksel beton mikserleri işlev görememektedir. Yeterli kesme kuvvetini ve hızı uygulayabilen bir mikser gerekmektedir. Bu gereksinimleri sağlamak üzere laboratuvarında mevcut olan eski bir pan mikser modifiye edilmiştir. Pan mikserde, hazne kendi ekseninde dönmekteyken karışmayı sağlayan düşeydeki bıçaklar sabit durmaktadır. Beton mikserine titreşimsiz, uygun devirli yeni bir motor takılmıştır. Karıştırıcı bıçakların yoğun kıvamlı karışıma uygun olması için yeri ve açısı güncellenmiştir. Daha sonra sistem hız kontrollü hale getirilmiştir. Pan mikserin modifiyesi sonucu elde edilen UYPB mikseri Şekil 2.19’de görülmektedir.



Şekil 2.19 UYPB mikseri (Kişisel arşiv, 2018)

2.5.2 Gerçek Ölçekli Lamine Kalıpları

Mikser üretiminden sonra gerçek ölçekli lamine üretimi için çelik kalıplar hazırlanmıştır. Laminelerin boyu uzun olduğu için beton dökümü nedeniyle zaman içinde kalıplarda deformasyon meydana gelebilir. Bu nedenle kalıpların altında çelik U profiller kullanılmıştır. Eğilme dayanımını artırmaya yönelik üretilecek lamineler için 1 adet kalıp üretilmiştir (Şekil 2.20).



Şekil 2.20 Lamine kalıpları(Kişisel arşiv, 2018)

Kalıbın yan yüzleri ise farklı yükseklikte beton dökümüne izin verecek şekilde değiştirilebilir şekilde dizayn edilmiştir. Böylece aynı kalıptan 3 farklı yükseklikte lamine üretmek mümkün olacaktır (Şekil 2.21).



Şekil 2.21 Lamine kalıpları için yan yüzler(Kişisel arşiv, 2018)

2.5.3 UYPB'nin Hazırlanması ve Kalıba Yerleştirilmesi

Lamine elemanların üretiminde mekanik özelliklerin ve işlenebilirliğin araştırıldığı karışım kullanılmıştır. Söz konusu karışım ile 28 gün standart su kürü sonrası 200 MPa basınç, 40 MPa eğilme dayanımı değerleri yakalanabilmiştir. Bu karışımın büyük hacimlerde dökümü sırasında mikserin yetersiz kalması durumunda modifiye edilmesi gerekebilirdi. Ancak mikserin geliştirilmesi aşamasında ve karışımın işlenebilirliği üzerine yürütülen titiz çalışmalar sayesinde küçük miktarlarda dökümde yakalanan

karışım kıvamı büyük hacimli üretimlerde de (20 ila 30 litre) elde edilebilmiştir. Lamine üretiminde kullanılan UYPB'nin malzeme özellikleri ve UYPB karışım oranları Tablo 2.9'de sunulmaktadır.

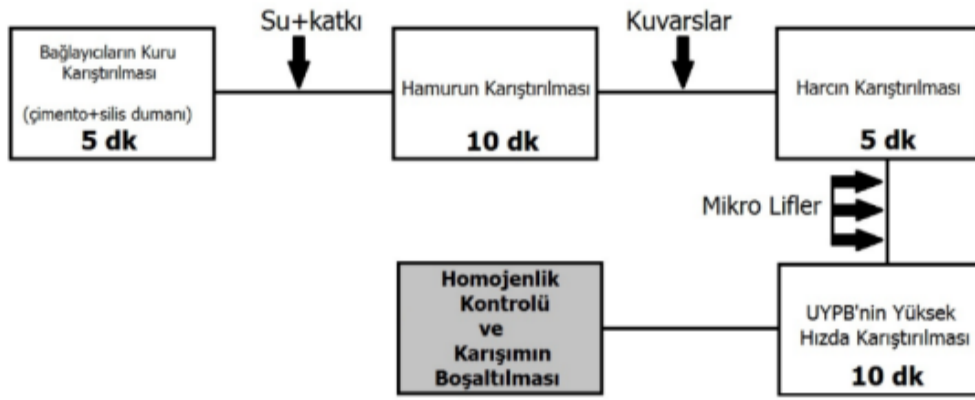
Tablo 2.9 UYPB karışım oranları

Bileşen	(kg/m ³)
Su	200
Çimento	1000
Silis dumanı	250
0,5 – 1 mm kuvars	531
0 – 0,4 mm kuvars	227
Mikro çelik lif (13 mm)	215,1
Akışkanlaştırıcı (ACE450)	25
Tasarım Özellikleri	
Mikro çelik lif hacmi (%)	3
Agrega hacmi (%)*	32
Hamur hacmi (%)	68
Su /Çimento	0,20
Su / Çimento**	0,21
Su/Bağlayıcı	0,16
Su/Bağlayıcı**	0,17

*Lifler agrega hacmine dahil edilmiştir.

** Katkıdan gelen su ile.

Malzemelerin karıştırma prosedürü Şekil 2.22'da şematize edilmiştir. Lamine üretimine Şekil 2.23'de görüldüğü gibi dökümde kullanılacak malzemeler hassas bir biçimde tartılarak başlanmıştır. Öncelikle bağlayıcı maddeler (çimento ve silis dumanı) 5 dakika boyunca düşük devirde karıştırılmıştır (Şekil 2.24). Ardından karışım suyu ve akışkanlaştırıcıdan oluşan çözelti dönen miksere eklenmiştir (Şekil 2.25). 10 dakika içinde akıcı hamur oluşturulmuş, kuvars agregaları bu akıcı hamura eklenmiştir. Çelik lifler 13 mm uzunluğa ve çok ince bir çapa sahip olduklarından stokta topaklanmış durumdadır. El yordamı ile çelik liflerin ayrıştırılıp, serpiştirilerek harca eklenmesi ve oluşan UYPB karışımının nihai homojenliğe ulaşması için 10 dakika daha karıştırma sürdürülmüştür (Şekil 2.26). Karışıma su katılmasından toplam 25 dakika sonra taze UYPB elde edilmiştir (Şekil 2.27).



Şekil 2.22 UYPB karıştırma prosedürü



Şekil 2.23 UYPB Lamine üretimde kullanılan malzemeler (Kişisel arşiv, 2018)



Şekil 2.24 Bağlayıcıların karıştırılması (Kişisel arşiv, 2018)



Şekil 2.25 Bağlayıcılara su+akışkanlaştırıcı çözeltisinin ilavesi (Kişisel arşiv, 2018)



Şekil 2.26 Çelik mikro liflerin serpiştirilerek karışıma eklenmesi (Kişisel arşiv, 2018)



Şekil 2.27 Karışım süreci tamamlanmış taze UYPB (Kişisel arşiv, 2018)

Yüksek oranda toz malzeme içeriği, mikro lif kullanımı ve ince agregadan teşkil edilen agrega fazı sayesinde homojen olarak üretilen UYPB, yüksek orandaki lif

hacmine rağmen (% 3) yeterli işlenebilirliği sergilemektedir (Şekil 2.28). Lamine elemanların en derin olanı 70 mm derinliğe sahip olduğundan ve karışımda elde edilen yeterli işlenebilirlik sayesinde kalıp tek kademedede doldurulmuştur. Ardından kalıp dış yüzeyinden şişe vibratör kullanımı, yüzeyden ise şişleme vasıtasıyla yerleştirme gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.29). Yerleştirme işlemi bu tür yüksek lif oranlı kompozit malzemelere kıyasla rahat ve hızlı olmuştur. Malzemenin sadece perdahlama ile kalıbı doldurma yeteneğine sahip olduğu söylenebilir. Ancak sıkışık hava boşluklarının giderilmesi için vibrasyon uygulanmıştır. Son olarak yüzey perdahlanmış karışımın üzerine vakit kaybetmeksizin naylon örtü serilmiştir. Böylelikle taze UYPB'nin kuruma ortamından olumsuz etkilenmemesi sağlanmıştır.



Şekil 2.28 Taze UYPB'nin kalıba dökülmesi (Kişisel arşiv, 2018)



Şekil 2.29 Taze UYPB'nin şiş ve vibrasyon ile yerleştirilmesi (Kişisel arşiv, 2018)

UYPB'nin kalıptan sökölmesi için naylon örtölü numuneler laboratuvar ortamında 2 gün bekletilmiştir. Böylelikle ince elemanların (30 mm) sökümünde oluşabilecek sorunların önüne geçilmiştir. Kalıbından sökülön numuneler ıslak şilteler ve üzerine naylon örtü ile sarılmıştır. Laboratuvar sıcaklığında (21 ± 3 °C) neme doygün ortamda 28 gün kür edilen numuneler iki gün laboratuvar ortamında kurumaya alındıktan sonra betonarme kirişlere tatbik edilmiştir. Şekil 2.30'dan görölüneceğı üzere kalıp yüzeyleri boşluksuz ve pürüzsüz şekilde elde edilmiştir.



Şekil 2.30 Laminelerin ıslak örtü ve naylon örtölerek kür edilmesi (Kişisel arşiv, 2018)

2.5.4 İçerisinde Boyuna Donatı Bulunan UYPB Üretilmesi

UYPB laminelerin erken yük seviyelerinde kırılmasıyla UYPB laminelerden beklenen eğilme artırma performansı elde edilememiştir. Bu nedenle UYPB laminelerin içerisine boyuna donatı yerleştirme planı uygulanmıştır. Buradaki amaç boyuna donatı eklenmesiyle UYPB'nin erken yük seviyesinde lokalize olan çatlak nedeniyle kırılmasını engellemektir. Böylece eğilme kapasitesinde daha belirgin artış sağlanabileceğı düşünölmüştür. UYPB lamine içerisine farklı pas payı oranları dikkate alınarak döküm ve deneyler gerçekleştirilmiştir. UYPB'nin sahip olduğı yüksek

aderans nedeniyle pas payı değişiminin önemli bir fark yaratmadığı görölmüş, d yüksekliğini daha efektif kullanacak, 10 mm'lik beton örtüsü dikkate alınarak boyuna donatılar yerleştirilmiştir. Boyuna donatı olarak eğilme donatısı olarak kullanılmayacak Ø8 çapına 460 MPa akma, 570 Mpa çekme ve 205 GPa elastisite modülüne sahip 3 adet donatı UYPB lamine içerisine yerleştirilmiştir(Şekil 2.31).



Şekil 2.31 İçerisinde Boyuna Donatı Bulunan UYPB Üretilmesi (Kişisel arşiv, 2018)

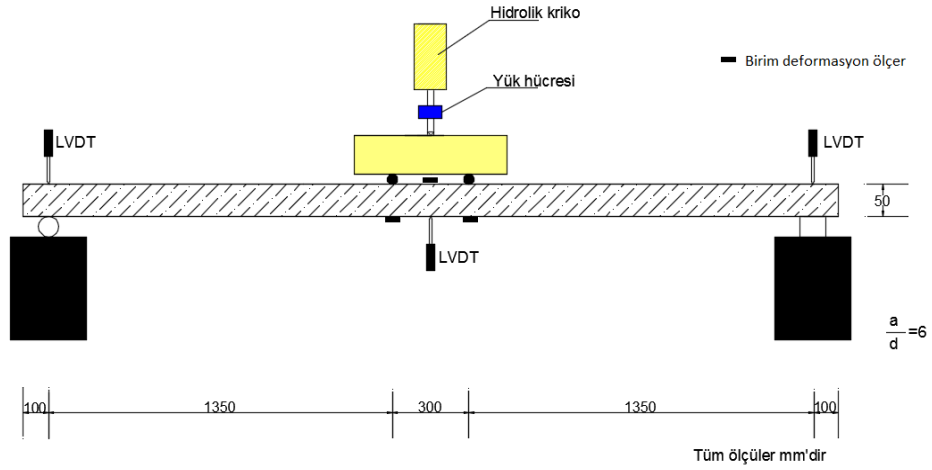
2.6 Gerçek ölçekli lamine deneyleri

Üretimi ve kür süresi tamamlanan gerçek ölçekli laminelerin testleri gerçekleştirilmiştir. 30 mm, 50 mm ve 70 mm kalınlığa, 150 mm genişlik ve 3000 mm uzunluğa sahip lamineler yükleme çerçevesinde 4 noktadan eğilme altında test edilmiştir. Bu deneylerle elemanların tek başlarına eğilme kapasitelerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu elemanların betonarme kirişlere farklı bağ şekilleriyle bağlanmasıyla elde edilecek katkı elbette farklı olacaktır. Ancak bu uygulama gerçek boyutlu laminelerde kalınlık değişimine bağlı olarak nasıl bir performans farklılığı gözlemlenebileceği hakkında ön bilgi vermesi açısından faydalı olabilir.

2.6.1 Deney düzeneği

Gerçek ölçekli lamine deneylerinde, kiriş deneylerinde kullanılacak deney düzeneği ile özdeş deney düzeneği kullanılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında değerlendirilecek deney elemanları iki tekil yük altında test edilmiştir. Deney ve ölçüm düzeni Şekil 2.32’de verilmiştir. Yükleme 300 kN basınç, 300 kN çekme kapasiteli bir hidrolik kriko yardımıyla yapılacak ve yük 300 kN basınç, 300 kN çekme kapasiteli bir yük hücresi ile ölçülecektir. Yükleme, hız kontrollü elektrikli bir pompa yardımıyla laminelere etkitilecektir. Lamine ölçümleri için 3 adet LVDT kullanılacaktır. Sabit ve hareketli mesnete sahip deney elemanında orta noktadan maksimum deplasman, mesnetlerde mesnet hareketleri ölçümleri alınacaktır.

Lamine ortasının alt ve üst yüzüne birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiştir. Ayrıca 2 tekil yükün etkidiği noktanın lamine alt yüzeyine birer adet daha birim deformasyon ölçer yerleştirilmiştir. Maksimum momentin olduğu bu bölgede kırılmanın yoğunlaşacağı düşünüldüğü için birim deformasyon ölçerler bu aralıkta kullanılmıştır. Böylece laminelerde meydana gelen birim deformasyon değişimleri de ölçülmüştür. Lamine ölçümleri için kullanılmış deney düzeneği Şekil 2.32’de sunulmuştur.



Şekil 2.32 Deney düzeneği (Kişisel arşiv, 2018)

2.6.2 30 mm Kalınlığa Sahip Lamine Deneyi

30 mm kalınlığa sahip laminenin betonarme kirişe uygulanmadan önce davranışını değerlendirmek için test edilmiştir. 28 günlük kür süresini tamamlayan 30 mm kalınlığa sahip lamine, 2 gün boyunca kuruması için laboratuvar koşullarında saklanmıştır. Lamine alt yüzeyinde ve yan yüzeyinde gelişecek çatlakları daha iyi değerlendirmek amacıyla bu yüzeyler kireç ile boyanmıştır. İlgili eleman özenle yükleme çerçevesine yerleştirildikten sonra üzerine birim deformasyon ölçerler yerleştirilmiş ve deneye hazır hale getirilmiştir. Tüm deney elemanlarına saniyede 0,04 kN hızında yükleme yapılmıştır. 30 mm kalınlığa sahip laminenin test öncesi durumu Şekil 2.33’de sunulmuştur.



Şekil 2.33 30 mm kalınlığında lamine deneyi (Kişisel arşiv, 2018)

Deney elemanı artan yükler altında test edilmiştir. 28,83 kg yük seviyesine kadar yük ve deplasman arasında lineer bir etkileşim gözlenmiştir. 55,14 kg yük seviyesine sabit bir deplasman ile ulaşılmıştır. Daha sonra yükteki artış oranı azalmış ancak deplasmanda daha hızlı bir artış gözlenmiştir (Şekil 2.34).



Şekil 2.34 Deney elemanının 30 mm deplasman hali (Kişisel arşiv, 2018)

Deney elemanına etkitilen yük 84,41 kg seviyesine ulaştıktan sonra yükte küçük değişimler gözlenmiş ancak deplasmanda sürekli bir artış gözlenmiştir. Yük-deplasman eğrisinden anlaşılabileceği üzere lamine sünek bir davranış göstermiştir (Şekil 2.37). Deplasman 91 mm seviyesine ulaşıncaya kadar laminede herhangi bir çatlak gözlenmemiştir. 91 mm deplasman seviyesine ulaşmış deney elemanının görünümü Şekil 2.35’de sunulmuştur.



Şekil 2.35 Deney elemanının 91 mm deplasman yapmış görünümü(Kişisel arşiv, 2018)

Deney elemanı 91 mm deplasman seviyesini aştıktan sonra kiriş orta bölgesinde ani olarak bir çatlak gelişmeye başlamıştır. Çatlak gelişmeye başlar başlamaz lokalize

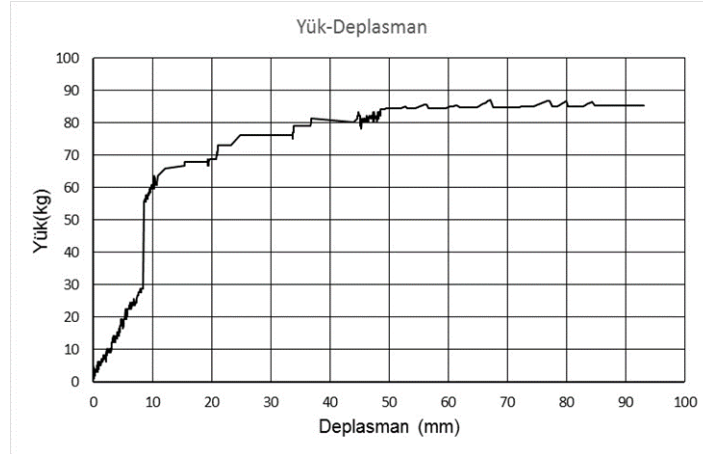
olmuş ve genişliği ani olarak 0,3 mm seviyesine ulaşmıştır. Maksimum moment bölgesinde laminede oluşan çatlakların deney anında çekilmiş fotoğrafı Şekil 2.36’te sunulmuştur. Bu noktadan sonra ince laminede kırılma anında ne tür bir davranış oluşacağı bilinmediği ve ölçüm aletlerine zarar vermemek için deney sonlandırılmıştır.



