

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETON
UYGULAMASININ BETONARME KİRİŞLERİN
EĞİLME DAVRANIŞINA KATKISININ
İNCELENMESİ

Esra Gökçe SAĞIR

Ekim, 2019

İZMİR

ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETON UYGULAMASININ BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞINA KATKISININ İNCELENMESİ

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı**

Esra Gökçe SAĞIR

**Ekim, 2019
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ESRA GÖKÇE ŞAĞIR, tarafından PROF.DR. HASAN MURAT TANARSLAN yönetiminde hazırlanan “ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETON UYGULAMASININ BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞINA KATKISININ İNCELENMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



Prof.Dr. Hasan Murat TANARSLAN

Yönetici



Doç.Dr. Gökhan Şakar

Jüri Üyesi



Dr. Öğr. Üyesi Mutlu SEGER

Jüri Üyesi



Prof.Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren değerli hocam Prof.Dr. Hasan Murat TANARSLAN'a yüksek lisans çalışmamın her aşamasında verdiği desteğinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

114M257 numaralı araştırma projesi ile çalışmaya destek olan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) ve betonarme elemanların üretilmesi sürecinde sundukları destekler için Yeni Prefabrike Beton İnşaat San. ve Tic. A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca her zaman yanımda olan, benden her türlü maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen başta annem, babam ve kardeşim olmak üzere tüm aileme teşekkürlerin yeterli olmayacağını bilsem de saygı ve minnetlerimi sunarım.

Son olarakta hayatımın her alanında olduğu gibi bu çalışmada da destekleriyle yanımda olan sevgili eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Esra Gökçe SAĞIR

ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETON UYGULAMASININ BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞINA KATKISININ İNCELENMESİ

ÖZ

Bu tez çalışması kapsamında UYPB (Ultra Yüksek Performanslı Beton) plaka uygulaması ile eğilme dayanımı yetersiz betonarme kirişlerin dayanım ve davranışında elde edilecek katkı araştırılmıştır. Çalışma kapsamında değerlendirilen betonarme kirişler monotonik artan yükler altında test edilmiştir. Bu bağlamda öncelikle deneysel çalışmanın değişkenleri dikkate alınarak literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra çalışmanın deneysel değerlendirme aşamasına geçilmiştir. Bu kapsamda öncelikle çalışmada test edilecek betonarme kirişler üretilmiştir. Betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılacak UYPB plakalar üretilmiştir. Deneysel çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. Öncelikle güçlendirmede kullanılacak gerçek boyutlu UYPB plakalar tek başlarına plakaların eğilme kapasitelerinin belirlenmesi için test edilmiştir. Bu uygulama ile gerçek boyutlu plakalarda kalınlık değişimine bağlı olarak elde edilecek performans farklılığının değerlendirilmesi amaçlanmıştır. İkinci aşamada ise betonarme kiriş elemanlara farklı kalınlıklardaki UYPB plakalar uygulanmış, bu elemanların eğilme testleri yapılmıştır. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen bu deneyler Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mühendisliği Laboratuvarında yapılmıştır. Deneysel çalışmada dört adet betonarme kiriş elemanı test edilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda kirişlerin yük-deplasman ilişkileri, süneklikleri, enerji tüketimleri birbirleri ve referans elemanı ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonunda UYPB plaka uygulaması ile gerçekleştirilen güçlendirmenin, eğilme yetersizliğine sahip betonarme kirişlere dayanım ve davranış açısından sağlayacağı katkı incelenmiş ve sonuçlar ANSYS sonlu elemanlar programıyla elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Son olarak çalışma hakkında çeşitli öneriler sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Güçlendirme, betonarme kiriş, UYPB plaka, eğilme dayanımı

INVESTIGATE THE INFLUENCE OF ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE APPLICATION TO THE BENDING BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

ABSTRACT

Contribution which will be obtained from UHPC (Ultra High Performance Concrete) plate application over strength and behavior of reinforced concrete girders with deficient bending strength was researched within scope of this dissertation study. Reinforced concrete girders which were evaluated within scope of dissertation study were tested under monotonic increasing loads. With this context firstly variables of experimental study was considered and literature scanning was implemented. Then experimental evaluation stage of study was initiated. With this context firstly reinforced concrete girders to be tested were produced. Then UHPC plates which will be used for strengthening reinforced concrete girders were produced. Experimental study consists of two stages. Firstly real sized UHPC plates which will be used for reinforcing were tested for determining bending capacity of plates alone. Evaluation of performance difference to be obtained due to change in thickness was aimed in this study. UHPC plates with different thicknesses were applied to reinforced girder members in second stage and bending tests were realized for these members. These tests which were realized in laboratory environment were implemented in Dokuz Eylül University Engineering Faculty Civil Engineering Department Structural Engineering Laboratory. Four reinforced concrete girders were tested in experimental study. Load-displacement relations, ductility, energy consumptions of girders were compared with each other and with reference member as result of experimental study. Contribution of reinforcement by UHPC concretes for reinforced concrete girders with bending deficiency with respect to strength and behavior was examined and results were compared with results which were obtained by ANSYS finite elements program. Finally several recommendations about study were presented.

Keywords: Strengthening, reinforced concrete beam, UHPC plate, bending strength

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
BÖLÜM BİR - GİRİŞ.....	1
BÖLÜM İKİ - DENEY ELEMANLARI VE DENEY TEKNİĞİ	21
2.1 Genel	21
2.2 Deney Elemanları	21
2.2.1 Eğilme Dayanımı Artırılacak Deney Elemanları.....	21
2.3 Malzemeler	22
2.3.1 Donatı.....	23
2.2.2 Beton	23
2.2.3 Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB).....	24
2.2.3.1 Yaş durum performası.....	27
2.2.3.2 Mekanik performası	28
2.2.3.3 UYPB’de kullanılan lif türleri ve hiperakışkanlaştırıcı.....	29
2.2.4 SİKADUR 31 (Epoksi) Özellikleri.....	30
2.3 Deney Elemanlarının Üretilmesi	31
2.4 Plaka Üretimi	34
2.4.1 Beton mikseri	34

2.4.2 Gerçek Ölçekli Plaka Kalıpları	35
2.5 UYPB'nin Hazırlanması ve Kalıba Yerleştirilmesi	36
2.6 UYPB Plakaların Betonarme Kirişe Yapıştırılması	41
2.7 Deney Düzeneği.....	44
2.7.1 Birim Deformasyonların Hesaplanması.....	46

BÖLÜM ÜÇ - GERÇEK ÖLÇEKLİ UYPB PLAKALARIN EĞİLME DENEYLERİ 48

3.1 Giriş	48
3.2 30 mm Kalınlığa Sahip Plaka Deneyi.....	48
3.3 50 mm Kalınlığa Sahip Plaka Deneyi.....	53
3.4 70 mm Kalınlığa Sahip Plaka Deneyi.....	57

BÖLÜM DÖRT - UYPB PLAKA İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERDE EĞİLME DENEYLERİ 63

4.1 Giriş	63
4.2 Kiriş-1	63
4.3 Kiriş-2	66
4.4 Kiriş-3	71
4.5 Kiriş-4	77

BÖLÜM BEŞ - DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 81

5.1 Dayanım ve Davranış	83
5.2 Süneklik	85
5.3 Enerji Tüketimleri.....	87

5.4 Rijitlik.....	88
BÖLÜM ALTI - ANALİTİK ÇALIŞMA	91
6.1 Ansys Programında Analiz Yapılması.....	92
6.2 Analiz Sonuçları	96
6.2.1 Dayanım ve Davranış.....	102
6.2.2 Süneklik	104
6.2.3 Enerji Tüketimleri.....	105
BÖLÜM YEDİ - TARTIŞMA VE SONUÇ	107
KAYNAKLAR	111