Şekil 2.36 Laminede çatlak oluşumu (Kişisel arşiv, 2018)

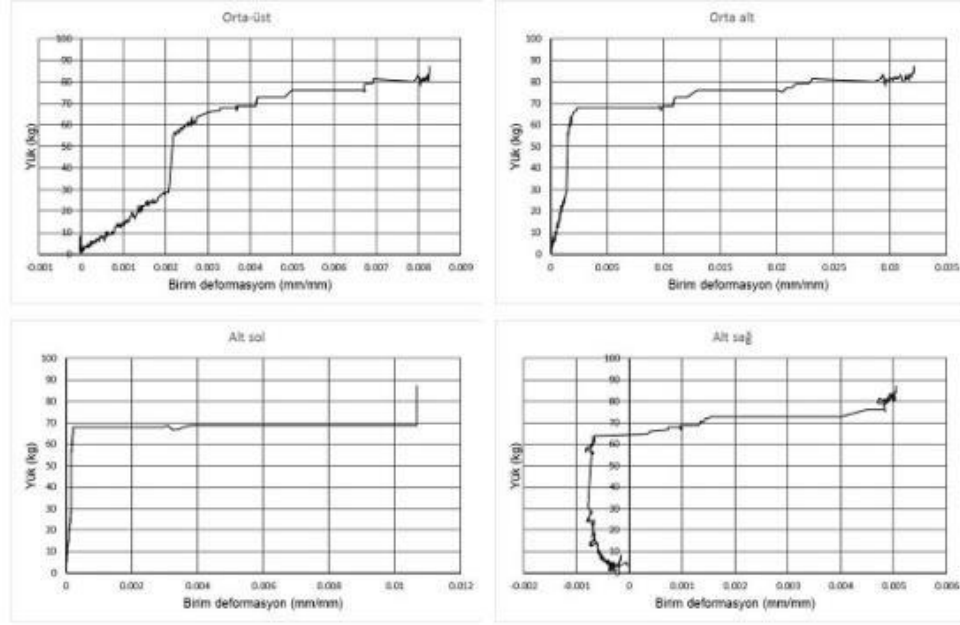
Laminede oluşan çatlakla rağmen yük kaldırıldıktan sonra deplasmanda yaklaşık %60 oranında bir geri dönüş meydana gelmiştir.

30 mm kalınlığa sahip lamine’nin yük deplasman eğrisi Şekil 2.37’de verilmiştir.



Şekil 2.37 Yük-deplasman eğrisi

Yük-deplasman ölçümleri dışında lamineden birim deformasyon ölçümleri de alınmıştır. Deney elemanının birim deformasyon eğrileri Şekil 2.38’de sunulmuştur.



Şekil 2.38 30 mm kalınlığında lamine için Yük-birim deformasyon eğrileri

Laminde en büyük birim deformasyon lamine ortasının alt yüzünde ölçülmüştür. Bu birim deformasyon ölçerde 0,032 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. 67 kg yük seviyesine kadar maksimum birim deformasyon değerinin %6'sı oranında, 0,002 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Bu yük seviyesinden sonra laminde herhangi bir çatlak gelişmemesine rağmen birim deformasyon hızla artış göstermiştir. Bunun sebebi sünek bir davranış gösteren laminenin eğriliğinin artması ve buna bağlı olarak maksimum moment bölgesine yerleştirilen birim deformasyon ölçerde hızla artan şekil değiştirmenin ölçülmesidir. Yük artmamasına rağmen eğriliğin artmasıyla birim deformasyon değerlerinde artış devam etmiştir.

Alt sağ birim deformasyon ölçerde başlangıç yüklerinde eksi yönde bir değişim gözlenmiştir. Beklenmeyen bu davranışın nedeni ölçüm aletinde bir problem olabilir. 63,82 kg yük seviyesinden sonra anlamlı sonuçlar elde edilse de başlangıçtaki problem nedeniyle bu ölçüm aletinin düzgün çalışıp çalışmadığı kanısı oluşmamıştır.

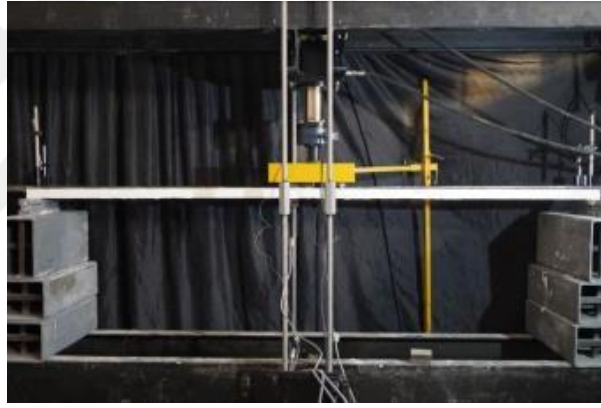
Lamine ortasının üst bölgesinde yer alan birim deformasyon ölçerde 28,83 kg yük seviyesine kadar lineer bir artış gözlenmiştir. Ani yük artışı birim deformasyon davranışını etkilememiştir. Daha sonra artan eğriliğe bağlı olarak birim deformasyon

artışı gözlenmiştir. Bu artışa rağmen birim deformasyon değeri lamine alt yüzündeki birim deformasyon değerinin ancak %25'i seviyesindedir (Şekil 2.38).

Lamine alt yüzeyinin sol tarafında bulunan birim deformasyon ölçerde 66,91 kg yük seviyesine kadar birim deformasyon artışı neredeyse hiç gözlemlenmemiştir. Bu yük seviyesinde birim deformasyon ani olarak 55 katına çıkmıştır. Daha sonra birim deformasyon ölçerde lineer bir yük artışı gerçekleşmiş ancak birim deformasyon artışı gözlenmemiştir.

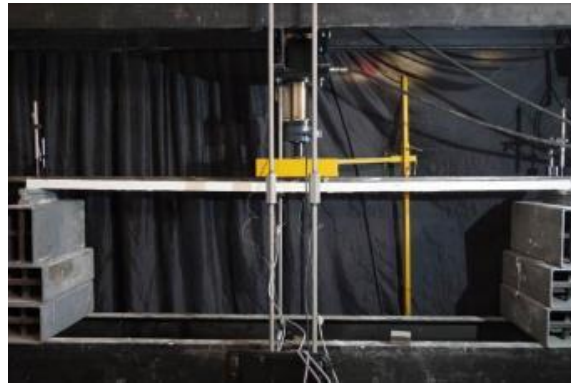
2.6.3 50 mm Kalınlığa Sahip Lamine Deneyi

50 mm kalınlığına sahip lamine 4 noktadan eğilme yükleri altında test edilmiştir. Laminenin deney öncesi çekilmiş fotoğrafı Şekil 2.39'da sunulmuştur.



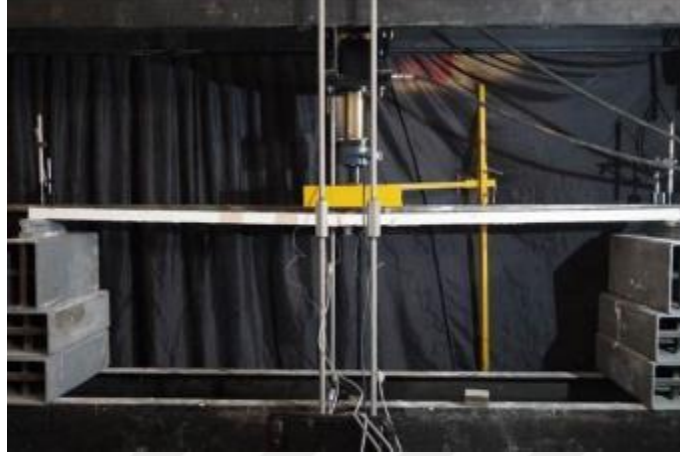
Şekil 2.39 50 mm kalınlığında lamine deneyi (Kişisel arşiv, 2018)

Lamine artan yükler altında test edilmiştir. Liflerde ilk çözülme 40 kg yük seviyesinde gerçekleşmiştir. Bu çözülmeye rağmen lamine davranışında bir değişiklik olmamıştır.



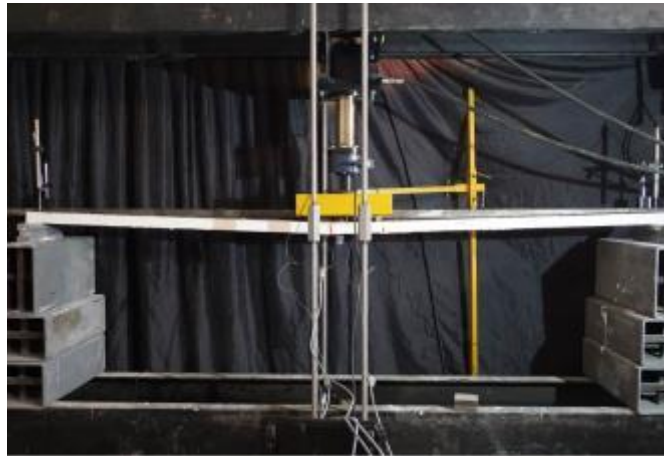
Şekil 2.40 40 kg yük seviyesinde lamine davranışı (Kişisel arşiv, 2018)

Lamine’de gözle gözlenen ilk çatlak 123 kg yük seviyesinde meydana gelmiştir. Bu çatlak dışında maksimum moment bölgesinde 2 adet kılcal çatlak daha gözlemlenmiştir. (Şekil 2.41).

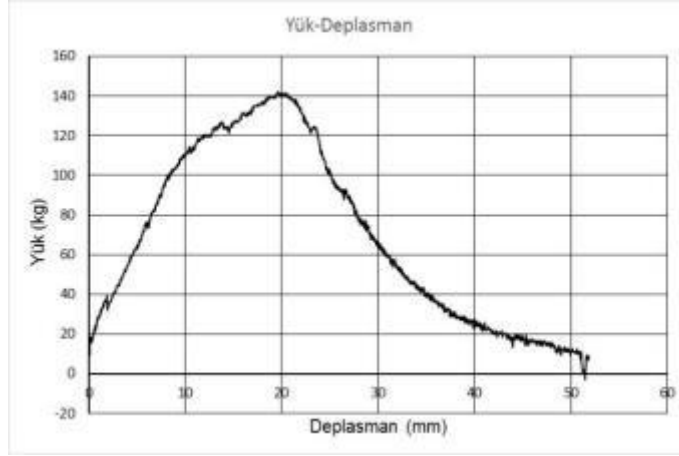


Şekil 2.41 70 kg yük seviyesinde lamine davranışı (Kişisel arşiv, 2018)

Deney elemanında daha önceki yük seviyelerinde gelişen ve lamine sol mesnetine doğru gelişim gösteren çatlak kılcal düzeyden yaklaşık 0,5 mm genişliğine 140 kg yük seviyesinde ulaşmıştır. Diğer iki çatlak ise kılcal düzeyde kalmıştır. Bu yük seviyesinden sonra lamine yük tutamaz hale gelmiştir. Lamine’nin Şekil 2.43’de sunulan yük-deplasman eğrisinden de gözleneceği üzere yükde çıkış eğrisine benzeyen bir düşüş gözlemlenmiştir. Lamine orta deplasmanı 50 mm’ye ulaşınca kadar deneye devam edilmiştir. Laminenin bu deplasman seviyesine ulaşmasından sonra deney sonlandırılmıştır.

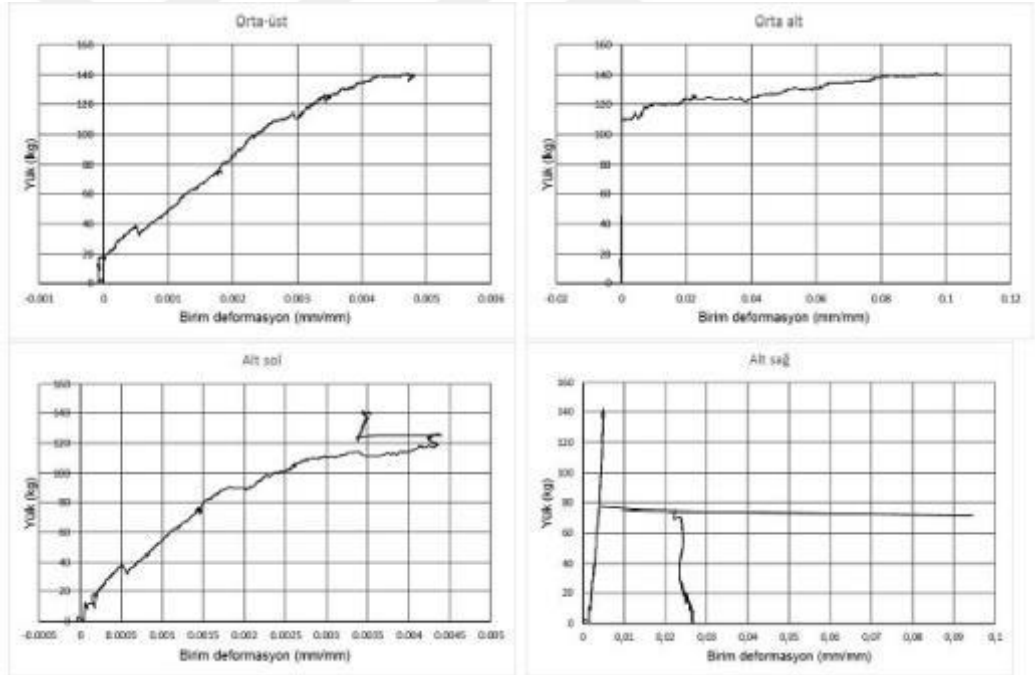


Şekil 2.42 Lamine’nin maksimum deplasman halinde çekilmiş fotoğrafı (Kişisel arşiv, 2018)



Şekil 2.43 Yük-deplasman Eğrisi

Yük-deplasman ölçümleri dışında lamineden birim deformasyon ölçümleri de alınmıştır. Deney elemanlarının birim deformasyon eğrileri Şekil 2.44’de sunulmuştur.



Şekil 2.44 50 mm kalınlığında lamine için Yük-deplasman Eğrisi

En büyük birim deformasyon lamine ortasında ve beklenildiği üzere lamine alt bölgesinde ölçülmüştür. Çatlağa en yakın olan birim deformasyon ölçerde 0,098 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Bu birim deformasyon ölçerde 110 kg yük seviyesine kadar değişim gözlemlenmemiş, bu yük seviyesinden sonra ise ani ve hızlı

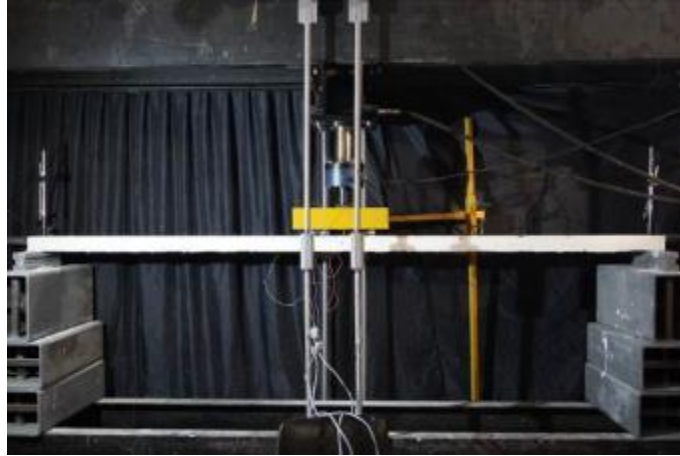
bir artış gözlenmiştir. İlk çatlak gelişiminden sonra çatlağın bu bölgede lokalize olması birim deformasyonun hızlı bir şekilde artmasına neden olmuştur. Birim deformasyon ölçümüne göre, lamine 50 mm deplasman seviyesine ulaşınca kadar çatlak genişlemeye yaklaşık aynı hızda devam etmiştir.

Laminenin altının sağ yük mesnetine denk gelen ölçüm cihazından çok sağlıklı sonuçlar elde edilmediği Şekil 2.44'den görülmektedir. Orta üst birim deformasyon ölçerinde yükteki artışa lineer bir birim deformasyon artışı gözlemlenmiştir. Bu ölçümler alt yüzdeki, aynı lokasyondaki ölçümlere göre oldukça düşüktür.

Alt sol birim deformasyon ölçerinde de orta ölçüme göre oldukça küçük birim deformasyon değerleri elde edilmiştir. 120 kg yük seviyesine kadar yükteki artış ile orantılı deformasyon artışı ölçülmüştür. 123 kg'da meydana gelen ilk çatlak ile birlikte birim deformasyon değerinde ani bir geri dönüş gözlenmiştir. Daha sonra kısmi bir artış gözlenmiştir. Bunun nedeni çatlağın bu kesite doğru büyümeye çalışması olabilir.

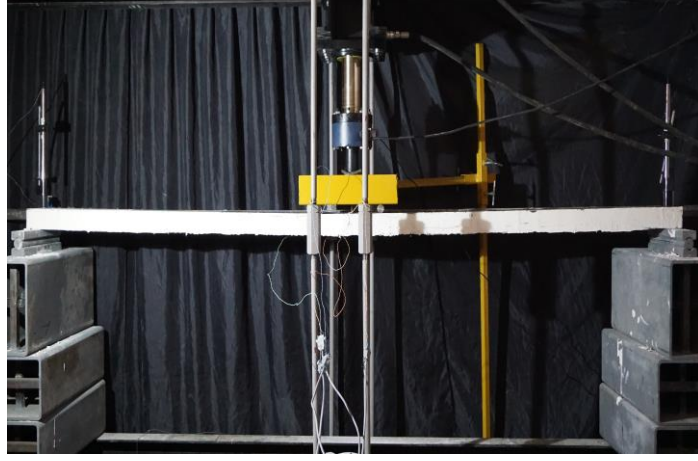
2.6.4 70 mm Kalınlığa Sahip Lamine Deneyi

70 mm lamine kalınlığına sahip laminenin deney öncesi çekilmiş fotoğrafı Şekil 2.45'de sunulmuştur.



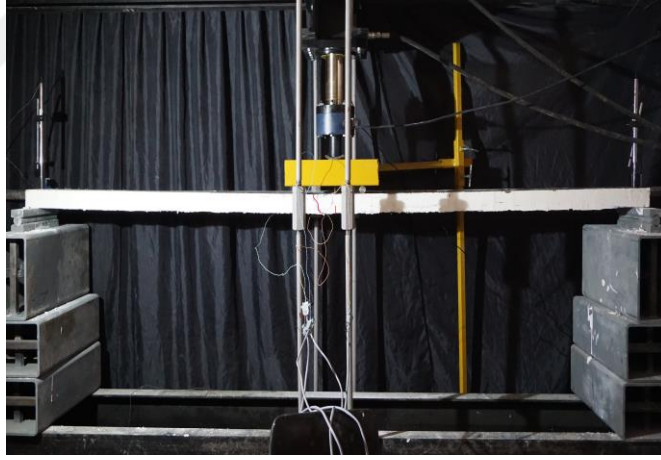
Şekil 2.45 70 mm kalınlığında lamine (Kişisel arşiv, 2018)

Laminede 250 kg yük seviyesine kadar herhangi bir çatlak gözlenmemiştir. Deney elemanı bu yük seviyesine kadar 7 mm deplasman yapmıştır (Şekil 2.46).



Şekil 2.46 250 kg yük seviyesinde lamine davranışı (Kişisel arşiv, 2018)

İlk çatlak 253,05 kg yük, 7,07 mm deplasman seviyesinde maksimum moment bölgesinde gelişmiştir. Bu çatlak ile birlikte laminenin rijitliğinde yük-deplasman eğrisinden de görüleceği gibi düşüş meydana gelmiştir. Bu çatlığa rağmen laminenin yük taşıma kapasitesi düşmemiştir (Şekil 2.47).



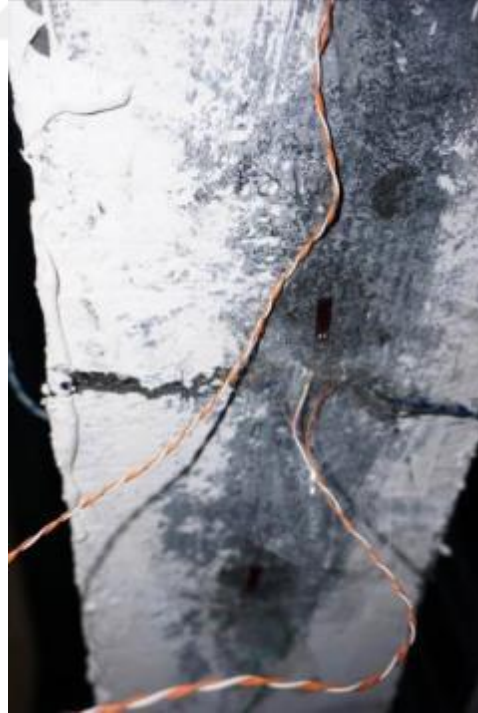
Şekil 2.47 Lamine’de ilk çatlak oluşumu(Kişisel arşiv, 2018)

Laminede 253,05 yük seviyelerinde gelişen çatlağın genişliği 0,7 mm seviyesine 13,28 mm ve 284,11 kg seviyesinde ulaşmıştır. Çatlak lamine üst yüzeyine ulaşırken dallanmıştır. Çatlağın bir kesitte lokalize olmasından sonra laminede yük düşüşü gözlenmiştir.



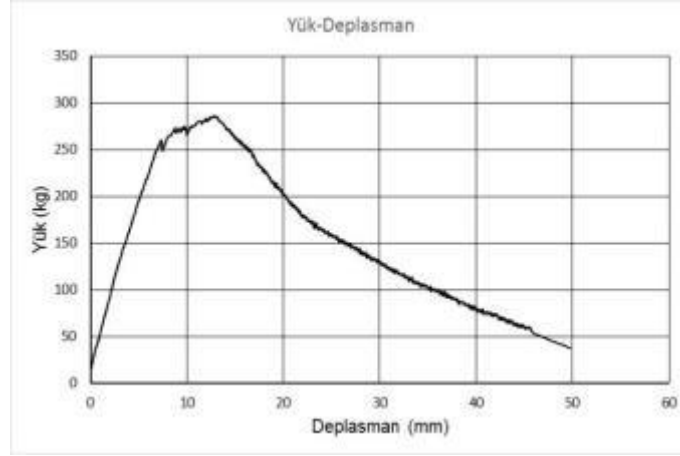
Şekil 2.48 Lamine'nin maksimum deplasman halinde çekilmiş fotoğrafı (Kişisel arşiv, 2018)

Bu yük seviyesinden sonra bu kesitdeki çatlakın genişliğinde artış gözlenmiş, yaklaşık 4 mm seviyesine ulaşmıştır. Buna rağmen lamine düşük yük seviyesinde olsa bile yük taşımaya devam etmiş, tamamen kırılmamıştır (Şekil 2.48). Lamine orta deplasmanı 50 mm seviyesine ulaşınca kadar teste devam edilmiştir. Bu deplasman seviyesinde deneye son verilmiştir. Lamine orta bölgesinde lokalize olmuş çatlakının görüntüsü Şekil 2.49 verilmiştir.



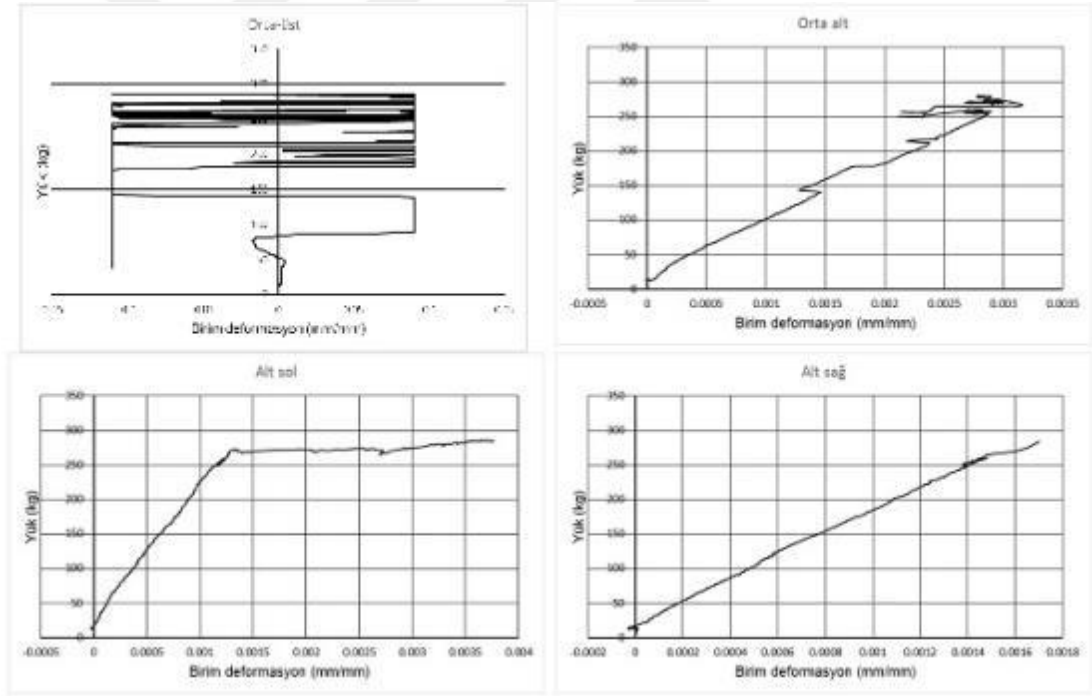
Şekil 2.49 Lamine alt yüzündeki çatlak(Kişisel arşiv, 2018)

70 mm kalınlığa sahip lamine'nin yük deplasman eğrisi Şekil 2.50 verilmiştir.



Şekil 2.50 Yük-deplasman Eğrisi

Yük-deplasman ölçümleri dışında deney elemanından birim deformasyon ölçümleri de alınmıştır. Deney elemanlarının birim deformasyon eğrileri Şekil 2.51’de sunulmuştur.



Şekil 2.51 70 mm kalınlığında lamine için Yük-deplasman Eğrisi

Laminedeki en büyük birim deformasyon lokalize olmuş çatlağa en yakın olan alt bölgenin solundaki birim deformasyon ölçerde 0,0038 mm/mm seviyesinde ölçülmüştür. Birim deformasyon ölçerde 270,15 kg yük seviyesine kadar lineer bir

artış gözlenmiştir. Bu yük seviyesinden sonra birim deformasyon değerinde çatlağın genişlemesine bağlı olarak 3 kat artış gözlenmiştir.

Laminenin ortasının üst bölgesinde yer alan ölçüm cihazından sağlıklı sonuçlar elde edilememiştir. Lamine ortasının alt bölgesinde, sol bölgedeki ölçümlere yakın birim deformasyon değerleri ölçülmüştür (0,0032 mm/mm). 254,34 kg yük seviyesine kadar birim deformasyon ölçerlerde yükteki artışla birlikte lineer bir artış gözlenmiş, 0,0029 mm/mm deformasyon okunmuştur. Bu yük seviyesinden sonra deformasyon değerlerinde ani azalma ve artışlar gözlenmiştir. Buna çatlak gelişimi sırasında liflerin betondan sıyrılmasının neden olduğu düşünülmektedir.

Lamine alt ve sağ bölgesinde yer alan birim deformasyon ölçerlerde okunan değerler alt bölgedeki diğer birim deformasyon ölçerlerin yaklaşık yarısı kadardır. Lokalize çatlak bu deformasyon ölçere uzak olmasına rağmen birim deformasyon okunmasına neden olmuştur. Buda literatürde yer alan genel kanıyı yani birim deformasyon ölçerlerin oluşan çatlığa olan uzaklığına bağlı olarak okunan değerlerde azalma gözlenmediğini kanıtlamaktadır.

2.7 Lamine Testlerinin sonuçları

Gerçekleştirilen lamine deneylerinden bundan sonraki deneylere ışık tutacak önemli sonuçlar elde edilmiştir. Kalınlığa bağlı olarak laminelerin yük taşıma kapasiteleri ve aynı zamanda davranışları değişmektedir. Buna göre 50 mm ve 70 mm kalınlığa sahip deney elemanlarında ciddi lokalize olmuş çatlak gelişimleri gözlenmiştir. Bu çatlak oluşumuna rağmen deney elemanları kırılmadan 50 mm deplasman seviyesine ulaşabilmişlerdir. Çatlak genişliğinin artmasıyla laminelerde yük kayıpları gözlenmiş, ancak lifler laminelerin tamamen kırılmasını engellemiştir. 30 mm kalınlığa sahip lamine ise sünek bir davranış göstermiştir. Buna göre eğilme yetersizliğine sahip betonarme kirişlere farklı kalınlıkta lamine uygulanmasıyla beklenildiği gibi farklı dayanım, davranış ve göçme şekilleri elde etmenin mümkün olacağı düşünülmektedir.

BÖLÜM ÜÇ

BETONARME KİRİŞLERE UYPB LAMİNE ELEMAN

UYGULANMASI

3.1 Genel

Mevcut betonarme yapılar tasarım veya yapım aşamalarında gerçekleşen çeşitli kusurlardan dolayı eğilme sorunları ile karşı karşıyadır. Eğilme yetersizliği deprem yükleri altında yapının enerji tüketmesini azaltmakta, beklenen performanstan daha düşük bir davranış göstermesine neden olmaktadır. Buna karşın mevcut yapı stokunda birçok betonarme yapı elemanı yetersiz donatı, mevcut donatılarda meydana gelen korozyon ve servis yüklerinin artması gibi nedenlerden dolayı eğilme sorunları ile karşı karşıyadır.

Eğilme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin UYPB kullanılarak güçlendirilmesi literatürde yeni yeni incelenen güncel bir konudur. Malzemenin kullanımı ve geliştirilmesi için araştırmalar da devam etmektedir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında eğilme yetersizliğine sahip betonarme kirişlerin UYPB kullanılarak performanslarının artırılması konusu inceleyecek bir deneysel program oluşturulmuştur. Bu bölümde deneysel programda yer alan deney elemanlarının özellikleri, güçlendirme de kullanılacak UYPB'nin mekanik özellikleri ve geliştirme aşamaları detaylı bir şekilde sunulacaktır. Ayrıca deney elemanlarını test etmek için kullanılacak deney düzeneği ve ölçüm düzeneği anlatılacaktır.

Deneysel çalışmada eğilme yetersizliğine sahip elemanlar test edilmiştir. Yetersizliğe sahip test grubunda 1 adet deney elemanı referans elemanıdır. Eğilme yetersizliğine sahip elemanlar için “Deney Elemanı” ibaresi kullanılmıştır.

3.2 Deney Elemanları

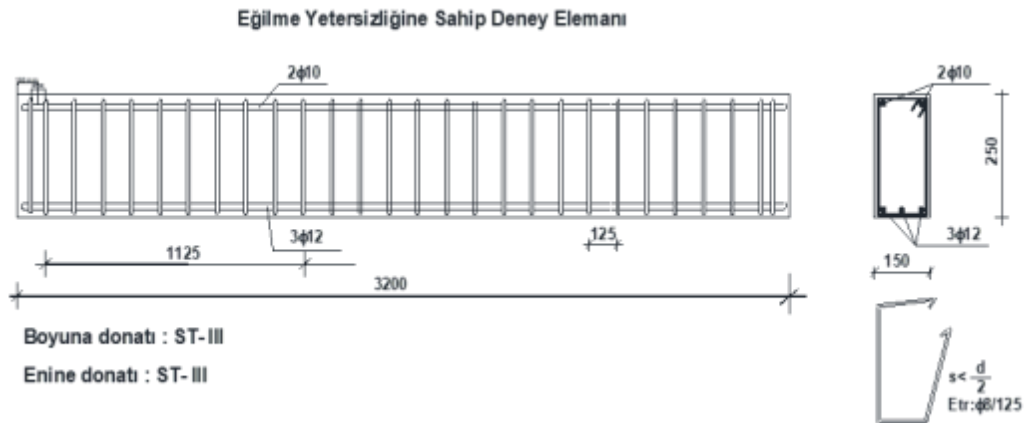
3.2.1 Eğilme Dayanımı Artırılacak Deney Elemanları

Deneyisel çalışmada eğilme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerde farklı bağ şekillerinde uygulanan lamine UYPB'lerin ve taze halde UYPB'lerin dayanım ve davranışta sağlayacağı iyileştirmeler mekanik deneylerle incelenecektir.

Eğilme yetersizliğine sahip deney elemanlarının geometrik boyutları ve donatı düzenlemeleri özdeştir. 3200 mm uzunluğunda dikdörtgen kesitli betonarme kirişler, 150x250 mm boyutlarında üretilmiştir.

Çalışmada lamine UYPB'lerin ve taze halde UYPB'lerin kirişlerin eğilme dayanımına katkısının araştırılması hedeflendiği için deney elemanlarında buna uygun bir donatı düzeni belirlenmiştir. Kiriş tek doğrultuda iki eşit tekil yük altında test edileceği için kirişin çekme bölgesi her zaman kiriş alt yüzü olacaktır. Kirişin çekme bölgesinde 3 adet 12 mm çapında nervürlü donatı kullanılmıştır. Kirişin basınç bölgesinde ise 2 adet 10 mm çapında nervürlü donatı kullanılmıştır.

Eğilme yetersizliğine sahip kirişte kesme kırılmasını engelleyecek bir kesme donatı düzeni oluşturulmuştur. 8 mm çapındaki kesme donatıları 125 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Eğilme dayanımı yetersiz deney elemanın özellikleri aşağıda Şekil 3.1'de sunulmuştur.



Şekil 3.1 Eğilme dayanımı yetersiz deney elemanı (Kişisel arşiv, 2018)

Deney Elemanı-1, eğilme yetersizliğine sahip elemanların referans elemanıdır. Bu elemanda her hangi bir güçlendirme uygulanmamış olup diğer elemanlarda elde edilen katkıyı belirlemek için test edilmiştir. Deney Elemanı-2’de kirişin eğilme bölgesine 30 mm kalınlığında, 150mmx3000mm boyutlarında UYPB lamine yapıştırılmıştır. Deney Elemanı-3, 30mm kalınlığa sahip, içerisine boyuna donatı yerleştirilmiş UYPB ile güçlendirilmiş deney elemanıdır. UYPB lamine deney elemanına epoksi ile yapıştırılmıştır.

Deney Elemanı-4, 50mm kalınlığa sahip UYPB ile güçlendirilmiş deney elemanıdır. Eğilme dayanımı yetersiz deney elemanın eğilme dayanımı artırmak ve davranışını geliştirmek için eğilme bölgesine 50 mm kalınlığında, 150mmx3000mm boyutlarında UYPB lamine yapıştırılmıştır.

Deney Elemanı-5, 50mm kalınlığa sahip, içerisine boyuna donatı yerleştirilmiş UYPB ile güçlendirilmiş deney elemanıdır. UYPB lamine deney elemanına epoksi ile yapıştırılmıştır. Deney elemanlarının özellikleri Tablo 3.1’de özetlenmiştir.

Tablo 3.1 Eğilme dayanımı artırılan deney elemanlarının özellikleri

Deney Elemanı	UYPB Lamine Kalınlığı (mm)	f _c (MPa)		UYPB Laminelerin Özellikleri	
				Bağlama şekli	Laminede Boyuna donatı
Deney Elemanı -1	(Kontrol)	-----	20,3	-----	-----
Deney Elemanı -2	(Güçlendirme)	30	20,4	Epoksi	Yok
Deney Elemanı -3	(Güçlendirme)	30	20,5	Epoksi	Var
Deney Elemanı -4	(Güçlendirme)	50	20,6	Epoksi	Yok
Deney Elemanı -5	(Güçlendirme)	50	20,3	Epoksi	Var

3.3 Deney Elemanlarının Üretilmesi

3.3.1 Malzemeler

Betonarme deney elemanlarının üretilmesinde donatı ve beton kullanılmıştır. Donatı ve beton malzemelerinin karakteristik özellikleri numuneler üzerinde laboratuvarda gerçekleştirilecek testlerle belirlenmiştir. Deney elemanlarının üretilmesinde aynı özellikte beton ve bir seferde ve aynı üretimden temin edilen inşaat demiri kullanılmıştır. Ayrıca deney elemanları güçlendirmek ve mekanik ankrajları deney elemanlarına uygulamak için epoksi bazlı yapıştırıcı da çalışma kapsamında kullanılmıştır. Epoksi bazlı yapıştırıcının özellikleri aşağıda sunulmuştur.