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Nano silisin (sol) ve nano kireçtaşının (sağ) mikroskop görüntüleri.....	6
Şekil 2.1 Eğilme dayanımı yetersiz deney elemanı	22
Şekil 2.2 Çalışmada kullanılan bağlayıcı maddeler ve agregalar	27
Şekil 2.3 Çalışmada kullanılan bağlayıcı maddeler ve agregalar	28
Şekil 2.4 Lif hacmine bağlı olarak eğilme yükü - sehim eğrileri.....	29
Şekil 2.5 Çalışmada kullanılan lif türleri	30
Şekil 2.6 Çelik kalıp kesit detayı.....	31
Şekil 2.7 Donatı düzenlemesi.....	32
Şekil 2.8 Donatı kafesi	33
Şekil 2.9 Deney elemanları beton dökümü	33
Şekil 2.10 UYPB mikseri.....	35
Şekil 2.11 Plaka kalıpları	35
Şekil 2.12 Plaka kalıpları için yan yüzler.....	36
Şekil 2.13 UYPB Plaka üretimde kullanılan malzemeler	37
Şekil 2.14 UYPB karıştırma prosedürü.....	37
Şekil 2.15 Bağlayıcıların karıştırılması.....	38
Şekil 2.16 Bağlayıcılara su+akışkanlaştırıcı çözeltilisinin ilavesi	38
Şekil 2.17 Çelik mikro liflerin serpiştirilerek karışıma eklenmesi	38
Şekil 2.18 Karışım süreci tamamlanmış taze UYPB	39
Şekil 2.19 Taze UYPB'nin kalıba dökülmesi.....	40
Şekil 2.20 Taze UYPB'nin şiş ve vibrasyon ile yerleştirilmesi.....	40
Şekil 2.21 Plakaların ıslak örtü ve naylon örtülerek kür edilmesi	41
Şekil 2.22 Beton yüzeyinin temizlenmesi.....	41
Şekil 2.23 Sikadur 31 epoksi bileşenlerinin karıştırılması.....	42

Şekil 2.24 Yüzeyi temizlenmiş betonarme kiriş elemanı.....	42
Şekil 2.25 Sikadur 31 epoksinin betonarme kirişe spatula yardımıyla sürülmesi	43
Şekil 2.26 Sikadur 31 epoksinin betonarme kirişe uygulanmış hali	43
Şekil 2.27 UYPB plaka ile betonarme kirişin işkence aletiyle sabitlenmesi	44
Şekil 2.28 UYPB plaka ile betonarme kirişin üzerine yük	44
Şekil 2.29 Deney düzeneği.....	45
Şekil 2.30 Kiriş deformasyon geometrisi.....	46
Şekil 3.1 30 mm kalınlığında plaka deneyi.....	49
Şekil 3.2 Deney elemanının 30 mm deplasman hali	49
Şekil 3.3 Deney elemanının 91 mm deplasman yapmış görünümü	50
Şekil 3.4 Plakada çatlak oluşumu	51
Şekil 3.5 Yük-deplasman eğrisi	51
Şekil 3.6 30 mm kalınlığında plaka için yük-birim deformasyon eğrileri	52
Şekil 3.7 50 mm kalınlığında plaka deneyi.....	53
Şekil 3.8 40 kg yük seviyesinde plaka davranışı	54
Şekil 3.9 70 kg yük seviyesinde plaka davranışı	54
Şekil 3.10 Plakanın maksimum deplasman halinde çekilmiş fotoğrafı	55
Şekil 3.11 Yük-deplasman eğrisi	55
Şekil 3.12 50 mm kalınlığında plaka için yük-birim deformasyon eğrileri	56
Şekil 3.13 70 mm kalınlığında plaka	57
Şekil 3.14 250 kg yük seviyesinde plaka davranışı.....	58
Şekil 3.15 Plakada ilk çatlak oluşumu	58
Şekil 3.16 Plakanın maksimum deplasman halinde çekilmiş fotoğrafı	59
Şekil 3.17 Plaka alt yüzündeki çatlak	59
Şekil 3.18 Yük-deplasman eğrisi	60
Şekil 3.19 70 mm kalınlığında plaka için yük-deplasman eğrisi	60

Şekil 4.1 Referans deney elemanı	63
Şekil 4.2 İlk eğilme çatlağı	64
Şekil 4.3 Kirişte gelişen eğilme çatlakları.....	64
Şekil 4.4 Kiriş-1 çatlaklarının son hali.....	65
Şekil 4.5 Kiriş-1 Yük-Deplasman eğrisi	66
Şekil 4.6 30mm kalınlığa sahip UYPB ile güçlendirilmiş deney elemanı	66
Şekil 4.7 İlk eğilme çatlağı	67
Şekil 4.8 Kiriş-2 plakanın kirişten ayrılmış hali	67
Şekil 4.9 Kiriş-2 çatlak oluşumu.....	68
Şekil 4.10 Kiriş-2 65,22 mm deplasman yapmış hali	68
Şekil 4.11 Kiriş-2 yük-deplasman eğrisi.....	69
Şekil 4.12 Kiriş-2 sağ mesnet altı yük-gerilme eğrisi.....	70
Şekil 4.13 Kiriş-2 kiriş ortası yük-gerilme eğrisi.....	71
Şekil 4.14 Kiriş-2 sol mesnet altı yük-gerilme eğrisi.....	71
Şekil 4.15 50mm kalınlığa sahip UYPB ile güçlendirilmiş deney elemanı.....	72
Şekil 4.16 İlk eğilme çatlağı.....	72
Şekil 4.17 Kiriş-3 plakanın kirişten ayrılmış hali	73
Şekil 4.18 Kiriş-3 çatlak oluşumu.....	74
Şekil 4.19 Kiriş-3 66,45 mm deplasman yapmış hali	74
Şekil 4.20 Kiriş-3 yük-deplasman eğrisi.....	75
Şekil 4.21 Kiriş-3 sağ mesnet altı yük-gerilme eğrisi	76
Şekil 4.22 Kiriş-3 kiriş ortası yük-gerilme eğrisi.....	76
Şekil 4.23 Kiriş-3 sol mesnet altı yük-gerilme eğrisi.....	77
Şekil 4.24 70mm kalınlığa sahip UYPB ile güçlendirilmiş deney elemanı.....	77
Şekil 4.25 Kiriş-4 plakanın kirişten ayrılmış hali	78
Şekil 4.26 Kiriş-4 yük-deplasman eğrisi.....	78

Şekil 4.27 Kiriş-4 sağ mesnet altı yük-gerilme eğrisi	79
Şekil 4.28 Kiriş-4 kiriş ortası yük-gerilme eğrisi.....	80
Şekil 4.29 Kiriş-4 sol mesnet altı yük-gerilme eğrisi.....	80
Şekil 5.1 UYPB ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin yük-deplasman eğrileri	81
Şekil 5.2 UYPB kalınlıklarının yük taşıma kapasitesine etkisi	83
Şekil 5.3 UYPB kalınlıklarının akma dayanımlarının karşılaştırılması.....	84
Şekil 5.4 Akma yer değiştirmesinin belirlenmesi	85
Şekil 5.5 UYPB kalınlıklarının süneklik üzerindeki etkisinin karşılaştırılması	86
Şekil 5.6 UYPB kalınlıklarının enerji tüketimlerinin karşılaştırılması.....	87
Şekil 5.7 UYPB kalınlıklarına göre enerji-deplasman grafiği	88
Şekil 6.1 Ansys program görüntüsü	93
Şekil 6.2 Ansys Model modülü malzeme özellikleri tanımlama	94
Şekil 6.3 Ansys Model modülü mesh tanımlama	95
Şekil 6.4 Mesnetlerin ve yüklerin atanması	96
Şekil 6.5 Kiriş-1 analiz sonucu	97
Şekil 6.6 Kiriş-1 son hali.....	97
Şekil 6.7 Kiriş-1 yük-deplasman eğrileri	97
Şekil 6.8 Kiriş-2 analiz sonucu	98
Şekil 6.9 Kiriş-2 son hali.....	98
Şekil 6.10 Kiriş-2 yük-deplasman eğrileri	98
Şekil 6.11 Kiriş-3 analiz sonucu	99
Şekil 6.12 Kiriş-3 son hali.....	99
Şekil 6.13 Kiriş-3 yük-deplasman eğrileri	99
Şekil 6.14 Kiriş-4 analiz sonucu	100
Şekil 6.15 Kiriş-4 son hali.....	100
Şekil 6.16 Kiriş-4 yük-deplasman eğrileri	100

Şekil 6.17 UYPB kalınlıklarının yük taşıma kapasitesine etkisi	102
Şekil 6.18 UYPB kalınlıklarının akma dayanımlarının karşılaştırılması.....	103
Şekil 6.19 UYPB kalınlıklarının süneklik üzerindeki etkisinin karşılaştırılması	104
Şekil 6.20 UYPB kalınlıklarının enerji tüketimlerinin karşılaştırılması.....	105
Şekil 6.21 UYPB kalınlıklarına göre enerji-deplasman grafiği	106



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Donatının mekanik ve kimyasal özellikleri	23
Tablo 2.2 Kiriş imalatında kullanılan betonun karışım oranları	24
Tablo 2.3 UYPB karışım oranları	25
Tablo 2.4 Kuvars agregalarının kimyasal kompozisyonu.....	26
Tablo 2.5 Kuvars agregalarının elek analizleri	26
Tablo 2.6 Lif türleri ve bazı özellikleri	30
Tablo 2.7 Hiperakışkanlaştırıcı katkının genel özellikleri	30
Tablo 2.8 Sikadur 31'in özellikleri	31
Tablo 5.1 Kirişlerin eğilme testlerinden elde edilen karakteristik değerler	82
Tablo 5.2 Deney elemanlarının rijitlik değerleri.....	89
Tablo 6.1 Kirişlerin eğilme testlerinden elde edilen karakteristik değerler	101

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Betonarme yapıların kullanım amaçlarının farklılaşması ve yönetmeliklerin değişmesi ile yapılarda çeşitli nedenlerle ortaya çıkan yetersizlikleri gidermek için kusurlu yapıların veya yapı elemanlarının güçlendirilmesi gerekmektedir. Betonarme yapıların güçlendirilmesinde; mantolama, çelik levhaların kullanımı, ardgerme ve karbon fiber polimer (CFRP) uygulaması güçlendirmede tercih edilen yöntemlerden bazılarıdır. Ancak bu yöntemlerin; montaj zorluğu, uygulanan güçlendirme malzemelerin ağırlığı, uygulama esnasında hane halkının rahatsız edilmesi ve korozyon riski gibi sahip oldukları bazı dezavantajlar yeni güçlendirme yöntemlerinin araştırılması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Celep ve Kumbasar (2000, s. 84-87), depreme dayanıklı yapı tasarımı kavramına göre, depremin şiddetine göre belirli bir miktar hasarın meydana gelmesi normal bir durum olarak kabul edilebileceğini vurgulamışlardır. Bu kavrama göre; kolon, kiriş ve perde gibi yapı elemanları, yapının ekonomik ömrü içinde olabilecek hafif şiddetteki depremlerde ciddi hasar görmemelidir. Bu süre içinde orta şiddetteki depremlerde, taşıyıcı olan elemanlarında onarılabilir düzeyde hasar görülebileceği gibi yapının taşıyıcı olmayan bölümlerinde de hasarlar görülebilir. Yapının ekonomik ömrü içinde en çok bir kez olabilecek çok şiddetli depremde ise taşıyıcı elemanlar onarılamayacak derecede hasar görebilir. Fakat bu durumda bile can kaybı meydana getirecek yıkımlar olmamalıdır. Normal olarak depreme dayanıklı bir yapı, bu kavrama uyan bir yapı olarak kabul edilir. Yapının yönetmelik esaslarına göre yapılmaması halinde ise, hafif veya orta şiddetteki depremlerde bile yapıda ciddi hasarlar görülebilir. Tasarım ve yapım sırasında gerekli özenin gösterilmemesi, ihmaller, kusurlar depremde hasarının büyümesine neden olur.

Ülkemizde deprem hasarlarının ana sebeplerinden bazıları şu şekildedir; beton dayanımının düşük olması, yeterli etriye kullanılmayarak kesmeye karşı zayıf eleman oluşturulması, proje yetersizlikleri, yapılaşmaya uygun olmayan zemin koşulları, donatı eklerinin yeterli olmaması gibi sebeplerdir.

Celep ve Kumbasar (2000, s. 84-87), Tüm bu durumların önüne geçebilmek için; yeni yapılar, yönetmeliklerde yer alan şartlar doğrultusunda inşa edilmeli, mevcut yetersiz yapılar ise uygun teknikler kullanılarak güçlendirilmeli ya da yıkılarak yeniden inşa edilmelidir. Güçlendirmenin hedefi, yapıyı yalnızca deprem öncesindeki sahip olduğu güvenliğe ulaştırmak değildir. Amaç, yapının şiddetli yer hareketlerine karşı koyabilecek performansa ulaştırmasıdır.

Literatürde yetersizliklere sahip yapıların performanslarını geliştirmeye yönelik çeşitli güçlendirme yöntemleri bulunmaktadır. Çelik plaka uygulamaları, lifli polimerler veya beton katman ekleme bu yöntemlerden en çok tercih edilendir. Konvansiyonel yapılarda güçlendirme yöntemi olarak beton katman ekleme ya da çelik plaka uygulamaları sıklıkla tercih edilmektedir. Bu yöntemlere ek olarak lifli polimerler ile güçlendirme son zamanlarda en çok tercih edilen yöntemlerdendir. Lifli polimerler sahip oldukları uygulama avantajları ve yüksek mekanik özelliklerinden dolayı yapı elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Ancak tüm bu güçlendirme yöntemleri malzemenin ağır olması (çelik levha uygulaması), uygulama sırasında yapının boşaltılması gerekmesi, darbe etkilerine dirençsiz olunması gibi çeşitli problemlere sahip olmaktadır. Bu nedenle mevcut güçlendirme yöntemlerine alternatif olacak yeni güçlendirme yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada mevcut güçlendirme yöntemlerine alternatif olacak yenilikçi bir güçlendirme yöntemi önerilmektedir. Bu yöntemde UYPB plakalar betonarme kirişlerin eğilme bölgelerine yapıştırılmakta ve bu yöntemin eğilme dayanım ve davranışına katkısının incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu bağlamda, UYPB plakaların betonun eğilme dayanımına katkısı deneysel olarak araştırılmıştır. Eğilme yetersizliğine sahip betonarme kirişlerde kesmeden gerçekleşecek hasarları engellemek için yeterli kesme donatısı kullanılmıştır. Çalışmada öncelikle günümüze kadar bu konu ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu bağlamda uygulanacak plakaların yüksek basınç dayanımlı olarak üretebilmesi için karışımda kullanılacak katkı malzemeleri, karışım oranları ve karıştırma prosedürü araştırılmıştır. Lifli beton uygulamalarında betona eklenen lifin en/boy oranları önemli olup, uygulamada görülen çeşitli yetersizlikler incelenmiştir. Yük taşıma kapasitesinin

arttırılması ve dayanımın iyileştirilmesi için ultra yüksek performanslı betonların yapısal davranışları, bağlayıcı malzemeler, bağlanma yöntemleri ve yüzey pürüzlülüğü gibi konular detaylı bir şekilde araştırılmıştır.