3.3.2 Beton

Deney elemanı olarak kullanılacak kirişlerin beton dökümü Yeni Prefabrike Beton İnşaat San. ve Tic. A.Ş.'de gerçekleştirilmektedir. Dökümler sırasında bir adet proje çalışanının üretim sahasında bulunmasına özen gösterilmektedir. Deney elemanları için C20 sınıfında beton üretimi hedeflenmiştir. Kullanılan betonun çimento dozajı 315 kg/m³, maksimum agrega çapı 16 mm, su/çimento oranı 0,70'dir. Karışımda kırma kireçtaşı agregası kullanılmıştır. CEM-I 42,5 R türü çimentonun özgül ağırlığı 2,97'dir. Agregada fazını oluşturan 0 - 5 mm ve 5-15 mm agreganın özgül ağırlığı sırasıyla 2,8 ve 2,85; su emmesi ise %2,86 ve %1,3'tür. C20 betonunun karışım oranları Tablo 3.2'te sunulmaktadır. Karışım 15 cm çökme değeri sergilemiş, betonun yerleştirilmesi kalıp vibrasyonu ile eksiksiz olarak sağlanmıştır.

Tablo 3.2 Kiriş imalatında kullanılan betonun karışım oranları

Malzeme	Dozaj (kg/m ³)
Çimento (CEM-I 42,5 R)	315
Su	222
İnce agrega (kırma kireçtaşı)*	863
İri agrega (kırma kireçtaşı)*	978

* Agregalar kuru yüzey doygun (KYD) haldedir.

Beton dayanımı 28 gün standart su kürü sonrası 15×15×15 cm'lik numuneler üzerinde belirlenmiş olup beton basınç dayanımları Tablo 3.1’de sunulmuştur.

3.3.1.1 Betonarme Kirişlerin Donatı Özellikleri

Betonarme kirişlerde kullanılan donatıların özellikleri Tablo 3.3’de sunulmuştur.

Tablo 3.3 Donatının mekanik ve kimyasal özellikleri

Donatı Özellikleri			
Kimyasal Birleşimi	Donatı çapı	10	12
	Donatı Özelliği	S420 (nervürlü)	S420 (nervürlü)
	C	0,16	0,29
	SI	0,17	0,2
	Mn	0,7	0,48
	P	0,018	0,032
	S	0,02	0,023
	C _{es}	0,32	0,36
Mekanik Özellikleri	Kesit alanı (mm ²)	78,6	113,1
	Akma Dayanımı (N/mm ²)	476	470
	Çekme Dayanımı (N/mm ²)	557	574
	Çekme/Akma	1,17	1,22
	Uzama	26%	28%

3.3.1.2 UYPB’leri Yapıştırırmada Kullanılacak SİKADUR 31’in (Epoksi) Özellikleri

UYPB laminelerin deney elemanlarına yapıştırılmasında Sikadur 31 (Epoksi) yapıştırıcı kullanılmıştır. Sikadur 31 solventsiz, tiksotropik, 2 bileşenli epoksi reçine ve yüksek dayanımlı dolgu maddelerinden oluşmuş yapıştırma ve onarım harcıdır. Karışımında; yapıştırıcı madde olan epoksi reçinesi ve priz süresini düzenleyen sertleştirici bulunmaktadır. Epoksi harcının hazırlanmasında bileşenler üretici firmanın önerdiği oranlarda kullanılmıştır. 3 birim reçine ve 1 birim sertleştirici dakikada 100 devirli bir karıştırıcıyla bir dakika süre ile karıştırılmış ve epoksi kullanıma hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Sikadur 31 epoksi bileşenlerinin karıştırılması (Kişisel arşiv, 2018)

Uygulamadan sonra epoksinin priz alması için deney elemanları hava şartlarına göre belirlenen süre kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Sikadur 31'in üretici firma tarafından belirtilen özellikleri Tablo 3.5'de verilmiştir.

Tablo 3.4 Sikadur 31'in özellikleri

Sikadur 31 Epoksi Reçine	
Yoğunluk	1,65 kg/l
Karışım Oranı	A (reçine) : B (sertleştirici)=3:1
Uygulama Sıcaklığı	" +10 C° - +20 C°
Basınç Dayanımı	60-70 N/mm ²
Çekme Dayanımı	15-20 N/mm ²
Yapışma (Çeliğe)	15 N/mm ²
Yapışma (Betona)	3,0-3,5 N/mm ²
Young Modülü	8500 N/mm ²
Elastisite Modülü	4300 N/m ²

3.4 Deney Elemanlarının Üretilmesi

Deney elemanlarının üretimi, donatı kafesinin ve kalıbın hazırlanması, beton dökümü ve güçlendirme aşamalarından oluşmaktadır. Bu aşamalardan sonra deney elemanları teste hazır hale gelecektir.

Deney elemanlarının beton dökümünde çelik kalıp kullanılmıştır. Çelik kalıp 3 mm kalınlığında çelik levhalar kullanılarak üretilmiştir. Çelik kalıbın çekilmiş fotoğrafları Şekil 3.3’de sunulmuştur.



Şekil 3.3 Çelik kalıp kesit detayı (Kişisel arşiv, 2018)

Deney elemanlarının donatıları Yeni Prefabrike Beton İnşaat San. ve Tic. A.Ş.’de hazırlanmıştır. Önce kiriş etriyeleri bükülerek hazırlanmıştır. Daha sonra kirişin üst ve alt donatısı hazırlanmıştır. Kesme ve ya eğilme elemanı olması durumuna göre donatı düzenlemeleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4) .



Şekil 3.4 Donatı düzenlemesi (Kişisel arşiv, 2018)

Donatı kalıba yerleştirilmeden önce kalıp yağlanmıştır. Donatıların kalıp ile temasını önlemek için pas payı bırakılmıştır. Donatı kalıba yerleştirirken, donatının yağlanmış yüzeylere temas etmemesine dikkat edilmiştir. Çelik kalıp içine yerleştirilmiş beton dökümüne hazır iki adet kirişin donatı kafesi Şekil 3.5'da görülmektedir.



Şekil 3.5 Beton dökümüne hazır deney elemanları (Kişisel arşiv, 2018)

Deney elemanlarının dayanım ve davranış açısından birbirleriyle karşılaştırılacağı düşünüldüğünde beton dayanımlarının benzerlik göstermesi son derece önemlidir. Bunun için tüm dökümlerde aynı agrega ve beton malzemelerinin kullanılmasına özen gösterilecektir. Dökümün gerçekleştirildiği tesiste çalışmaya özel olarak C20 sınıfı beton dizaynı ve dökümü gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6 Deney elemanları beton dökümü (Kişisel arşiv, 2018)

Hazırlanan beton kalıba vibratör kullanılarak yerleştirilmiştir. Üç adet standart silindir numunesi alınmıştır. Şekil 3.7’de beton dökümü yapılan ve beton dökümü tamamlanmış iki adet kiriş görülmektedir. Beton dökümünden bir gün sonra kiriş kalıplarının yan yüzeyleri açılmış, aynı gün beton numuneleri de kalıptan alınmıştır. Deney elemanı ile küp numuneleri aynı şartlarda 28 gün kür uygulanmıştır.

3.5 Gerçek Ölçekli UYPB Laminelerin Betonarme Kirişlere Farklı Yöntemlere Uygulanması

3.5.1 Eğilme Yetersizliğine Sahip Elemanlara Farklı Yöntemlerle UYPB Lamine Uygulanması

3.5.1.1 UYPB Laminelerin Epoksi ile Yapıştırılması

UYPB lamine yapıştırılarak eğilme dayanımı artırılacak kirişlerde, ara yüz başarısı kirişlerin nihai davranışını doğrudan etkileyeceği için yapıştırma işlemi son derece önemlidir. Bu nedenle UYPB lamineleri betonarme kirişlere yapıştırılırken her aşamaya özen gösterilmiştir.

Kürü tamamlanan deney elemanlarının UYPB uygulamasına kiriş yüzey hazırlığı ile başlanmıştır. Öncelikle deney elemanlarının yapıştırma yüzeyindeki şerbet tabakası uzaklaştırılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Beton yüzeyinin hazırlanması(Kişisel arşiv, 2018)

Daha sonra uygulama yüzeyinin epoksi ile daha iyi bir bağ kurabilmesi yüzey için , önce tel fırça daha sonra da matkabın ucuyla pürüzlendirilmiştir. Pürüzlendirme işlemi tamamlanmış kiriş Şekil 3.8’da sunulmuştur. Yapıştırma işlemine geçmeden hemen önce yapıştırma yüzeyindeki toz basınçlı hava ve nemli bir bezle temizlenmiştir.



Şekil 3.8 Yüzey pürüzlendirmesi tamamlanmış betonarme kiriş elemanı(Kişisel arşiv, 2018)

Yüzey hazırlığı tamamlanmış kirişe hazırlanan epoksi yaklaşık 2,0 mm kalınlığında olacak şekilde spatula yardımıyla sürülmüştür. Sürülen epoksinin kalınlığı bir kürdan yardımıyla kontrol edilmiştir (Şekil 3.9 ve Şekil 3.10).



Şekil 3.9 Sikadur 31 epoksinin betonarme kirişe spatula yardımıyla sürülmesi(Kişisel arşiv, 2018)



Şekil 3.10 Sikadur 31 epoksinin betonarme kirişe uygulanmış hali (Kişisel arşiv, 2018)

Bu işlem tamamlandıktan sonra UYPB lamine ıslak bir bezle silinmiş ve hızlı bir şekilde epoksi bulanmış yüzeye yerleştirilmiştir. Bu noktadan sonra UYPB ve kiriş arasında tam bir bağ kurulması gerekmektedir. Bu nedenle deneyler için özel bir sıkıştırma aparatı üretilmiştir. Sonsuz dişli kullanılarak kapalı bir çerçeve halinde geliştirilen aparatın alt ve üst bölgesinde kutu profiller bulunmaktadır. Üst kutu profilin altında UYPB lamineyi geniş bir yüzey ile sıkması için başka bir kutu profil yerleştirilmiştir. Çerçevenin dış kısmında bulunan sonsuz dişlilerin sıkıştırılmasıyla kapalı çerçeve kirişi bir mengene gibi sarmaktadır. Geliştirilen aparatın fotoğrafı Şekil 3.11’de sunulmuştur.



Şekil 3.11 Sıkıştırma aparatı (Kişisel arşiv, 2018)

Daha sonra kirişte bu mengene aparatları uygun noktalara yerleştirilmiş ve UYPB lamine bu mengeneler ile sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma işlemi ve sonrasında çekilen fotoğraflar Şekil 3.12’de sunulmuştur.



Şekil 3.12 UYPB lamine ile betonarme kirişin aparat ile sabitlenmesi (Kişisel arşiv, 2018)

Bu aparat ile sıkıştırma işlemi tüm UYPB yüzeyinin kiriş ile tam bağ kurmasını sağlamayabilir. Bu nedenle aralarda kalan boşluklara Şekil 3.13’de görüldüğü gibi, her boşluğa toplam 40 kg ağırlık koyulmuştur. Epoksinin priz alması hava sıcaklığı ile doğrudan ilişkilidir. Kış aylarında yapılan işlemlerde epoksinin priz süresini tamamlaması için en az 14 gün laboratuvar ortamında beklenmiştir.



Şekil 3.13 UYPB lamine yapıştırılma işlemi (Kişisel arşiv, 2018)

3.6 Yükleme ve Ölçüm Düzeneği

Deneyel çalışma kapsamında değerlendirilecek deney elemanları iki tekil yük altında artan yükler altında test edilmiştir. Deney ve ölçüm düzeni Şekil 3.18’de verilmiştir. Yükleme 300 kN basınç 150 kN çekme kapasiteli bir hidrolik kriko yardımıyla yapılmıştır. Deney elemanlarına etkitilen yük, 300 kN basınç, 300 kN çekme kapasiteli bir yük hücresi ile ölçülmüştür. Yükleme için daha önce belirtildiği üzere hız kontrollü elektrikli hidrolik bir sistem kullanılmıştır. Yükleme 20 kg/sn hızında yapılmıştır. Deney elemanlarının dört noktadan eğilme altında test edilmesinin nedeni kiriş orta bölgesinde kesme kuvvetinden arındırılmış bir bölge oluşturabilmektir. Böylece bu bölgede sadece eğilme momenti altında deneysel değişkenlerin etkileri değerlendirilebilecektir.

Kirişlerin davranışlarını a/d oranı doğrudan etkilemektedir bu nedenle eğilme baskın olacak elamanlarda a/d oranı 6, Deney elemanlarının ölçümleri için 3 adet deplasman ölçer kullanılmıştır. Sabit ve hareketli mesnete sahip deney elemanında orta noktadan maksimum deplasman, mesnetlerde mesnet hareketleri ölçümleri alınmıştır.



Şekil 3.14 Deney ve ölçüm düzeneği (Kişisel arşiv, 2018)

Deney elemanlarında birim deformasyon ölçümleri de alınmıştır. Birim deformasyon ölçerler yerleştirildikleri doğrultudaki mekanik hareketleri elektronik sinyallere dönüştüren deneysel ölçüm aletleridir. Bu ölçüm aletleri yardımıyla lamine UYPB’lerdeki birim deformasyonlar ölçülmüştür. Deney sırasında tüm bu ölçümler dijital veri toplama sistemi aracılığı ile bilgisayara aktarılmıştır.



BÖLÜM DÖRT

BETONARME KİRİŞLENDE YÜKLEME DENEYLERİ

Bölümde deneylerde gerçekleştirilen gözlemler detaylı bir şekilde sunulmuştur. Eğilme yetersizliğine sahip olan ve bu yetersizliğe karşı güçlendirilen deneyler anlatılmıştır.

4.1 Eğilme yetersizliğine sahip kiriş deneyleri

4.1.1 Deney Elemanı-1

Deney Elemanı-1, çalışmanın eğilme referans elemanıdır. Deney elemanı eğilme dayanımı düşük olacak şekilde tasarlanmıştır. Deney elemanının test öncesi durumu Şekil 4.1’de sunulmuştur. Deney elemanı artan yükler altında göçme gerçekleşinceye kadar test edilmiştir.



Şekil 4.1 Referans deney elemanı, Deney Elemanı-1(Kişisel arşiv, 2018)



Şekil 4.2 İlk eğilme çatlağı, Deney Elemanı-1 (Kişisel arşiv, 2018)

Deney elemanında ilk çatlak kiriş orta bölgesinde 10,50 kN yük seviyesinde gerçekleşmiştir. Kiriş eksenine dik olarak gelişim gösteren çatlak ani olarak gelişmiştir (Şekil 4.2).

Artan yükler altında kirişte eğilme çatlaklarının sayısında artış meydana gelmiştir. Yük- deplasman eğrisinden de anlaşılabacağı üzere bu çatlak gelişimlerine bağlı olarak kirişin rijitliğinde azalma meydana gelmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Kirişte gelişen eğilme çatlakları (Kişisel arşiv, 2018)

Deney elemanı 42,99 kN yük, 14,48 mm deplasman seviyesine ulaştığında yükte kısmi bir azalma gözlenmiştir. Bu kirişin taşıdığı en yüksek yük değeridir.

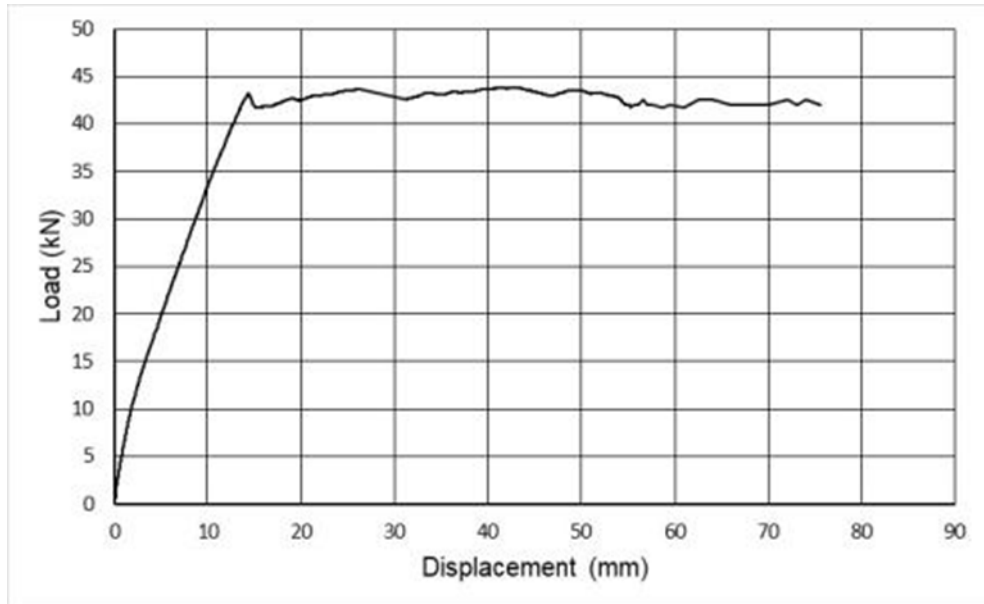


Şekil 4.4 Kirişte çatlaklarının son hali (Kişisel arşiv, 2018)

Bu azalma ile 41,75 kN yük ve 15,61 mm deplasman seviyesinde kirişin alt boyuna donatısı akmıştır. Bu yük seviyesinden sonra kiriş yük tutamaz hale gelmiş ancak deplasman sünek davranışı gösterir şekilde artmaya devam etmiştir.(Şekil 4.4)

Artan yükler altında kiriş orta bölgesinde gelişen çatlakların genişliklerinde artış gözlenmiştir. Bu bölgede ölçülen en büyük çatlak genişliği 0,1 mm seviyesine ulaşmıştır. Bu çatlaklara ek olarak kılcal düzeyde yeni çatlak oluşumları da kirişte gözlenmiştir.