Deneyisel çalışmada özdeş 4 adet dikdörtgen betonarme kiriş test edilmiştir. Özdeş üretilen elemanlara çeşitli kalınlıktaki UYPB plakalar epoksi reçinesi kullanılarak yapıştırılmış olup, bu uygulamanın betonarme kiriş elemanlarına dayanım ve davranış açısından etkileri incelenmiştir. Elde edilen deney sonuçları dayanım, davranış, rijitlik ve enerji tüketimi bakımından yorumlanmış ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca betonarme elemanların sonlu elemanlar modelleri de ANSYS programı yardımıyla çözülmüş olup, sonlu elemanlar modellerinden elde edilen sonuçlar deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. UYPB plakaların betonarme kirişlerin üzerine yapıştırılan birim deformasyon ölçerler, deney elemanlarının eğilme dayanımına katkısını değerlendirebilmek için önemli veriler sunmaktadır. Bu nedenle deney elemanlarının birim deformasyon davranışları da çalışma kapsamında gerçek boyutlu plaka testlerinde incelenmiştir.

Literatür araştırmasında öncelikle konu kapsamında kullanılacak betonarme plak 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 plaka 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.

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

Yalçinkaya ve diğer. (2016, 2017), Mikro boyutta agregaların kullanılması, tane çapı ve miktarının optimizasyonu, CaO/SiO_2 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.

Brühwiler (2013), Ultra yüksek performanslı beton (UYPB); çimento, su, süperakışkanlaştırıcı, silis dumanı ve çok ince kumdan oluşan bir karışımın sertleşmesiyle oluşan, bir matris içinde hacmen %2-%3'e varan oranda çelik tel içeren sünek bir betondur. Geleneksel betona göre eğilme yükleri altında yüksek enerji yutma kapasitesine ve dayanıma sahiptir. Bu yeni nesil çimento esaslı kompozitler; düşük geçirimsizlik, geliştirilmiş durabilite, sınırlı rötre ve korozyon dayanımının artırılması gibi diğer yüksek performans özellikleri de sağlamaktadır.

Taşdemir ve diğer. (2003/4), UYPB üretiminde, yoğun matriste, optimize edilmiş lif ve agrega fazları çok önemlidir. Bu nedenle optimize edilmesi gereken çelik lif dozajı, hem uygulama maliyeti hem de UYPB'nin mekanik performansını artırmak için anahtar parametre olarak kabul edilebilir. Yapılan araştırmalarda lif hacminin %1 ile %5 oranında değiştiği görülmektedir.

Kang ve Ryu (2011), lif hacmi %5 oranına kadar arttırıldığında basınç dayanımı, gerilme ve elastisite modülünde artış yaşanmasını sağlamıştır. Çelik liflerin artırılması ile birlikte UYPB mekanik performansının büyük ölçüde iyileşmesine rağmen

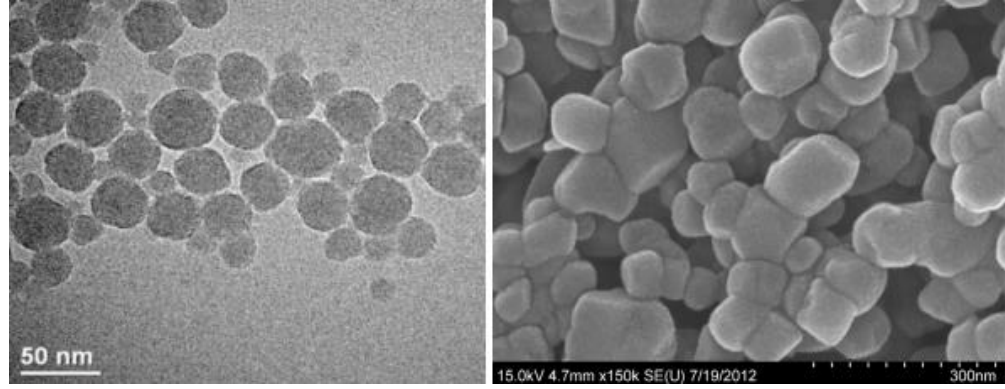
kendinden sıkıştırma ile ilgili eşik değerini karşılamak için karışıma yaklaşık %2,5 oranında çelik mikro liflerin eklenebileceği ortaya çıkarılmıştır.

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/SiO_2 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), 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 hidrasyon kinetiklerinin benzer olduğunu, yüksek fırın cürufu kullanımı sonucu uzatılmış kürlerde ise hidrasyon 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.

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 diğer. (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 kullanılabiliirliği

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.

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 buhar kürü ve uzun süreli su kürü altında mekanik özelliklerdeki olumsuzlukların azaldığı belirlenmiştir. Araştırmacılar cevher tortusu kullanımının poroziteyi arttırdığını, porozitenin basınç dayanımı ile güçlü bir ilişkiye sahip olduğunu belirlenmiştir.

Ambily ve diğer. (2015), bakır cüruflu UYPB'nin mekanik özelliklerini araştırmıştır. Araştırmacılar bakır cüruflu 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.

Tanarşlan (2017), gerçekleştirdiği çalışmada ultra yüksek performanslı fiber betonarme (UYPFB) plakalarla güçlendirilmiş olan betonarme kirişlerin davranışını incelemiştir. Ultra yüksek performanslı fiber betonarme plakalar kullanarak uygun sonuçlar almak ve saha uygulamalarında verimliliklerini artırabilmek için UYPFB plakaların levha olarak uygulanacağı kabul edilmiştir. İlave olarak betonarme kirişlerin eğilme dayanımı açısından hangi yöntemin daha verimli olduğunu belirleyebilmek için farklı şekilde uygulanan UYPFB plakalar test etmiştir. Uygun şekilde her bir uygulama yöntemi kendi faydalarına göre değerlendirilmiş ve önceki uygulamanın eksiklikleri ve olumlu halleri dikkate alınarak sonraki uygulama prosedürü belirlenmiştir. Bu göz önünde bulundurularak bir tanesi kontrol numunesi ve altı tanesi az güçlendirilmiş test numunesi olacak şekilde 7 numune 50 mm kalınlıkta UYPFB plaka ile güçlendirilmiştir. UYPFB plaka ile güçlendirilmiş numunelerde yük taşıma kapasitesinde minimum %32 ve maksimum %208 artış elde edilmiştir. Sonuç olarak UYPFB plaka kullanımı betonarme kirişlerin davranışını ve yük taşıma kapasitesini artırmak üzere etkin teknik olup hasarlı yapıları güçlendirmek için tercih edilebilir.

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

UYPB'nin yüksek performansını gözlemledikten sonra sadece mukavemeti değil aynı zamanda yüksek dayanıklılığı sayesinde modern yapıların inşaatında da yaygın kullanıma sahip olduğu anlaşılmıştır. Yapısal eleman olarak kullanımının yanında, güçlendirme veya onarım malzemesi olarak da kullanılması son zamanlarda araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Prem ve diğer (2016), UYPB plaka kullanarak betonarme kirişlerin güçlendirilmesini incelemiştir. Bu çalışmada çeşitli donatı oranlarına sahip betonarme kirişler 10, 15 ve 20 mm kalınlıkta UYPB plakalar kullanılarak güçlendirilmiştir. Araştırmacılar güçlendirilen kirişlerin eğilme yükleri altında monolitik davrandığını ve 10 mm plaka kullanımı durumunda başlangıçtaki eğilme kapasitelerini tekrar kazanabildiği göstermiştir. Herhangi bir ayrılma olmadığında kompozit kirişlerin monolitik olarak kırıldığı ve mukavemetin %30 oranında arttığı bildirilmiştir.

Li 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), 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 (2013), 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 Beton (UHPFRC) ile onarılarak yapının yetersiz bölgelerinin güçlendirilmesidir. Bu çalışmada 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 incelemişlerdir. 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 üretilecek 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. Deney 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 kullanılabileceğini 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 “kırılğan” 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.

Hassanean ve diğer. (2013), 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.

Ferrari ve diğer. (2013), 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 onarılabilecek 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 elemenda herhangi bir yüksek dayanımla 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 çelik lifler bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar SFHSC kullanılarak onarılacak normal betondan yapılmış kiriş ve döşemelerin davranışının değerlendirilmesinde öncü olacaktır.

Araujo ve diğer. (2014), gerçekleştirdiği çalışmanın detayları şu şekildedir. Betona uygun hacimde çelik lif eklenmesi, betonun gerilme mukavemetini ve sünekliliği artırmaktadır. Ancak, betona eklenen bu çelik liflerin rastgele dağılımı ve yöneliminden sonra bu malzemeden elde edilen katkının alışılmış bir takviye ile sağlanacak katkıdan fazla olmamasına neden olabilir. Dolayısıyla, liflerin kesişmesi her yönde oluşarak, elemanın çatlama mukavemetini arttırması ve buna bağlı olarak çekme dayanımını arttırması gerekmektedir. Bu nedenlerden dolayı çelik elemanlar kesme yüklerine maruz kaldıklarında önemli ölçüde beton mukavemetine katkıda bulunur. Bu çalışmanın temel amacı, %1 ve %2 oranında çelik liflerin a/d oranı 3'den küçük olan betonarme kirişlerin kesme dayanımına katkısını değerlendirmektir. Ayrıca, bu çalışmada bazı ampirik modellerin yüksek çelik lif içeriği olan betonarme kirişlerin kesme mukavemeti tahmin etmede yeterliliğinin değerlendirilmesidir. Bu bağlamda bu çalışmada; çelik 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 lif katkısını değerlendirmek için lifli beton ile üretilmiş prizmalar test edilmiştir. Çelik lifler düz, kanca uçlu, 35 mm uzunluğunda ve 65 mm uzunluğunda olacak şekilde seçilmiştir. Betona karıştırılan çelik lifler hacimsel olarak %1,0 ve %2,0 oranındadır. Deney sonuçları betonarme kirişler de çatlak genişliği azaltmak için çelik liflerin kullanımının etriye miktarını azaltılabileceğini ve kesmede önemli katkı sağladığını göstermiştir. Deneysel olarak elde edilen deney sonuçları ampirik

denklemler ile değerlendirilmiş ve çelik lif takviyeli beton kirişlerin nihai kayma mukavemetinin tahmin edilmesinde yüksek değişkenlik sağladığı görülmüştür. Kesme kuvvetine takviye olarak kullanılan bu liflerin beton çatlama kontrolüne katkı sağlayarak çatlak genişliğini azaltabildiği deney sonuçlarından görülmektedir.

Gonzalo ve diğer. (2014), 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 yapışmaması ve dayanıklılığı olmuştur. Betonarme yapılarda gerçekleştirilen güçlendirmelerde güçlendirme tabakası / beton kırılabilirliği 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 lif dozajı, 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.

Tanarslan ve diğer. (2017), Ultra yüksek performanslı fiber takviyeli beton (UYPFB) üstün mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip çimento esaslı bir kompozittir. Bu çalışma UYPFB plakalarla güçlendirilen betonarme kirişlerin davranışı üzerine odaklanılmıştır. İlk olarak fiber hacminin UYPFB mekanik özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirme ve plaka üretimi için uygun fiber güçlendirme oranı seçmek amacıyla ön hazırlık çalışması gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada tam ölçekli numuneler gerçek boyutlu plakaların boyut etkisini gözlemlemek için test edilmiştir. Son aşamada eğilme açısından kusurlu olan betonarme kirişler 30 mm kalınlıkta UYPFB plakalarla iki farklı yapıştırma tekniği kullanarak (epoksi ile yapıştırma ve mekanik ankraj) güçlendirilmiştir. İlave olarak plakaların içerisine uzunlamasına donatılar yerleştirilmiş ve uygulanan yöntemlerin başarısını artırmak için yöntemlerin etkinlikleri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak UYPFB plakanın özellikle ankraj uygulamasıyla betonarme kirişleri yük taşıma kapasitesini artırmak için etkin bir yöntem olduğu belirlenmiştir. Dahası katmanların içerisine donatıların yerleştirilmesi uygulanan yöntemin etkinliğini dikkate değer şekilde iyileştirilebilir.

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 araştırıldığı çalışmalar incelenmiştir.

Julio 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 etkilemeği 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 taze beton yerleştirilir. Mevcut betonu sertleşmiş beton ile birleştirmek prekast elemanlarda yaygın bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu tür uygulamalar genellikle öngermeli viyadük ve köprüde kullanılmaktadır. Taze beton prekastlar ise sıklıkla güçlendirmede kullanılır. Bu teknikler güçlendirme, beton mantolama olarak kolon kiriş 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 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 diğer. (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 rehabilitasyonu 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 rötresine 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; yüzey üzerinde uygulanan basıncı, çalışma süresi, teknisyenin uzmanlığı, malzeme yaşı ve diğerleri gibi. Bu nedenle betonarme yapıların güncel tasarım kodlarında iki beton birleştirildiği durumlarda çeşitli kısıtlamalar sunmaktadır. Bu kısıtlamaların üstesinden gelebilmek için yüzey dokusunu 2B profiller ya da 3 boyutlu yüzeyler ile tanımlanması, pürüzlülük parametrelerinin değerlendirilmesi, pürüzlülük parametreleri ile uyum ve sürtünme katsayıları tanımlanması ve beton betona ara yüz yapışma gücü değerlendirilmesi 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

DENEY ELEMANLARI VE DENEY TEKNİĞİ

2.1 Genel

Kirişlerde kesme kırılmasıyla birlikte görülen eğilme yetersizlikleri elemanların kapasitelerini önemli oranda etkilemektedir. Eğilme yetersizlikleri boyuna donatının yetersiz sayıda kesite yerleştirilmesi sonucu çekme bölgesinde gelişen çatlakla ilk olarak kendini göstermektedir. Kirişlerde çekme bölgesindeki betonda eğilme çatlaklarının oluşması ve bu çatlakların boyutlarının artmasından sonra boyuna donatıdaki gerilmeler akma gerilmesine ulaşarak elemanın eğilme kapasitesine ulaşmasına neden olmaktadır. Ayrıca, eğilme çatlama düşük yükler altında oluşarak kirişin eğilme rijitliğini azaltmaktadır. Donatı çatlama önleyemez fakat yeterli ve iyi yerleştirilmiş donatı çatlak genişliğinin kabul edilebilir düzeyde kalmasını sağlar. Eğilme yetersizliğinde kesme yetersizliğinde oluşan gevrek kırılma oluşmaz ancak yetersiz dayanım nedeniyle kirişin güçlendirilmesi gerekebilir. Bu tip yetersizliklere sahip elemanların güçlendirilmesi için yapının nihai performansı dikkate alındığında önemli olup bu bağlamda tercih edilen çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bunlar betonarme katman ekleyerek mantolama yapma, çelik levha takviyesiyle güçlendirme ve lifli polimerler ile güçlendirme gibi yöntemlerdir. Gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında eğilme yetersizliğine sahip betonarme kirişin kapasitesinin ultra yüksek performanslı beton plaka ile artırılması incelenecektir.

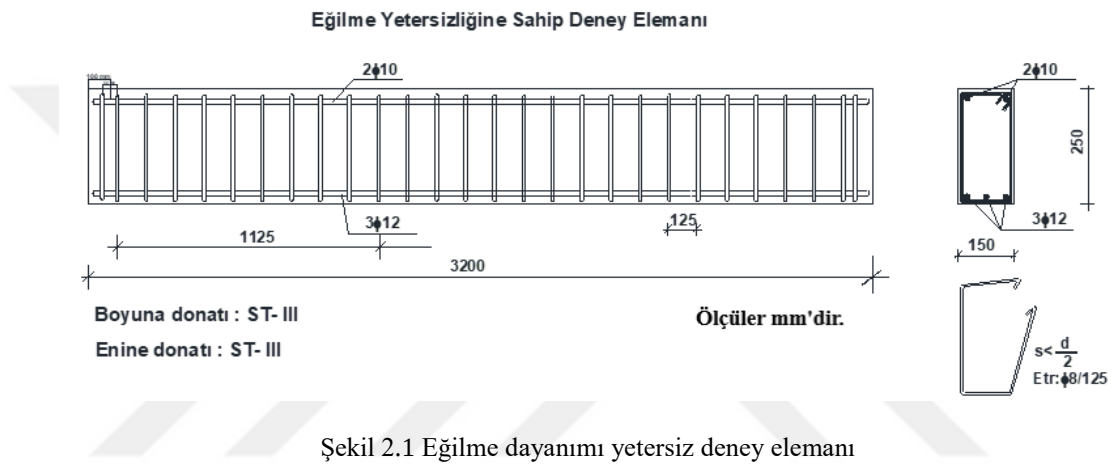
2.2 Deney Elemanları

2.2.1 Eğilme Dayanımı Artırılacak Deney Elemanları

Deneyisel çalışmada, eğilme dayanımı yetersiz betonarme kirişlere farklı kalınlıklarda yapıştırılan UYPB plakaların, dayanım ve davranış açısından sağlayacağı iyileştirmeler mekanik deneylerle incelenecektir. Eğilme dayanımı yetersiz betonarme kirişler bu ilkelere uygun üretilmiştir.