Deneye 75,53 mm deplasman seviyesine kadar devam edilmiştir. Bu deplasman seviyesinde basınç bölgesindeki betonun ezilmesi nedeniyle deneye son verilmiştir. Deney elemanının Yük-deplasman eğrisi Şekil 4.5’de sunulmuştur.



Şekil 4.5 Deney Elemanı-1 yük-deplasman eğrisi

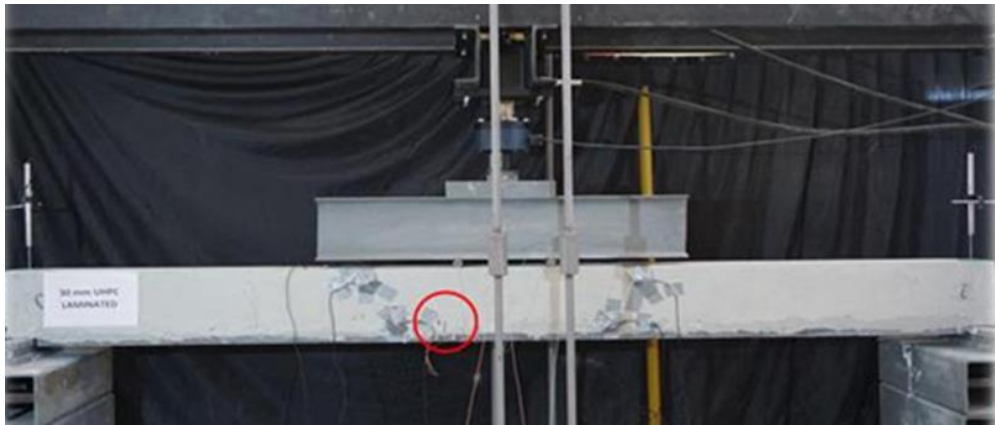
4.1.2 Deney Elemanı-2

Deney Elemanı-2, 30mm kalınlığa sahip UYPB ile güçlendirilmiş deney elemanıdır. Eğilme dayanımı yetersiz deney elemanın eğilme dayanımı artırmak ve davranışını geliştirmek için eğilme bölgesine 30 mm kalınlığında, 150mmx3000mm boyutlarında UYPB lamine yapıştırılmıştır. Deney elemanının test öncesi durumu şekil 4.6’de sunulmuştur. Deney elemanı artan yükler altında göçme gerçekleşinceye kadar test edilmiştir.



şekil 4.6 Deney Elemanı-2, 30 mm UYPB epoksi ile yapıştırılmış (Kişisel arşiv, 2018)

Deney elemanında ilk çatlak kiriş orta açıklığında, kirişe soldan etkiyen tekil yüke yakın, 23,05 kN yük seviyesinde oluşmuştur. Ani olarak gelişim gösteren çatlak, kiriş eksenine dik olarak gelişmiştir (şekil 4.7)



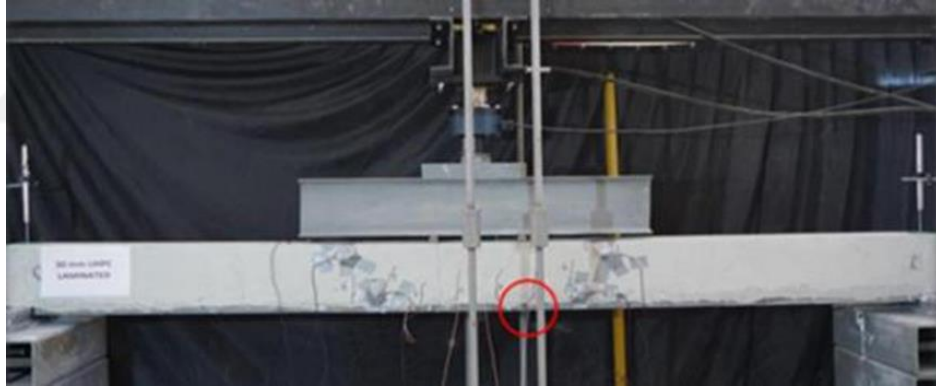
şekil 4.7 İlk eğilme atlağı, Deney Elemanı-2(Kişisel arşiv, 2018)

Çatlaklar kirişin orta bölgesinde yoğunlaşmıştır. 2.çatlak 30,10 kN, 3.çatlak 31,40 kN ve 4.çatlak ise 32,15 kN yük seviyelerinde gelişmiştir (Şekil 4.8)



Şekil 4.8 Kirişte gelişen eğilme çatlakları(Kişisel arşiv, 2018)

37,35 kN yük seviyesinde UYPB içerisindeki lifler matrisinden sıyrılmaya başlamış, sıyrılma sesleri yoğunlaşarak duyulabilir hale gelmiştir. 39,50 kN yük seviyesinde UYPB laminedeki çatlak belirginleşmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 UYPB laminedeki çatlak gelişimi(Kişisel arşiv, 2018)

42,42 kN yük ve 11,95 mm deplasman seviyesinde referans elemanın davranışına benzeyen ani bir yük düşüşü meydana gelmiştir. Ancak kiriş tekrardan yük taşımaya başlamıştır. Burada UYPB laminenin katkısıyla kirişin yük taşıma kapasitesinde bir artış gözlenmiştir. Yük deplasman eğrisinde bu düşüş meydana geldiği ana kadar ve ardından UYPB'nin etkisiyle elde edilen yük artışının eğrilerinin eğimi birbirlerinden farklıdır. Buna göre, deney elemanının UYPB laminenin etkisiyle, daha önce oluşan çatlaklara rağmen, daha rijit bir davranış sergilemektedir (Şekil 4.12).

41,90 kN ile 47,50 kN yükleri arasında 5-6-7 numaralı çatlaklar oluşmuş ve daha önce gelişen çatlakların çatlak genişliklerinde artış devam etmiştir. 48,50 kN yük seviyesinde kirişte 8. Çatlak gelişmiştir. 51,00 kN yük seviyesinde UYPB plaka tamamen kırılmıştır (Şekil 4.10).

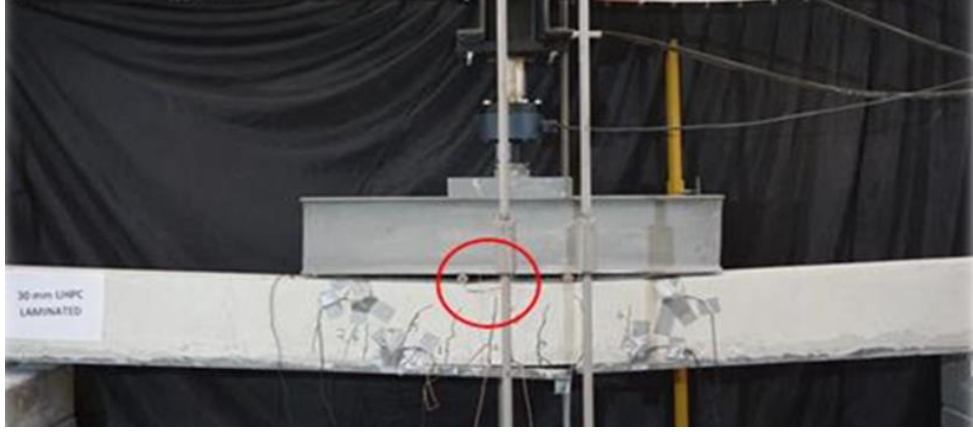
UYPB laminede çatlaklar bir bölgede yoğunlaşmış ve levhayı iki parçaya ayırmıştır. Bu aşamadan sonra levha kısımları bağımsız iki parça olarak çalışmıştır. Laminede çoklu çatlak gözlenmemiştir. Bu yük seviyesine kadar UYPB lamine ve kiriş ara yüzünde yani yapıştırıcı da herhangi bir çatlak oluşmamıştır. Kiriş ile levha tam bağıni korumuştur.



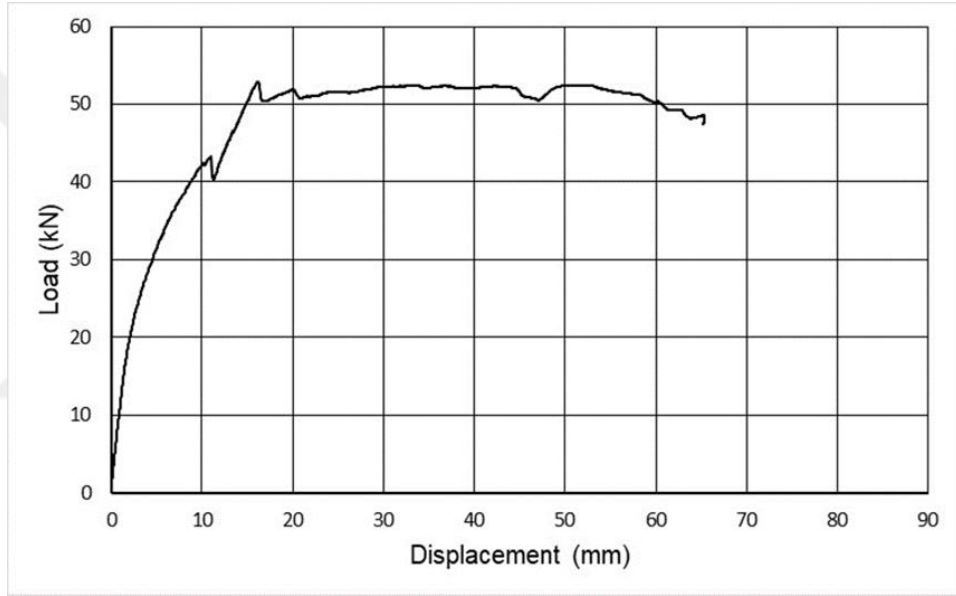
Şekil 4.10 Deney Elemanı-2 (5100 kN yük seviyesinde) (Kişisel arşiv, 2018)

Artan yükler altında lamine kiriş alt yüzünde iki ayrı levha şeklinde çalışmaya devam etmiştir. Bunun etkisiyle kiriş bir miktar daha yük taşımıştır. Deney elemanı 52,34 kN yük, 16,38 mm deplasman seviyesine ulaştığında yükte kısmi bir azalma gözlenmiştir. Bu kirişin taşıdığı en yüksek yük değeridir. Bu azalmadan sonra kirişin alt boyuna donatısı akmıştır (Şekil 4.12).

Deneye 65,25 mm deplasman seviyesine kadar devam edilmiştir. Bu deplasman seviyesinde basınç bölgesindeki betonun ezilmesi ve kiriş orta deplasmanının bu ezilme nedeniyle okunamadığı için deneye son verilmiştir (Şekil 4.11). Deney elemanının yük- deplasman eğrisi Şekil 4.12’de sunulmuştur.



Şekil 4.11 Deney Elemanı-2, göçme şekli(Kişisel arşiv, 2018)



Şekil 4.12 Deney Elemanı-2 Yük-Deplasman eğrisi

4.1.3 Deney Elemanı-3

Deney Elemanı-3, 30mm kalınlığa sahip, içersine boyuna donatı yerleştirilmiş UYPB ile güçlendirilmiş deney elemanıdır. Eğilme dayanımı yetersiz deney elemanın eğilme dayanımı artırmak ve davranışını geliştirmek için eğilme bölgesine 30 mm kalınlığında, 150mmx3000mm boyutlarında UYPB lamine epoksi ile yapıştırılmıştır. Deney elemanının test öncesi durumu Şekil 4.13 'de sunulmuştur. Deney elemanı artan yükler altında göçme gerçekleşinceye kadar test edilmiştir.



Şekil 4.13 Deney elemanın test önceki durumu (Kişisel arşiv, 2018)

Deney elemanında yük 41,32 kN seviyesine ulaştığında kiriş elemanın çekme bölgesinde ilk eğilme çatlakları gözlenmiştir. Yük artışına bağlı olarak kiriş yüzeyinde eğilme çatlaklarının sayısı artmıştır. Yük 45,05 kN seviyesine ulaştığında ikinci çatlak çekme bölgesinde gözlenmiştir (Şekil 4.14).



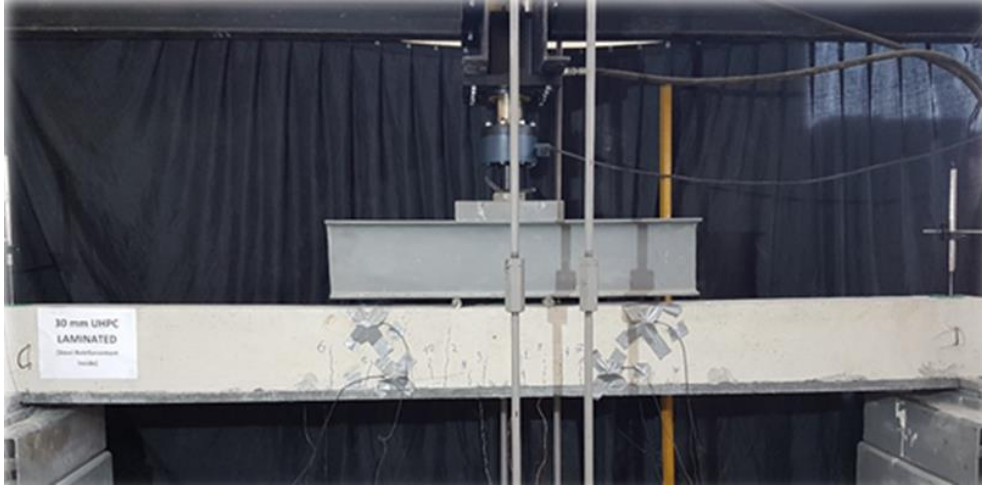
Şekil 4.14 Kirişte gelişen 1 ve 2 numaralı eğilme çatlakları (Kişisel arşiv, 2018)

49,00 kN yük değerine ulaşıldığında üçüncü, 50,04 kN’da dördüncü, 52,06 kN’da beşinci, 53,07 kN’da altıncı, 54,08 kN’da yedinci ve sekizinci eğilme çatlakları gözlenmiştir (Şekil 4.15).



Şekil 4.15 Kirişte gelişen eğilme çatlakları (Kişisel arşiv, 2018)

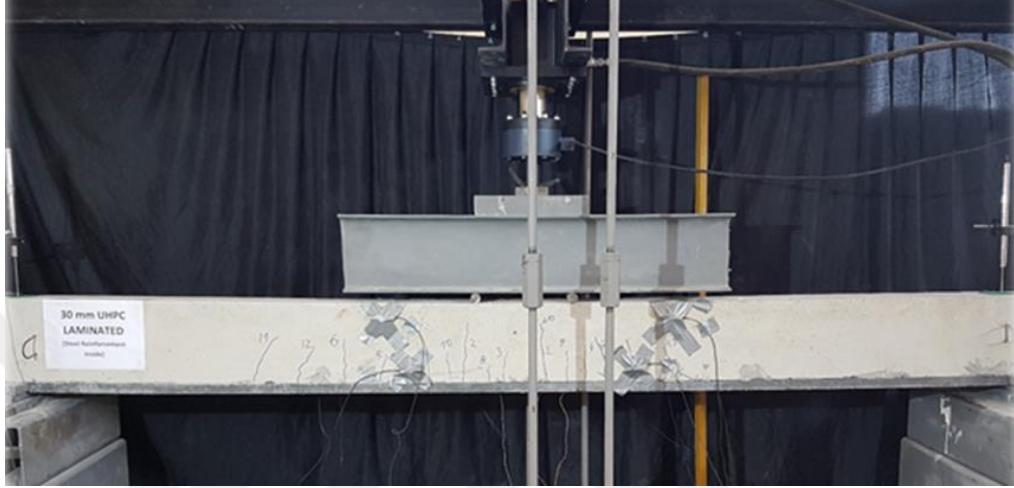
Yük değeri 56,04 kN seviyesine ulaştığında donatı ile güçlendirilmiş ve kirişe yapıştırılmış 30mm kalınlığa sahip UYPB lamineden fiberlerin matrsten ayrılmasından kaynaklanan sesler işitilmiştir. Ancak yakın temasla incelendiğinde laminede herhangi bir çatlamanın söz konusu olmadığı görülmüştür. Yük 74,03 kN seviyesine ulaştığında liflerin yine lamine üzerinde herhangi bir çatlak yok iken çalışmaya devam ettiği lamineden gelen seslerden anlaşılmıştır. 75,08 ve 76,09 kN yük değerine ulaşıldığında deney elemanında sırası ile 9 ve 10 numaralı eğilme çatlak oluşumu gözlenmiştir (Şekil 4.16).



Şekil 4.16 Kirişte gelişen eğilme çatlakları (Kişisel arşiv, 2018)

89,06 kN yük seviyesinde salt eğilme bölgesi olarak adlandırdığımız bölgede eğilme çatlakları yayıldıktan sonra yeni çatlaklar oluşmuştur. Fakat bu çatlakların önceki deney elemanlarının aksine orta kesitte değil, kirişin kesme açıklığı boyunca

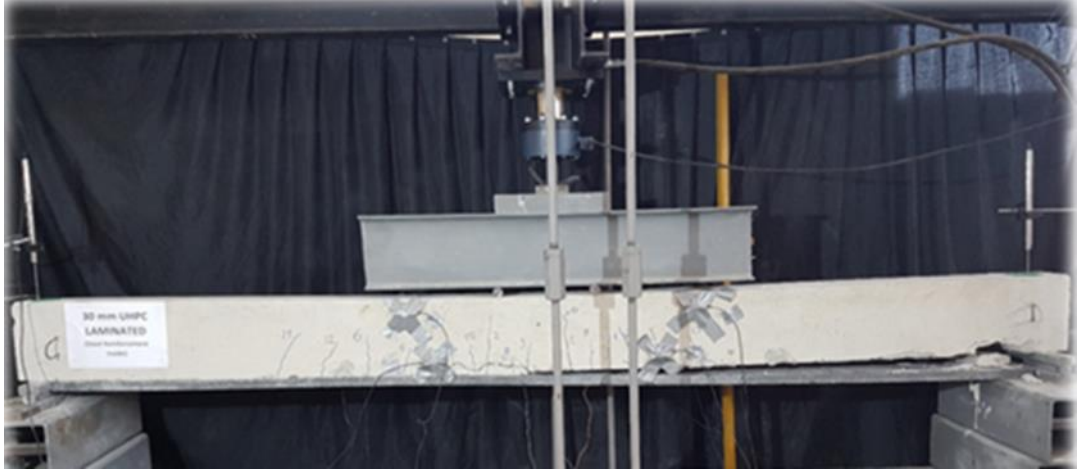
yayıldığı gözlenmiştir. Lamine ile kiriş elemanının ara yüzünde eğilme çatlakları 45°lik kesme çatlağı şekline dönmeye çalışmıştır. Yük değeri 90,04 kN değerine ulaştığında 7 numaralı çatlağın gelişmeye devam ettiği, bir ve iki numaralı eğilme çatlaklarının basınç bölgesine doğru ilerlediği belirlenmiştir. 91,11 kN yük değerinde sırası ile 11, 12 ve 13 numaralı çatlakların oluşumu görülmüştür (Şekil 4.17).



Şekil 4.17 Kirişte gelişen eğilme çatlakları (Kişisel arşiv, 2018)

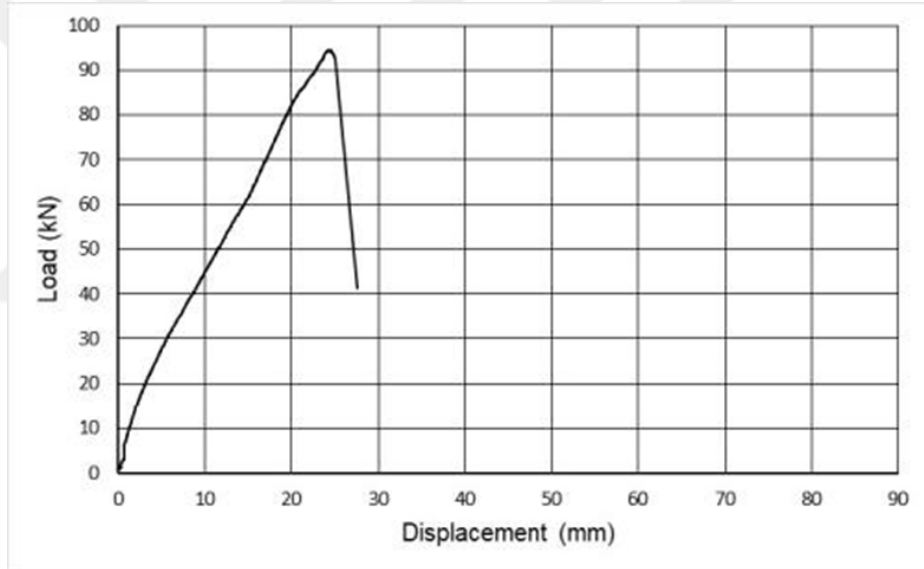
Donatı ile güçlendirilmiş 30mm kalınlığında UYPB lamine 94,04 kN'a kadar eğilme kapasitesine katkıda bulunmuş, bu yük seviyesinde laminenin kiriş gövdesinden ayrılmasıyla göçmüştür. UYPB'nin kirişten ayrılma bölgesi incelendiğinde kirişin en çok zorlanan orta kısmında çatlağın kabuk betonunu pas payına kadar ayırdığı görülmüştür. Lamine ile kirişin başarılı şekilde aderans sağladığı ayrılma şeklinden anlaşılmıştır(Şekil 4.18).

Deney sonucunda donatılandırılmış UYPB laminede herhangi bir çatlama, kırılma olmadığı görülmüştür. İçerisindeki donatının bu davranışındaki payı açıkça anlaşılmıştır.



Şekil 4.18 Laminenin kirişten ayrılması(Kişisel arşiv, 2018)

Deney elemanı 4'ün yük deplasman eğrisi Şekil 4.19'de sunulmuştur.



Şekil 4.19 Deney Elemanı 4 yük-deplasman eğrisi

4.1.4 Deney Elemanı-4

Deney Elemanı-4, 50mm kalınlığa sahip UYPB ile güçlendirilmiş deney elemanıdır. Eğilme dayanımı yetersiz deney elemanın eğilme dayanımı artırmak ve davranışını geliştirmek için eğilme bölgesine 50 mm kalınlığında, 150mmx3000mm boyutlarında UYPB lamine yapıştırılmıştır. Deney elemanının test öncesi durumu Şekil 4,20'de sunulmuştur. Deney elemanı artan yükler altında göçme gerçekleşinceye kadar test edilmiştir.



Şekil 4.20 Deney elemanının test önceki durumu (Kişisel arşiv, 2018)

37,12 kN yük seviyesinde kirişte ilk eğilme çatlağı yaklaşık olarak kiriş orta bölgesinde gelişmiştir. (Şekil 4.21).



Şekil 4.21 İlk eğilme Çatlağı, Deney Elemanı 4 (Kişisel arşiv, 2018)

Yükte meydana gelen artışa bağlı olarak kiriş gövdesinde gözlemlenen eğilme çatlaklarında artış gözlenmiştir. Buna göre 2, 3, 4, 5 ve 6 no'lu çatlaklar sırasıyla 39,12 kN, 40,82 kN, 42,16 kN, 44,13 kN yük ve 49,12 kN yük seviyesinde gelişmiştir (Şekil 4.22).



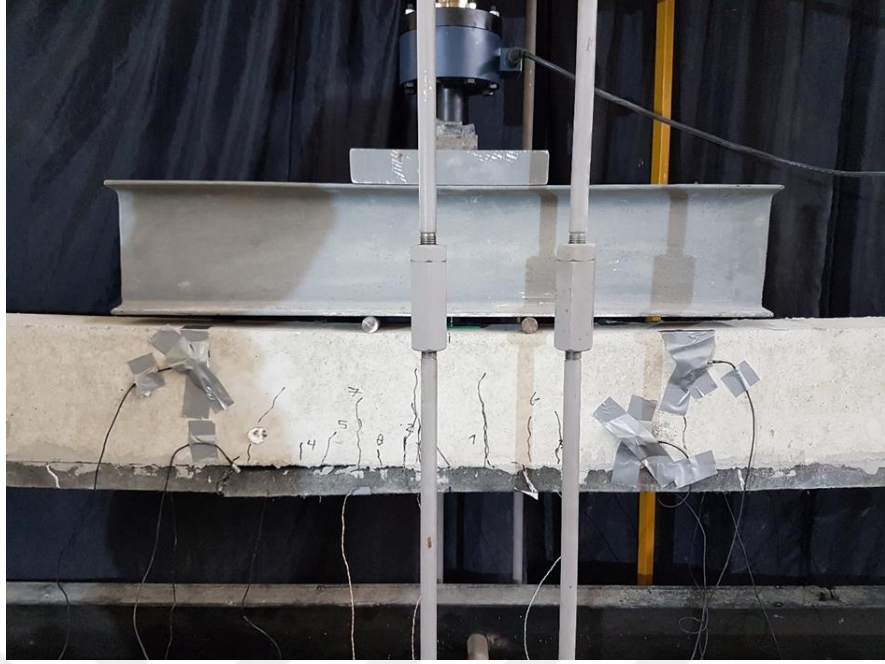
Şekil 4.22 Deney Elemanı 4'de gelişen eğilme çatlakları (Kişisel arşiv, 2018)

44,17 kN yük seviyesinde liflerin UYPB matrisinden sıyrıldığını anlatan sesler duyulmaya başlamıştır. Seslerdeki artışla birlikte laminede kılcal bir çatlak oluşumu gözlenmiştir. Çatlak yaklaşık olarak sağdaki yükleme noktasına denk gelen bir doğrultuda gelişmiştir(Şekil 4.23).



Şekil 4.23 Deney Elemanı 4'de laminede gelişen çatlak (Kişisel arşiv, 2018)

Yükteki artışla birlikte laminede yeni bir çatlak gelişimi gözlenmiştir. Laminede çoklu çatlak elde edilmiştir. Laminede çoklu çatlak elde edilmesi, enerji yutma kapasitesini artıracak için önemlidir. Bu yeni çatlak gelişimine ek olarak kiriş gövdesinde yeni çatlaklar da gelişmiştir (Şekil 4.24).



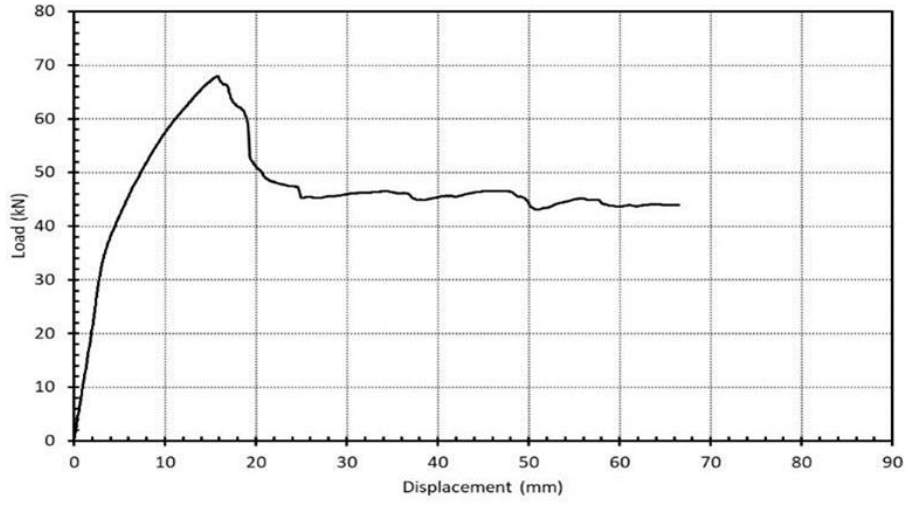
Şekil 4.24 Deney Elemanı 4’da laminede gelişen 2.çatlak (Kişisel arşiv, 2018)

Gelişen bu çatlağın gelişimi hızlı olmuş ve lamine kırılmıştır. Laminede gerçekleşen bu iki kırılmaya rağmen lamine yük taşıma kapasitesine 67,97 kN yük seviyesine kadar devam etmiştir. Bu yük seviyesinden sonra lamine iki farklı parça olarak davranmaya başlamış ve deney elemanının yük taşıma kapasitesi ani olarak düşmüştür. Laminenin katkısı ortadan kalktıktan sonra kiriş boyuna donatıları 46,19 kN yük ve 24,79 mm deplasman seviyesinde akmıştır. Akustik emisyon sensörlerine zarar gelmemesi için deney sonuna doğru sensörler betonarme kiriş yüzeyinden sökülerek deneye bu şekilde devam edilmiştir. Deney elemanının kırılmadan sonra çekilen fotoğrafı Şekil 25’de sunulmuştur



Şekil 4.25 Deney Elemanı 4 göçme şekli (Kişisel arşiv, 2018)

Deney elemanının yük- deplasman eğrisi Şekil 4.26’da sunulmuştur.



Şekil 4.26 Deney Elemanı-4 Yük-Deplasman eğrisi

4.1.5 Deney Elemanı-5

Deney Elemanı-5, 50mm kalınlığa sahip, içerisine boyuna donatı yerleştirilmiş UYPB ile güçlendirilmiş deney elemanıdır. Eğilme dayanımı yetersiz deney elemanın eğilme dayanımı artırmak ve davranışını geliştirmek için eğilme bölgesine 50 mm kalınlığında, 150mmx3000mm boyutlarında UYPB lamine epoksi ile yapıştırılmıştır. Deney elemanının test öncesi durumu Şekil 4.27 ’de sunulmuştur. Deney elemanı artan yükler altında göçme gerçekleşinceye kadar test edilmiştir.



Şekil 4.27 Deney elemanının test önceki durumu(Kişisel arşiv, 2018)

Kirişte ilk eğilme çatlağı 47,22 kN yük seviyesinde gözlemlenmiştir. Bu yük seviyesi aşıldıktan sonra kiriş gövdesinde başka bir çatlak gelişmemiştir. Yük 93,26 kN yük seviyesine ulaştığı sırada lamine, kirişin sağ tarafından yapışma yüzeyinden ani ve sesli olarak ayrılmıştır. Ayrılırken bir parça beton parçasını da kopartmıştır. Bu yapışmanın başarılı olduğunu göstermektedir. Deney elemanın göçme sonrası fotoğrafı Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’da sunulmuştur.

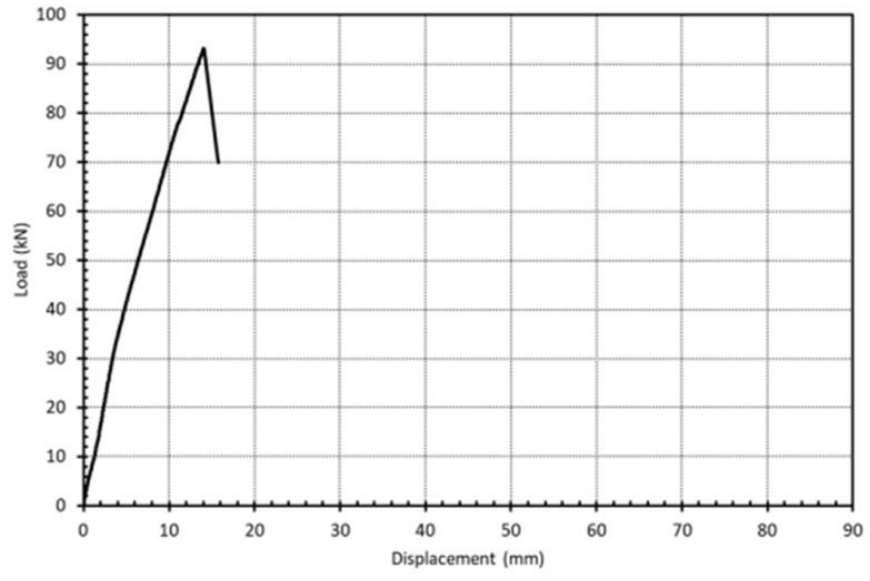


Şekil 4.28 Deney elemanın göçme şekli (Kişisel arşiv, 2018)



Şekil 4.29 Deney elemanın göçme şekli (Kişisel arşiv, 2018)

Deney elemanın yük deplasman eğrisi Şekil 4.30’de sunulmuştur. Görüldüğü gibi laminenin ayrılması sırasında kiriş ani olarak yük kaybederek göçmüştür.



Şekil 4.30 Yük deplasman eğrisi, Deney Elemanı-5

BÖLÜM BEŞ

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde deney sonuçları; dayanım ve davranış, rijitlik ve enerji tüketimi başlıkları altında değerlendirilmiştir. Ayrıca deney elemanlarının yük-birim deformasyon ilişkileri de incelenmiştir. Deney sonuçları, Ultra Yüksek Performanslı Beton'un (UYPB) eğilme dayanımını artırmaya yönelik uygulanması ve kesme dayanımı yetersiz elemanlarda elde edilen katkının değerlendirecek şekilde gruplandırılarak, incelenmiştir.

5.1 UYPB'nin Eğilme Dayanımına Katkısının İncelenmesi

5.1.1 Dayanım ve Davranış

Dayanım, güçlendirme yöntemi ile elde edilen katkının değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir parametredir. Çalışmada deney elemanlarının eğilme dayanımını artırmaya yönelik farklı uygulamalar değerlendirilmiştir. Değişkenlerin eğilme dayanımına etkilerini ortaya koyabilmek için yük deplasman eğrileri kullanılmıştır. Elemanlar çalışmanın deneysel değişkenleri dikkate alınarak gruplandırılmış ve değerlendirilmiştir. Ayrıca deney elemanlarının maksimum yük düzeyindeki deplasman değerleri de karşılaştırılmıştır.

Eğilme dayanımı dışarıdan uygulanan UYPB lamineler ile artırılan elemanlarda referans elemanına göre 1,21-2,18 kat aralığında değişen oranlarda artış sağlanmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda en küçük eğilme dayanımı Deney Eleman-2'de, en büyük eğilme dayanımı ise Deney Elemanı-5'de elde edilmiştir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde, deney elemanlarında farklı göçme şekilleri gözlenmiş olup, deney elemanlarının göçme şekilleri ve göçme nedenleri aşağıda özetlenmiştir.

Deney Elemanı-2 ve Deney Elemanı-4’da UYPB lamine betonarme kirişlere epoksi yardımıyla yapıştırılmıştır. Uygulanan UYPB laminenin erken yük seviyesinde bir ve birden fazla parçaya kırılmasından sonra deney elemanları eğilme kapasitelerine ulaşmışlardır. Deney Elemanı-2 ve 6’nın eğilme dayanımında, referans elemana göre sırasıyla 1,21 ve 1,57 kat artış sağlanmıştır.

UYPB laminelerin erken yük seviyelerinde kırılmasıyla UYPB lamine uygulamasıyla beklenen artış elde edilememiştir. Bu nedenle UYPB laminelerin içerisine boyuna donatı yerleştirmesi kararlaştırılmıştır. Buradaki amaç boyuna donatı eklenmesiyle UYPB’nin erken yük seviyesinde lokalize olan çatlak nedeniyle kırılmasını engellemektir. Böylece eğilme kapasitesinde daha belirgin artış sağlanabileceği düşünülmüştür. UYPB lamine içerisine farklı pas payı oranları dikkate alınarak döküm ve deneyler gerçekleştirilmiştir. UYPB’nin sahip olduğu yüksek aderans nedeniyle pas payı değişiminin önemli bir fark yaratmadığı görülmüş, d yüksekliğini daha efektif kullanacak, 10 mm’lik beton örtüsü dikkate alınarak boyuna donatılar yerleştirilmiştir. Boyuna donatı olarak eğilme donatısı olarak kullanılmayacak Ø8 çapına 460 MPa akma, 570 MPa çekme ve 205 GPa elastisite modülüne sahip 3 adet donatı UYPB lamine içerisine yerleştirilmiştir. Deney Elemanı-3 içerisine boyuna donatı yerleştirilen UYPB lamineler ile test edilen ilk deney elemanıdır.