Tez kapsamında 4 adet 150 x 250 x 3200 mm boyutlarında eğilme dayanımı yetersiz deney elemanı test edilecektir. Çalışmada UYPB plakaların 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 2.1’de sunulmuştur.



Çalışmada 1 adet deney elemanı referans deney elemanı, diğer 3 adet deney elemanı ise farklı kalınlıkta UYPB plaka ile eğilme dayanımı artırılmış kirişlerdir. Referans kiriş deney elemanı Kiriş-1, 30 mm UYPB plaka ile güçlendirilmiş deney eleman Kiriş-2, 50 mm UYPB plaka ile güçlendirilmiş deney eleman Kiriş-3 ve 70 mm UYPB plaka ile güçlendirilmiş deney eleman Kiriş-4 olarak isimlendirilmiştir.

2.3 Malzemeler

Deney elemanlarının üretilmesinde donatı, beton ve UYPB plaka kullanılacaktır. Donatı ve beton malzemelerinin karakteristik özellikleri, numuneler üzerinde laboratuvar da gerçekleştirilen testlerle belirlenmiştir. Deney elemanlarının üretilmesinde aynı özellikte beton ve aynı bağdan inşaat demiri kullanılacaktır.

2.3.1 Donatı

Test sonuçlarının sağlıklı değerlendirilebilmesi için deney elemanlarının üretilmesinde kullanılan donatıların bütün deney elemanlarında aynı dayanım ve özellikte olması gerekmektedir. Bu nedenle deney elemanlarında aynı bağdan temin edilen inşaat demiri kullanılmıştır. İzmir Demir Çelik Sanayi A.Ş. tarafından çekme deneyleri yapılarak kalite sertifikası alınmıştır. Nervürlü donatıların akma dayanımı, kopma dayanımı ve elastisite modülü değerleri neredeyse aynıdır ve sırasıyla 470 MPa 574 MPa ve 205 GPa değerindedir. Tablo 2.1’de çalışmada kullanılan donatıların kimyasal ve mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.1 Donatının mekanik ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Birleşimi		
Donatı çapı	10	12
Kalite	S420 (nervürlü)	S420 (nervürlü)
Döküm no	15106386	18324243
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
Ceş	0,32	0,36
Mekanik Özellikleri		
Kesit alanı	78,6 mm ²	113,1 mm ²
Akma Dayanımı	476 N/mm ²	470 N/mm ²
Çekme Dayanımı	557 N/mm ²	574 N/mm ²
Çekme/Akma	1,17	1,22
Uzama	26%	28%

2.2.2 Beton

Deney elemanı olarak kullanılacak kirişlerin beton dökümü Yeni Prefabrike Beton İnşaat San. ve Tic. A.Ş.’de gerçekleştirilmektedir. Deney elemanlarının basınç dayanımlarının silindirik C20 sınıfında olacak şekilde üretilmesi 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. Agrega 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 2.2'de sunulmaktadır. Karışım 15 cm çökme değeri sergilemiş, betonun yerleştirilmesi kalıp vibrasyonu ile eksiksiz olarak sağlanmıştır.

Tablo 2.2 Kiriş imalatında kullanılan betonun karışım oranları

Malzeme	Dozaj (kg/m ³)
Çimento (CEM-I 42,5 R)	315,00
Su	222,00
İnce agreg (kıırma kireçtaşı)*	863,00
İri agreg (kıırma kireçtaşı)*	978,00

* Agregalar kuru yüzey doygun (KYD) haldedir.

Dört adet silindir numune dökülmüş ve beton dayanımı 28 gün standart su kürü sonrası 15x30 cm'lik silindirik numuneler üzerinde test edilmiştir. Betonun ortalama basınç dayanımı 20,4 MPa'dır.

2.2.3 Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB)

Çalışmada UYPB agreg iskeleti 0-0,4 mm ve 0,5-1 mm kuvars agregalardan oluşmaktadır. Portlant çimentosu (CEM I 42,5 R) ve silika dumanı bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada yeni nesil polikarboksilat bazlı süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Lif olarak düz tip, 13 mm uzunlukta 0,20 mm çapında en boy oranı 0,65 olan pirinç kaplı çelik mikro lifler tercih edilmiştir. Liflerin doğrudan çekme dayanımı 2750 MPa'dır.

Oldukça düşük su bağlayıcı oranı (0,16) değerine sahip karışım UYPB tasarımları Tablo 2.3'te sunulmaktadır. Düşük su/bağlayıcı oranı ve lif takviyesiyle 200 MPa basınç, 40 MPa eğilme dayanımının yakalanması hedeflenmiştir. Bununla beraber aşırı düşük su/bağlayıcı oranlarında hidrate olmamış tanecik sayısının arttığı bilinmektedir. Yüksek hacimli liflerde yeterli işlenebilirliği sağlamak için UYPB karışımları hacimce %68 hamurdan oluşmaktadır. Homojen UYPB matrisi elde etmek için özel bir karıştırma prosedürü uygulanmıştır. Lif hacminin işlenebilirlik üzerinde

etkisini açıklığa kavuşturmak için akışkanlaştırıcı dozajı sabit tutulmuştur. Hobart mikserde hazırlanan karışımlar 40×40×160 mm³ boyutlarındaki prizmatik kalıplara dökülmüştür. UYPB karışımları üç katman halindeki kalıplar içerisine dökülerek her bir katman dış vibrasyon esnasında çelik çubuk ile 25 vuruş kullanarak sıkıştırılmıştır.

Harç yayılma testi ASTM C1437 ile uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Karışımların mekanik performansı 28 günlük standart kütleme işleminden sonra değerlendirilmiştir. Eğilme dayanımı 40 MPa basınç değerini ve basınç dayanımı 200 MPa değerini aşan UYPB'yi elde etmek %3 çelik mikro lifle mümkündür. Çalışmada güçlendirme amacıyla kullanılacak plakaların imalatı için %3 lif hacmine sahip UYPB kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri sırasıyla Tablo 2.3'te sunulmaktadır.

Tablo 2.3 UYPB karışım oranları

Bileşen (kg/m ³)	Karışımlarda lif oranları				
	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					
Agrega hacmi (%)*	32				
Hamur hacmi (%)	68				
Su /Çimento	0,2				
Su / Çimento**	0,21				
Su/Bağlayıcı	0,16				
Su/Bağlayıcı**	0,17				

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

Deneylerde Pomza Export firmasından temin edilen, İzmir 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 2.4'te, elek analizleri Tablo 2.5'de sunulmaktadır. Tablo 2.5'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 2.4 Kuvars agregalarının kimyasal kompozisyonu

Kimyasal Kompozisyon	(%)
SiO ₂	99,8
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

Tablo 2.5 Kuvars agregalarının elek analizleri

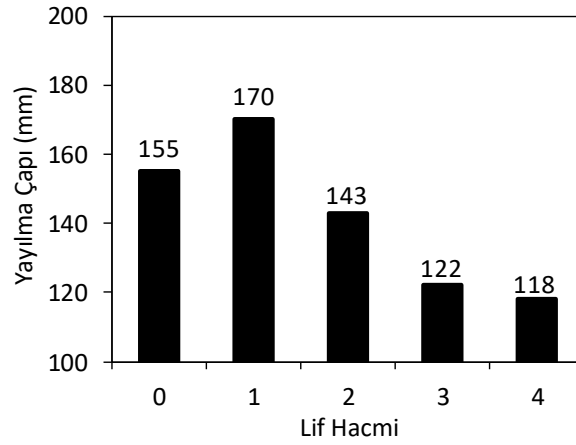
Elek Açıklığı (mm)	0,5 – 1 mm	0 – 0,4 mm
8	100	100
4	100	100
2	100	100
1	74	100
0,5	0	100
0,25	0	76
0,125	0	8,4
0,09	0	5,9
0,075	0	4
0,063	0	2,1
0,053	0	1,7



Şekil 2.2 Çalışmada kullanılan bağlayıcı maddeler ve agregalar (Kişisel arşiv, 2016)

2.2.3.1 Yaş durum performansı

Ön hazırlık testleri çelik mikroliflerin işlenebilirlik düşürme etkisi ile başa çıkabilmek için %68 hacimde yapıştırıcıya ihtiyaç duyulduğunu göstermiştir. Lif olmadan düzgün karışım elde etmek için yaklaşık 150 mm akış çapı amaçlanmış ve her bir fiber hacmi için sabit akışkanlaştırıcı dozajı kullanılmıştır. Sonuç olarak %1 oranında çelik lif hacmi karıştırma esnasında kesme kuvvetini arttırarak işlenebilirliği iyileştirirken yüksek hacimlerde yayılma çapında dikkate değer azalmaya neden olmuştur (Şekil 2.3). Bu azalma liflerin işlenebilirlik etkisine bağlı ilave iç sürtünmeye ve aşırı derecede düşük su/çimento oranına sahip karışımların yüksek viskozitesine atfedilebilir. Her şeyden önce taze karışımları vibrasyon ve el operasyonları aracılığıyla kalıpların içerisinde kolayca dökmek mümkündür. Ancak taze UYPB yüzeyini %4 lif hacminde uygun şekilde bitirmek mümkün değildir.

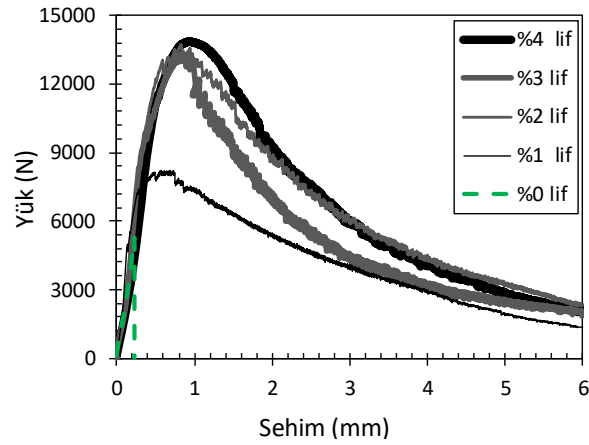


Şekil 2.3 Çalışmada kullanılan bağlayıcı maddeler ve agregalar

2.2.3.2 Mekanik performansı

0-0,4 mm ve 0,5-1 mm boyutlu agrega kullanılan lifsiz UYPB'nin ortalama basınç dayanımı 109 MPa elde edilmiştir. Ortalama basınç dayanımı %1, %2, %3 ve %4 çelik lif hacimlerinde sırasıyla 155, 185, 204 ve 214 MPa olarak elde edilmiştir.

Eğilme performansını değerlendirmek adına 6 mm sehime kadar çizilen, farklı lif hacimlerine sahip karışımların eğilme yükü - orta nokta sehim eğrileri Şekil 2.4'te sunulmaktadır. Lif hacmi, karışımların davranışını dikkate değer şekilde etkilemiştir. Lifsiz UYPB'nin yük taşıma kapasitesi ve nihai sehim değerleri lifin dahil edilmesi sonucunda dikkate değer şekilde artmıştır. Eğilme yükleme altında tüm lif hacimleri ilk çatlaktan sonra daha yüksek bir yük seviyesine erişerek deformasyon sertleşmesine ve sünek davranışa neden olmuştur. %2 lif hacmine kadar maksimum yükler önemli oranda artmıştır.



Şekil 2.4 Lif hacmine bağlı olarak eğilme yükü - sehim eğrileri

Lifsiz karışım 16 MPa ortalama eğilme dayanımı sergilemiştir. %1 ve %2 lif hacminde bu değer sırasıyla %56 ve %163 oranında artarak 25 MPa ve 42 MPa'ya erişmiştir. Lif kullanımının %3 ve %4 olması durumunda basınç dayanımındaki eğilimin aksine eğilme dayanımlarında kayda değer bir artış oluşmamıştır. Lif hacmini arttırma hem eğilme hem de ilk çatlama dayanımını artırmıştır.

Sonuç olarak 40 MPa eğilme ve 200 MPa basınç dayanımı değerini sağlayan UYPB'yi elde edebilmek için %3 çelik mikro lif kullanımının gerekliliği görülmüştür. Çalışmada güçlendirme amacıyla kullanılacak plakaların imalatı için %3 lif hacmine sahip UYPB kullanılmıştır.

2.2.3.3 UYPB'de kullanılan lif türleri ve hiperakışkanlaştırıcı

Kullanılan mikro çelik lifler 6 mm ve 13 mm uzunluğa, 0,20 mm çapa sahip pirinç kaplı liflerdir. Çalışmada kullanılan liflerin bazı özellikleri Tablo 2.6'da sunulmuştur. Kullanılan liflerin görüntüleri Şekil 2.5'te sunulmaktadır.

Tablo 2.6 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	2000	7,17	—
Mikro-2	13	0,20	65	2000	7,17	—



Şekil 2.5 Çalışmada kullanılan lif türleri (Kişisel arşiv, 2016)

Hiperakışkanlaştırıcı olarak BASF firmasının geliştirdiği Glenium ACE 450 kullanılmıştır. Bu katkının genel özellikleri Tablo 2.7’de sunulmaktadır.

Tablo 2.7 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

2.2.4 SİKADUR 31 (Epoksi) Özellikleri

Plakaların deney elemanlarına yapıştırılmasında Sikadur 31 (epoksi) yapıştırıcı kullanılmıştır. Sikadur 31 solventsiz, neme toleranslı, tiksotropik, 2 bileşenli epoksi reçineler ve yüksek dayanımlı dolgu maddeleri içeren, +10 °C ile +30 °C arasındaki sıcaklıklarda kullanılmak üzere tasarlanmış 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. Uygulamadan sonra epoksinin priz alması için deney elemanı üç gün süre ile laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Sikadur 31'in üretici firma tarafından belirtilen özellikleri Tablo 2.8'de verilmiştir.

Tablo 2.8 Sikadur 31'in özellikleri

Yoğunluk	1,65 kg/l
Uygulama Sıcaklığı	En az +10 °C , En fazla +30 °C
Karışım Oranı	A (reçine) / B (sertleştirici) = 3/1
Basınç Dayanımı	60-70 N/mm ²
Çekme Dayanımı	15-20 N/mm ²
Yapışma (Çelik)	15 N/mm ²
Yapışma (Kuru Beton)	> 4 N/mm ²
Young Modülü	8500 N/mm ²
Elastisite Modülü	4300 N/mm ²

2.3 Deney Elemanlarının Üretilmesi

Deney elemanlarının üretimi, donatı kafesinin ve kalıbın hazırlanması, beton dökümü ve güçlendirme aşamalarından oluşmaktadır. Deney elemanlarının beton dökümünde çelik kalıp kullanılmıştır. Çelik kalıp 3 mm kalınlığında çelik levhalar kullanılarak üretilmiştir. Çelik kalıbın çekilmiş fotoğrafları Şekil 2.6'da sunulmuştur.