Deney Elemanı-3 ve Deney Elemanı-5 eğilme dayanımını artırmak için UYPB laminenin içerisine boyuna donatı yerleştirilmiş ve UYPB lamineler kirişlere epoksi yardımıyla yapıştırılmıştır. UYPB lamine kırılmadığı için eğilme dayanımına katkısı önceki elemanlara göre artmıştır. Ancak UYPB laminenin uç bölgelerinde yığılan gerilmenin betonun ya da epoksinin kayma dayanımını aşması, UYPB laminenin beton yüzeyinden ayrılmasına neden olmuştur. UYPB laminenin beton yüzeyinden ayrılmasından sonra deney elemanı ani olarak göçmüştür. Deney elemanlarının eğilme dayanımında, referans deney elemanına göre 2,18 ve 2,16 kat artış sağlanmıştır.

Lamine kullanılarak eğilme dayanımı artırılan elemanların grafikleri Şekil 5.1’de sunulmuştur. Grafikte, 30 mm kalınlığa sahip lamine ile güçlendirilen elemanlar

kırmızı, 50 mm kalınlığa sahip lamine ile güçlendirilen elemanlar ise grinin farklı tonları ile çizilmiştir.

Güçlendirilen deney elemanlarının eğilme dayanımlarının, referans deney elemanının dayanımına oranlanmasıyla elde edilen tablo, Tablo 5.1’de verilmiştir. Tablo 5.2’de ise deney elemanlarının genel davranışları özetlenmiştir.

Tablo 5.1 Maksimum kuvvet değerleri

Deney Elemanı No	Tu(kN)	$T_u(n) / T_u(1)$
1 (Referans)	43,21	1,00
2	52,34	1,21
3	94,27	2,18
4	67,97 ^a	1,57
5	93,26	2,16

Not: 1 $T_u(n)$ = n numaralı deney elemanının maksimum yük değeri

Tablo 5.2 Deney sonuçlarının özeti

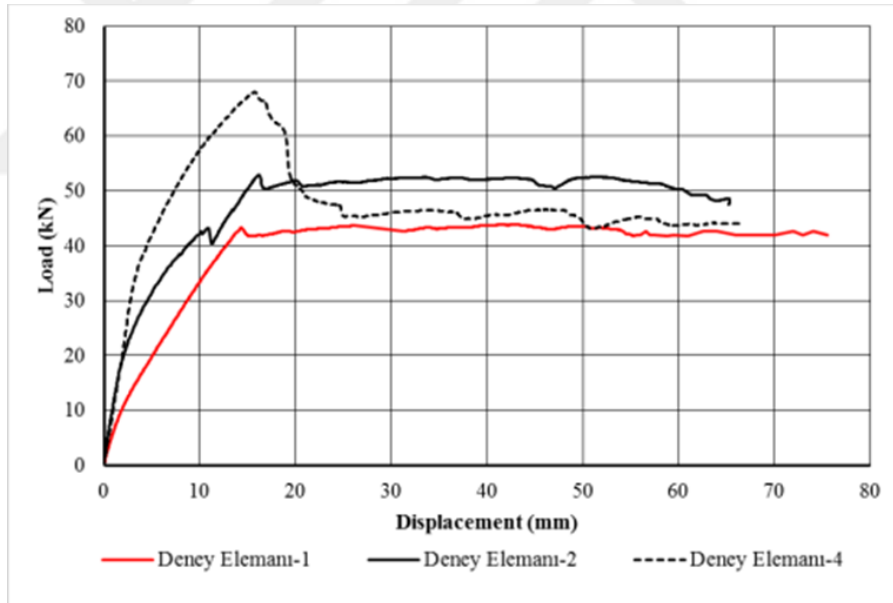
Deney Elemanı	İlk Çatlak		Dayanım		Kırılma		Deplasman Sünekliği
	$F_{cr}(kN)$	$\delta_{cr}(mm)$	$F_u(kN)$	$\delta_u(mm)$	$F_f(kN)$	$\delta_f(mm)$	δ_u / δ_{cr}
Deney Elemanı-1	10,52	1,98	43,21	14,31	41,96	5,53	5,28
Deney Elemanı-2	23,05	2,74	52,34	16,38	48,52 ^a	65,22	4,00
Deney Elemanı-3	41,32	8,97	94,27	24,66	94,27	24,66	-
Deney Elemanı-4	37,12	3,91	67,97 ^a	15,81	43,98	66,45	2,68
Deney Elemanı-5	47,22	5,89	93,26	15,78	93,26	15,78	-

Deney elemanları, deneysel çalışmanın değişkenleri olarak belirlenen UYPB laminelerin kalınlık değişimi, UYPB laminelerin uygulama şekli ve UYPB laminelerin içerisine boyuna donatı yerleştirilmesini destekleyecek şekilde gruplandırılmış, değişkenlerin dayanım ve davranışa katkıları aşağıda incelenmiştir.

UYPB laminelerde kalınlık değişimi deneysel çalışmanın değişkenlerinden biri UYPB laminenin farklı kalınlıkta uygulanmasıdır. Bu bağlamda eğilme dayanımı

yetersiz elemanlara UYPB lamineler 30 mm ve 50 mm kalınlıkta uygulanmıştır. Lamine kalınlıkındaki bu değişimin çalışmanın diğer değişkenlerinden de etkileneceği açıktır. Bu nedenle farklı kalınlıkta epoksi ile yapıştırılan, , farklı kalınlıkta içerisinde donatı olmasına rağmen yapıştırılan ile kiriş gövdesine bağlanan deney elemanları kendi aralarında gruplandırılarak değerlendirilmiştir.

Deney Elemanı-2 ve Deney Elemanı-4'nın eğilme dayanımları, farklı kalınlıkta laminelerin kirişlerin eğilme bölgesine yapıştırılmasıyla artırılmıştır. 30 mm lamine ile güçlendirilen 2 no'lu deney elemanı 52,34 kN dayanıma sahip olup bu değer Deney Elemanı-4'dan %30 oranında azdır. Göçme noktasına kadar sırasıyla 65,22 ve 66,45 mm deplasman gerçekleştiren deney elemanlarında, referans elemanına göre sırasıyla 1,21 ve 1,57 kat dayanım artışı sağlanmıştır (şekil 5.1). Her iki deney elemanında da UYPB lamine kırıldıktan sonra eğilme kapasitesine katkı sağlayamamış ve akabinde boyuna donatılar akma dayanımlarına ulaşmışlardır.

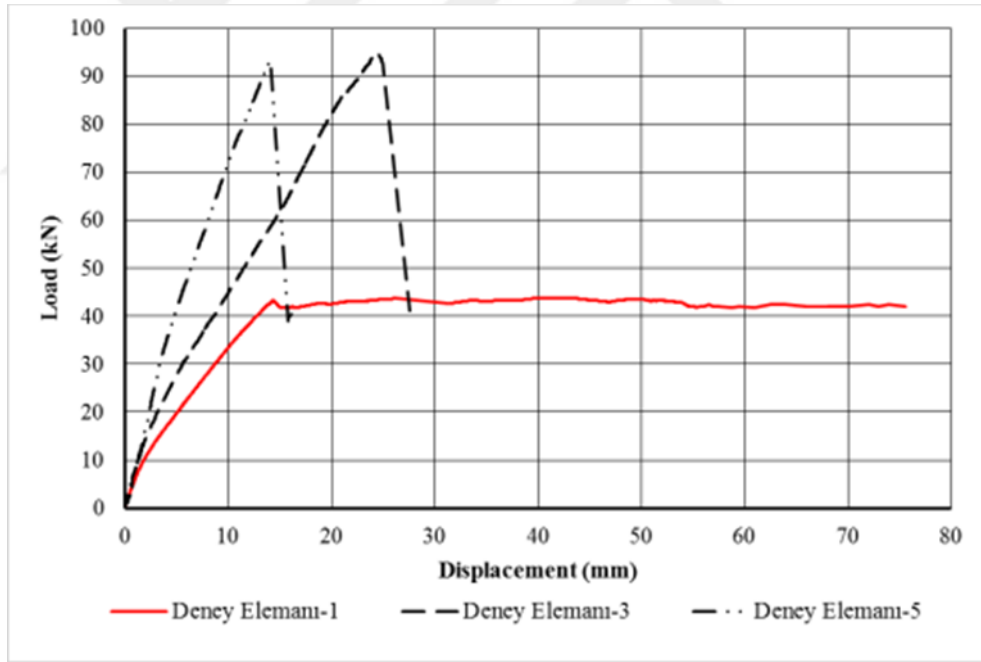


şekil 5.1 Deney elemanlarında kalınlık değişimi etkisi-1

İçerisinde boyuna donatı bulunmayan UYPB laminelerin erken yk seviyesinde bir ya da daha fazla noktada lokalize olan çatlaklar nedeniyle kırılması, güçlendirilen elemanların dayanım ve davranışlarını olumsuz etkilemiştir. Bu nedenle UYPB laminelerin içerisine laminelerin boy doğrultusunda donatılar yerleştirilmiştir.

İçerisinde donatı yerleştirildikten sonra UYPB'nin kalınlığının değişimiyle elde edilen katkı aşağıda sunulmuştur.

Deney Elemanı-3 ve Deney Elemanı-5 farklı kalınlıkta içerisinde boyuna donatı bulunan laminelerin kirişlerin eğilme bölgesine yapıştırılmasıyla güçlendirilmiştir. 30 mm lamine ile güçlendirilen 4 no'lu deney elemanı 94,27 kN yük seviyesinde, 50 mm lamine ile güçlendirilen Deney Elemanı-5 ise 93,26 kN yük seviyesinde UYPB laminenin uç bölgesinden beton yüzeyinden ayrılmasıyla ani olarak göçmüştür. Deney elemanları göçme noktasına kadar sırasıyla 24,66 ve 15,78 mm deplasman gerçekleştirmiştir (Şekil 5.2). UYPB laminenin kalınlığının artırılmasıyla dayanım ve davranış açısından önemli bir değişiklik olmamasına rağmen elemanın deplasman yapma kapasitesi yaklaşık %56 oranında azalmıştır. Bu azalmaya eğilme bölgesine yapıştırılan UYPB laminenin kalınlığının artmasıyla daha rijit bir levha gibi davranarak kirişin deplasman yapmasını engellemesinin neden olduğu açıktır.



Şekil 5.2 Deney elemanlarında kalınlık değişimi etkisi-3

Sonuç olarak, UYPB kalınlığının 30 mm'den 50 mm'ye çıkartılmasıyla uygulandığı elemanın kesit yüksekliğini doğrudan artırılacağı göz önünde bulundurulduğunda dayanımda bir miktar artış beklenmesi normaldir. İçerisinde donatı bulunmayan UYPB'lerde kalınlığın artmasıyla epoksi ile yapıştırılan

uygulamada %22 elde edilmiştir. UYPB laminenin kalınlığının artması laminenin kırılmasını geciktirmekte, böylece UYPB elemana daha fazla katkı sağlayarak dayanımının artmasını sağlamaktadır. UYPB'nin içerisinde boyuna donatı bulunması durumunda ise UYPB lamineler erken yük seviyesinde kırılmamakta buna bağlı olarak kirişlerin kırılma mekanizmaları değişmektedir. Farklı kalınlıkta UYPB lamine uygulanması dayanım açısından önemli bir farklılığa neden olmamaktadır. Ancak UYPB plağın kalınlığının artması plakları rijitleştirmektedir. Böylece lamineler uygulandığı elemanın deplasman kapasitesini kısmen kısıtlamakta ve buna bağlı olarak elemanın dayanım ve davranışı bir miktar gerilemektedir.

5.1.2 Enerji Tüketimi

Enerji tüketimi, deney elemanlarına uygulanan yük sonucunda çizilen-deplasman grafiklerinde oluşan kapalı alanın hesaplanmasıyla elde edilmiştir. Deney elemanlarının enerji tüketimleri göçmede hesaplanmıştır (Tablo 5.3).

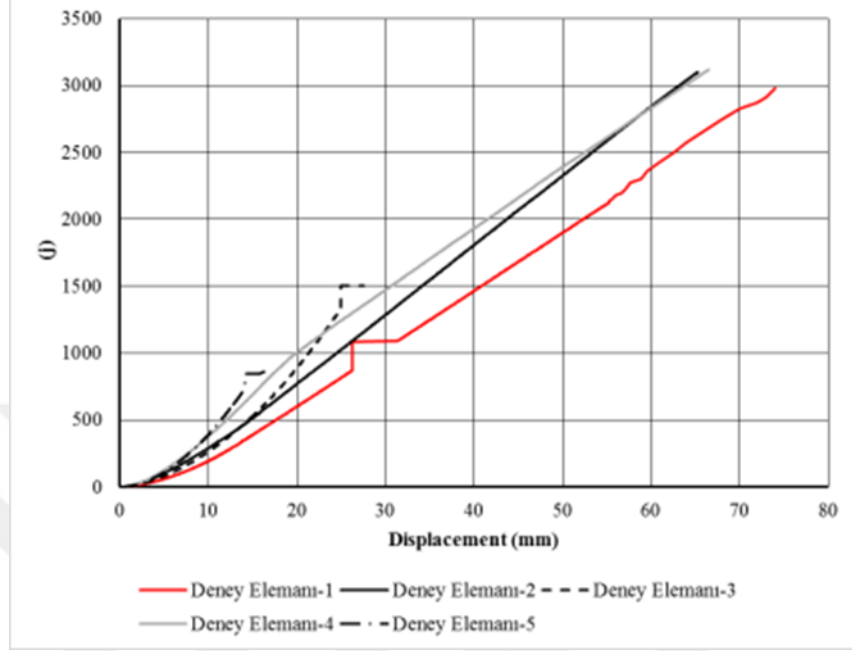
Tablo 5.3 Deney elemanlarının birikimli enerji tüketim değerleri.

Deney Eleman No	Kümülatif Enerji Tüketimi (kNmm)	$\frac{E_{(n)}^1}{E_1}$
1	2642,91	1,00
2	3098,82	1,17
3	1505,11	0,57
4	2816,94	1,07
5	895,72	0,34

Not: 1 $E(n) = n$ numaralı deney elemanının enerji tüketimi

Deney elemanlarının enerji tüketimlerinin karşılaştırılması için birikimli enerji tüketim grafikleri oluşturulmuştur. Grafiklerde düşey ekseninde birikimli enerji tüketimleri, yatay ekseninde elemanların deplasmanları verilmiştir. Deney elemanlarının birikimli enerji tüketim grafikleri Şekil 5.3'de sunulmuştur.

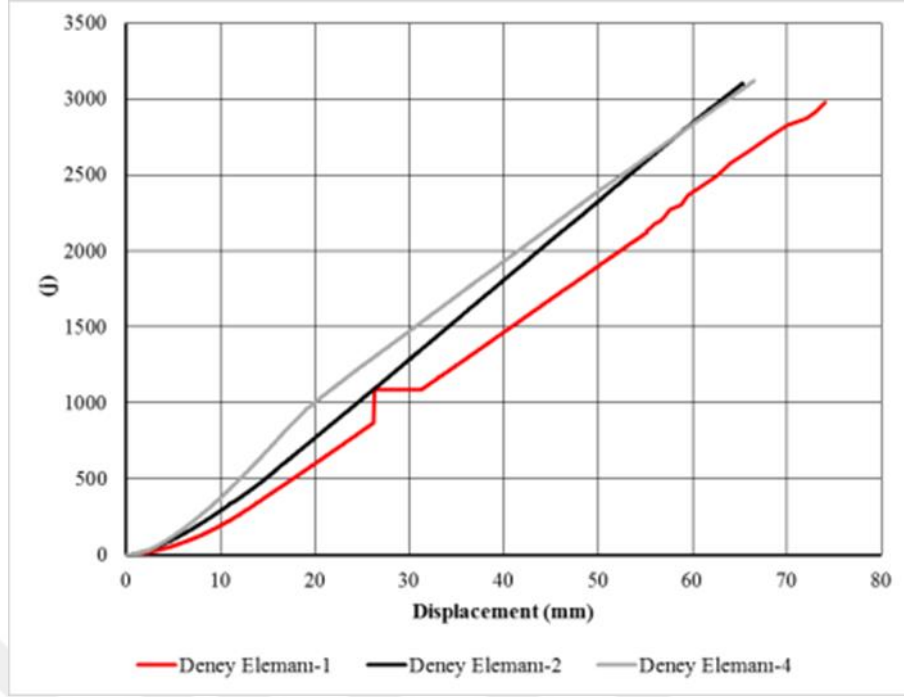
Deney programında en az enerjiyi Deney Elemanı-5 tüketmiştir. Deney elemanı eğilme kapasitesinin %66 altında UYPB laminenin beton yüzeyinden ayrılmasıyla ani olarak 895,72 kNmm enerji tüketerek göçmüştür.



Şekil 5.3 Deney elemanları birikimli enerji tüketim grafikleri

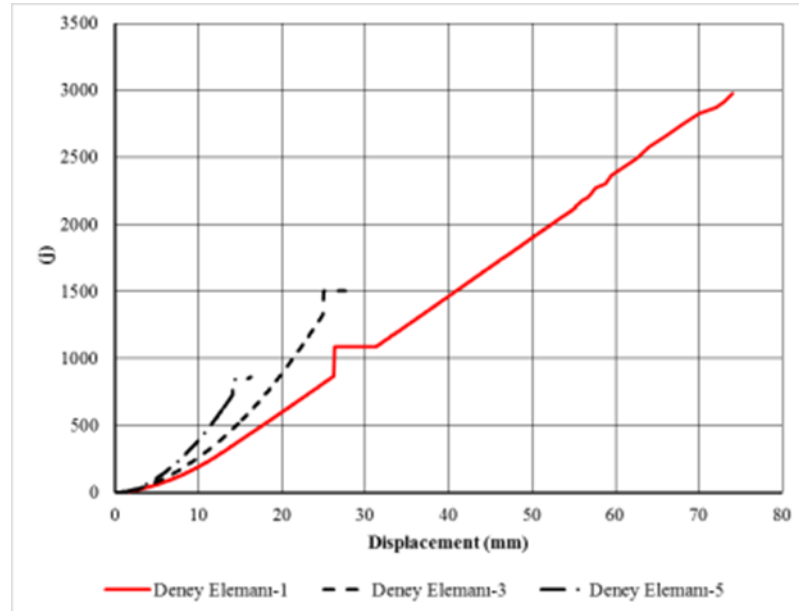
UYPB laminelerde kalınlık değişimi eğilme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin eğilme kapasitelerini artırmak için uygulanan UYPB laminelerin iki farklı kalınlığı bulunmaktadır. UYPB kalınlık değişiminin enerji tüketimine etkisi aşağıda değerlendirilmiştir.

Deney Elemanı-2 ve Deney Elemanı-4, referans elemanına göre sırasıyla 1,17 ve 1,07 kat fazla enerji tüketmiştir. 30 mm kalınlığa sahip UYPB lamine ile eğilme dayanımı artırılan Deney Eleman-2, enerji tüketimi 2816,94 kNmm olan Deney Eleman-4'dan %10 oranında fazla enerji tüketmiştir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 Deney Elemanı-2 ve 4'nin enerji tüketim eğrileri (UYPB kalınlık değişimi)

İçerisinde boyuna donatı bulunan UYPB laminelerin kiriş gövdesine epoksi ile bağlandığı Deney Elemanı-3 ve Deney Elemanı-5'da gevrek kırılma meydana gelmiştir. Deney elemanları referans elemanından sırasıyla %76 ve %195 daha az enerji tüketmişlerdir (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 Deney Elemanı-3 ve 5'in enerji tüketim eğrileri (UYPB kalınlık değişimi).

UYPB kalınlığının artmasıyla dayanımı artan deney elemanlarında bu artışa paralel bir enerji yutma kapasitesi artışı gözlenmemiştir. UYPB laminelerin kalınlığının artmasıyla uygulanan UYPB laminelerin rijitliği artmaktadır. UYPB laminelerin rijitliklerinin artmasıyla elemanların deplasman yapma kapasiteleri azalmaktadır. Buda elemanların enerji yutma kapasitelerini azaltmaktadır.

5.1.3 Rijitlik

Deney elemanlarının rijitlikleri yük-deplasman grafikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Rijitlik, belirlenen yük düzeyinin grafiğin orijinine birleştirilmesi ile elde edilen doğrunun eğimidir. Rijitlikler başlangıç ve akma düzeyinde hesaplanmıştır. Başlangıç rijitliği, deney elemanının testinde ilk eğilme çatlağının oluştuğu yük düzeyi için hesaplanmıştır. Deney elemanlarında boyuna donatının akması durumundaki rijitlikleri de hesaplanmıştır. Akma gerçekleşinceye kadar elemanın göstermiş olduğu rijitlik güçlendirme yönteminin rijitliğe sağladığı katkıyı belirleyecek olması nedeniyle önemlidir. Tablo 5.4’de deney elemanlarının başlangıç ve akma rijitlikleri verilmiştir.

Tablo 5.4 Deney Elemanlarının Rijitlik Değerleri.

Deney Eleman No:	Başlangıç Rijitliği (kN/mm)	Akma Rijitliği	(K _n ¹ /K ₁) Oranı	
			Başlangıç	Akma
1	5,31	3,02	-	-
2	8,41	3,23	1,58	1,07
3	4,61	-	0,87	-
4	9,49	1,86	1,79	0,62
5	8,02	-	1,51	-

Not: 1 K_n = n numaralı deney elemanının rijitliği

UYPB ile eğilme dayanımı artırılan elemanlardan Deney Elemanı-3 hariç hepsinin başlangıç rijitliği artmıştır. Deney Elemanı-3’ün başlangıç rijitliği 4,61 kN/mm’dir. Diğer elemanlar içerisinde en küçük başlangıç rijitliğine Deney Elemanı-3 sahiptir.

Deney programındaki en büyük akma rijitliğine Deney Elemanı-2 sahiptir. Deney Elemanı-4’da ise boyuna donatılar akma dayanımına ulaşınca kadar irili ufaklı çok sayıda çatlak gelişmiş böylece bu elemanların akma rijitlikleri referans elemana göre ortalama %40 seviyesinde azalmıştır.

UYPB kalınlık değişiminin rijitliğe olan katkısını incelemek için Deney Elemanı-2, Deney Elemanı-4 ile; ve son olarak Deney Elemanı-3, Deney Elemanı-5 ile karşılaştırılmıştır. Deney Elemanı-5’in başlangıç rijitliği Deney Elemanı-3’e göre %64 oranında artmıştır. Bu elemanlar ani olarak göçtükleri için akma rijitlikleri oluşmamıştır.

Görüldüğü gibi rijitlik doğrudan UYPB kalınlığına bağlı olarak belirgin bir değişim göstermemektedir. Lamine içerisinde donatı bulunması da elemanın rijitlik davranışını etkilemektedir. Yapıştırmada lamine kalınlığı arttıkça kiriş daha rijit bir levha ile uyumlu deplasman yapmaya çalışmaktadır. Daha rijit levha kirişin deplasman yapmasını engellediği için başlangıç rijitliği önemli oranda artmaktadır (%64). Lamine kalınlığı azaldığında ise birbirlerine yakın başlangıç değerleri elde edilmekte ancak daha ince UYPB uygulanmasıyla eleman bir miktar gelişmiş başlangıç rijitliğine sahip olmaktadır (%13). epoksi ile yapıştırmada da daha ince UYPB kiriş geometrisi ile daha uyumlu davrandığı için başlangıç rijitliğini bir miktar geliştirdiği düşünülmektedir (%15 oranında).

Boyuna donatı akma dayanımına ulaşınca kadar oluşan çatlak sayısı veya genişliği arttıkça elemanın akma rijitliği düşmektedir. Akma gerçekleşinceye kadar elemanların rijitlik kaybını belirlemek için başlangıç rijitliği ile akma rijitliği arasında ki farka bakılabilir. Ancak burada elemanların akma rijitlikleri birbirleriyle karşılaştırılarak yorumlanacaktır. Görüldüğü üzere lamine kalınlığı arttıkça elemanların dayanımı artmakta, dayanımları arttığı için kiriş gövdesinde akma gerçekleşinceye kadar daha fazla çatlak gelişmektedir. Bu nedenle bu elemanların akma rijitlikleri düşmektedir.

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada, lamine ve taze halde Ultra yüksek performanslı lif takviyeli beton (UYLTB) uygulamalarının avantajları, dayanım ve davranıştaki sağladığı katkı mekanik deneylerle ortaya konulmuştur. Deneysel çalışmada eğilme yetersizliğine sahip elemanlar test edilmiştir. Öncelikle deney numunesi hiçbir güçlendirme uygulanmadan referans numunesi olarak test edilmiştir. 6 adet numune ise farklı düzende uygulanan UYPB lamine ve taze halde dökülen UYPB kullanılarak eğilmeye karşı güçlendirilmiştir. Test sonuçlarına göre farklı düzende uygulanan UYPB'nin deney elemanlarının eğilme dayanımlarına sağladıkları katkı değerlendirilmiştir. Deney elemanlarının göçme mekanizmaları ve kompozit elemanların birleşim ara yüzündeki etkileşimleri, gerinim pulları ile araştırılmıştır.

1) Lif hacminin %2'nin üzerine çıkması durumunda işlenebilirlik önemli oranda azalmaktadır. Narinlik arttıkça liflerin işlenebilirlik azaltıcı etkisi belirginleşmektedir. %3'den yüksek lif dozajlarında kalıp yüzeyinde gözeneklilik artmakta, perdahlanabilirlik güçleşmektedir.

2) Söz konusu karışımlar ile standart su kürü ve kısa süreli (12 saat) buhar kürü altında 200 MPa'dan yüksek basınç dayanımlarına ulaşmak mümkündür. 200 MPa basınç dayanımına erişebilmek için %3 ve üzeri lif kullanımı gerekmektedir. Lif narinliği arttıkça basınç dayanımı artmaktadır. Basınç dayanımları buhar kürü ile geliştirilebilirken, lif hacmi kür türünden daha baskın bir etkiye sahiptir.

3) Lifsiz karışımın gevrek karakteri lif kullanımı ile tamamen değişmiş ve tüm lif dozajlarında belirgin deformasyon sertleşmesi davranışı elde edilmiştir. 15 - 16 MPa mertebesindeki lifsiz yalın matris eğilme dayanımı %3 ve üzeri lif dozajlarında tüm kür türleri için 40 MPa'yı aşmaktadır. Deformasyon sertleşmesi davranışı açısından narinliği yüksek 13 mm uzunluklu lif kullanımı hibrit kullanımdan daha verimlidir. Standart su kürü uygulaması ile de hedeflenen 200 MPa ve üzeri basınç, 40 MPa ve üzeri eğilme dayanımlarına ulaşılabilir.

4) Lif kullanımı ile yalın matrisin tokluğu 70 ila 300 kat arttırılabilmektedir. Su ve buhar kürleri beraber değerlendirildiğinde özellikle %3 lif hacmine kadar tokluk belirgin derecede artmaktadır. Buhar kürünün özellikle %3 ve %4 lif oranı ve 13 mm uzunluklu mikro lif kullanımı durumunda tokluğu geliştirdiği görülmektedir.

5) Kısa (6mm) ve uzun (13 mm) lifin hibrit kullanımı maliyet düşünüldüğünde sadece 13 mm lif kullanımına göre daha düşük bir performans sergilemektedir. Standart su kürü ile 200 MPa basınç dayanımı ve 40 MPa eğilme dayanımı hedeflerinin yakalanabildiği, perdahlanabilirliğin mümkün olduğu, mekanik özelliklerin önemli derecede geliştirilebildiği %3 hacminde 13 mm lif kullanımı çalışmanın devamı için seçilmiştir.

6) Kalınlığa bağlı olarak laminelerin yük taşıma kapasiteleri ve aynı zamanda davranışları değişmektedir.

7) UYPB kalınlığının 30 mm'den 50 mm'ye çıkartılan içerisinde boyuna donatı bulunmayan UYPB'lerde kalınlığın artmasıyla epoksi ile yapıştırılan uygulamada %22, oranında bir dayanım artışı elde edilmiştir. UYPB laminenin kalınlığının artması laminenin kırılmasını geciktirmekte, böylece UYPB elemana daha fazla katkı sağlayarak dayanımının artmasını sağlamaktadır.

8) UYPB plak kalınlığının artması plakları rijitleşmektedir. Böylece lamineler uygulandığı elemanın deplasman kapasitesini kısmen kısıtlamakta ve buna bağlı olarak elemanın dayanım ve davranışı ince plak ile güçlendirilen elemanlara göre bir miktar gerilemektedir.

9) Laminenin içerisine boyuna donatı eklenmesi davranışı olumlu etkilemiştir epoksi ile yapıştırılan elemanlarda lamine kiriş gövdesinden ayrılmış ve akabinde göçme gerçekleşmiştir. Bu nedenle UYPB uygulanarak eğilme dayanımı arttırılacak elemanlar da laminelerin mekanik ankraj ile uygulanması önerilmektedir.

10) İçerisinde boyuna donatı bulunmayan laminenin erken yük seviyelerinde kırılması lamineden maksimum oranda katkı sağlanmasını engellemiştir. Bu durumu engellemek için laminenin içerisine boyun donatı yerleştirilmiştir. UYPB'nin içerisine boyuna donatı yerleştirildikten sonra gerçekleştirilen deneylerde dayanım açısından %55 ile %95 arasında değişen oranlarda dayanım artışı elde edilmiştir.

11) Deney programında en az enerjiyi Deney Elemanı-5 tüketmiştir. Deney elemanı eğilme kapasitesinin %66 altında UYPB laminenin beton yüzeyinden ayrılmasıyla ani olarak 895,72 kNmm enerji tüketerek göçmüştür.

12) UYPB ile eğilme dayanımı artırılan elemanlardan Deney Elemanı-4 hariç hepsinin başlangıç rijitliği artmıştır. Deney Elemanı-4'ün başlangıç rijitliği 4,61 kN/mm'dir.

13) UYPB laminelerin içerisinde boyuna donatı olması birim deformasyon davranışını da doğrudan etkilemiştir. Laminenin erken yük seviyesinde kırılmasıyla lamine kirişlerin eğilme kapasitesine yeteri kadar katkı sağlayamadığı birim deformasyon ölçümlerinden görülmektedir. Laminenin içerisine boyuna donatının yerleştirilmesiyle, laminenin erken yük seviyesinde kırılması engellenmiştir.

KAYNAKLAR

- Ambily, P. S., Umarani, C., Ravisankar, K., Prem, P. R., Bharatkumar, B. H., & Iyer, N. R. (2015). Studies on ultra high performance concrete incorporating copper slag as fine aggregate. *Construction and building materials*, 77, 233-240.
- ASTM E 1316, 2002, Standard Terminology for NDT.
- Aydın, S. Yazıcı, H. Yardımcı, M. Y. ve Yiğiter H. (2010). Effect of aggregate type on the mechanical properties of RPC. *ACI Materials Journal*, 441-449.
- Beglarigale A, Yazıcı H. (2015) Çimento Esaslı Kompozitlerde Lif-matris Aderansına Kür Koşullarının Etkisinin *İncelenmesiulusal beton kongresi Antalya*.
- Belarbi, A., Bae, S. W., & Brancaccio, A. (2012). Behavior of full-scale RC T-beams strengthened in shear with externally bonded FRP sheets. *Construction and Building Materials*, 32, 27-40.
- Charron, J. P., Denarié, E., & Brühwiler, E. (2008). Transport properties of water and glycol in an ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under high tensile deformation. *Cement and Concrete Research*, 38(5), 689-698..
- Collepari, S. Coppola, L. Troli, R. ve Collepari, M. (1997). Mechanical properties of modified reactive powder concrete. Fifth *CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and other Chemical Admixtures in Concrete*, 1-21. Rome, Italy.
- Çağlar Y. Halit Y, (2013). Akışkanlaştırıcı Dozajının Ve Ortam Sıcaklığının Ultra Yüksek Performanslıbetonun Erken Yaş Otojen Deformasyonuna Ve Mukavemet Gelişimine Etkisi *Yapıda Kimyasal Katkılar 4.Sempozyum Ve Sergisi*

- Çağlar Y. Jędrzej S. Ahsanollah B. Orkut S. Halit Y (2014). Abrasion resistance of reactive powder concrete: *the influence of water-to-cement ratio and steel micro-fibers* 10.5185.1021
- Daniel de L,Araújo, F,a Gabrielle T, Nunes, Romildo D, Toledo F ,(2014)Alexandre Souza de Andrade, Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams, *Maringá*, 389-397,
- Ferrari, V. J., de Hanai, J. B., & de Souza, R. A. (2013). Flexural strengthening of reinforcement concrete beams using high performance fiber reinforcement cement-based composite (HPFRCC) and carbon fiber reinforced polymers (CFRP). *Construction and Building Materials*, 48, 485-498.
- Hussein, M., Kunieda, M., & Nakamura, H. (2012). Strength and ductility of RC beams strengthened with steel-reinforced strain hardening *cementitious composites*. *Cement and Concrete Composites*, 34(9), 1061-1066.
- Iskhakov, I., Ribakov, Y., Holschemacher, K., & Mueller, T. (2013). High performance repairing of reinforced concrete structures. *Materials & Design*, 44, 216-222.
- Julio, E. N., Branco, F. A., & Silva, V. D. (2004). Concrete-to-concrete bond strength. Influence of the roughness of the substrate surface. *Construction and Building materials*, 18(9), 675-681.
- Li, V. C., Wu, H. C., Maalej, M., Mishra, D. K., & Hashida, T. (1996). Tensile behavior of cement-based composites with random discontinuous steel fibers. *Journal of the American Ceramic Society*, 79(1), 74-78.

- Li, W., Huang, Z., Cao, F., Sun, Z., & Shah, S. P. (2015). Effects of nano-silica and nano-limestone on flowability and mechanical properties of ultra-high-performance concrete matrix. *Construction and Building Materials*, 95, 366-374.
- Martinola, G., Meda, A., Plizzari, G. A., & Rinaldi, Z. (2010). Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 32(9), 731-739
- Rong, Z., Sun, W., Xiao, H., & Jiang, G. (2015). Effects of nano-SiO₂ particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 56, 25-31.
- Ruano, G., Isla, F., Pedraza, R. I., Sfer, D., & Luccioni, B. (2014). Shear retrofitting of reinforced concrete beams with steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 54, 646-658.
- Santos, D. S., Santos, P. M., & Dias-da-Costa, D. (2012). Effect of surface preparation and bonding agent on the concrete-to-concrete interface strength. *Construction and Building Materials*, 37, 102-110.
- Santos, P. M., & Júlio, E. N. (2013). A state-of-the-art review on roughness quantification methods for concrete surfaces. *Construction and Building Materials*, 38, 912-923.
- Shi, C., Wang, D., Wu, L., & Wu, Z. (2015). The hydration and microstructure of ultra high-strength concrete with cement–silica fume–slag binder. *Cement and Concrete Composites*, 61, 44-52.

- Vaitkevičius, V., Šerelis, E. ve Hilbig, H. (2014). The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete. *Constrution and Building Materials*, 68, 102-109.
- Wuest, J. (2006). Structural behaviour of reinforced concrete elements improved by layers of ultra high performance reinforced concrete *6th International PhD Symposium in Civil Engineering Zurich, August 1-8*
- Yang, J. Peng, G. F., Gao, Y. X. ve Zhang, H. (2014). Mechanical properties and durability of ultra-high performance concrete incorporating coarse aggregate. *Key Engineering Materials*, 629-630, 96-103.
- Yazıcı, H. (2007). The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures. *Building and environment*, 42(5), 2083-2089.
- Yazıcı, H., Yiğiter, H., Karabulut, A. Ş., & Baradan, B. (2008). Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete. *Fuel*, 87(12), 2401-2407.
- Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., Aydın, S., & Karabulut, A. Ş. (2009). Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes. *Construction and Building Materials*, 23(3), 1223-1231.
- Yu, R., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2015). Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses. *Cement and Concrete Composites*, 55, 383-394.
- Yu, R., Tang, P., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2014). A study of multiple effects of nano-silica and hybrid fibres on the properties of Ultra-High Performance Fibre

Reinforced Concrete (UHPFRC) incorporating waste bottom ash (WBA). *Construction and Building Materials*, 60, 98-110.

Zhao, S., Fan, J., & Sun, W. (2014). Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 50, 540-548.