Şekil 2.6 Çelik kalıp kesit detayı (Kişisel arşiv, 2016)

Deney elemanlarının donatıları Yeni Prefabrike Beton İnşaat San. ve Tic. A.Ş.'de hazırlanmıştır. Önce kiriş etriyeleri hazırlanmıştır. Daha sonra kirişin üst ve alt donatısı hazırlanmıştır. Eğilme elemanı olması durumuna göre donatı düzenlemeleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 Donatı düzenlemesi (Kişisel arşiv, 2016)

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 2.8'de görülmektedir.



Şekil 2.8 Donatı kafesi (Kişisel arşiv, 2016)

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 tasarımı ve dökümü gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.9 Deney elemanları beton dökümü (Kişisel arşiv, 2016)

Hazırlanan beton kalıba vibratör kullanılarak yerleştirilmiştir. Üç adet standart silindir numunesi alınmıştır. Şekil 2.9’da 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.

2.4 Plaka Üretimi

Kalınlık değişimine bağlı olarak eğilme performansında oluşacak değişikliği gözlemlemek amacıyla 3 farklı kalınlıkta UYPB plaka üretilmiştir. 30 mm, 50 mm ve 70 mm kalınlığa sahip plakalar incelenmiştir. Plakaları üretebilmek için özel kalıplar kullanılmış, beton mikseri modifiye edilmiştir.

2.4.1 Beton mikseri

Plaka 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 2.10’da görülmektedir.



Şekil 2.10 UYPB mikseri (Kişisel arşiv, 2016)

2.4.2 Gerçek Ölçekli Plaka Kalıpları

Mikser üretiminden sonra gerçek ölçekli plaka üretimi için çelik kalıplar hazırlanmıştır. Plakaların boyu uzun olduğu için beton dökümü nedeniyle zaman içinde kalıplarda deformasyon meydana gelebilmektedir. Bu nedenle kalıpların altında çelik U profiller kullanılmıştır. Eğilme dayanımını artırmaya yönelik üretilecek plakalar için 1 adet kalıp üretilmiştir.



Şekil 2.11 Plaka kalıpları (Kişisel arşiv, 2016)

Kalıbın yan yüzleri ise farklı yükseklikte beton dökümüne izin verecek şekilde değiştirilebilir şekilde dizayn edilmiştir. Böylece aynı kalıptan 3 farklı yükseklikte plaka üretmek mümkün olacaktır (Şekil 2.11 - 2.12).



Şekil 2.12 Plaka kalıpları için yan yüzler (Kişisel arşiv, 2016)

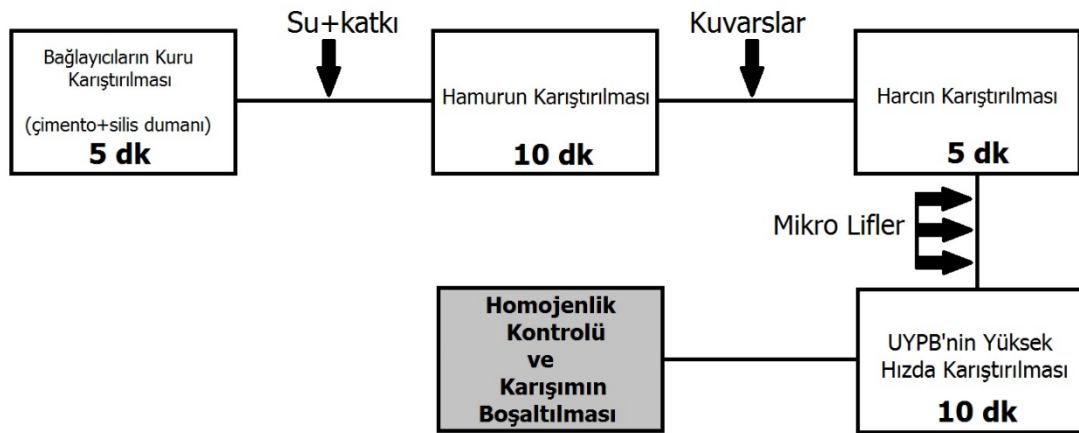
2.5 UYPB'nin Hazırlanması ve Kalıba Yerleştirilmesi

Plaka elemanların üretiminde mekanik özelliklerin ve işlenebilirliği dikkate alınarak hazırlanan 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 söz konusu olabilirdi. 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. Plaka üretiminde kullanılan, malzeme bileşenleri; su, çimento, silis dumanı, 0,5-1 mm kuvars, 0-0,4 mm kuvars, akışkanlaştırıcı (ACE450) ve 13mm mikro çelik liftir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 UYPB Plaka üretimde kullanılan malzemeler (Kişisel arşiv, 2016)

Malzemelerin karıştırma prosedürü Şekil 2.14'de şematize edilmiştir. Plaka üretimine dökümde kullanılacak malzemeler hassas bir biçimde tartılarak başlanmıştır.



Şekil 2.14 UYPB karıştırma prosedürü

Öncelikle bağlayıcı maddeler (çimento ve silis dumanı) 5 dakika boyunca düşük devirde karıştırılmıştır (Şekil 2.15). Ardından karışım suyu ve akışkanlaştırıcıdan oluşan çözelti dönen mikserde eklenmiştir (Şekil 2.16). 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 2.17). Karışıma su katılmasından toplam 25 dakika sonra taze UYPB elde edilmiştir (Şekil 2.18).



Şekil 2.15 Bağlayıcıların karıştırılması (Kişisel arşiv, 2016)



Şekil 2.16 Bağlayıcılara su+akışkanlaştırıcı çözeltisinin ilavesi (Kişisel arşiv, 2016)



Şekil 2.17 Çelik mikro liflerin serpiştirilerek karışıma eklenmesi (Kişisel arşiv, 2016)



Şekil 2.18 Karışım süreci tamamlanmış taze UYPB (Kişisel arşiv, 2016)

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. Plaka elemanların en derin olanı 70 mm derinliğe sahip olduğundan ve karışımda elde edilen yeterli işlenebilirlik sayesinde kalıp tek kademede doldurulmuştur. Ardından kalıp dış yüzeyinden şişe vibratör kullanımı, yüzeyden ise şişleme vasıtasıyla yerleştirme gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.20). 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 2.19 Taze UYPB'nin kalıba dökülmesi (Kişisel arşiv, 2016)



Şekil 2.20 Taze UYPB'nin şiş ve vibrasyon ile yerleştirilmesi (Kişisel arşiv, 2016)

UYPB'nin kalıptan sökülmesi için naylon örtülü numuneler laboratuvar ortamında 2 gün bekletilmiştir. Böylelikle ince elemanların (30 mm) sökümünde oluşabilecek sorunların önüne geçilmiştir. Kalıbından sökülen numuneler ıslak şilteler ve üzerine naylon örtü ile sarılmıştır. Laboratuvar sıcaklığında (21 ± 3 °C) neme doygun ortamda 28 gün kür edilen numuneler iki gün laboratuvar ortamında kurumaya alındıktan sonra betonarme kirişlere tatbik edilmiştir. Şekil 2.21'dan da görüleceği üzere kalıp yüzeyleri boşluksuz ve pürüzsüz şekilde elde edilmiştir.



Şekil 2.21 Plakaların ıslak örtü ve naylon örtülerek kür edilmesi (Kişisel arşiv, 2016)

2.6 UYPB Plakaların Betonarme Kirişe Yapıştırılması

Epoksi reçinesini beton yüzeyine uygulamadan önce yüzey kalitesini arttırmak amacı ile beton yüzeyinin temiz, kuru ve yabancı maddelerden arındırılmış olmasına dikkat edilmiştir. Beton yüzeyindeki tüm gevşek veya oynak parçalar, diğer kirleticiler uzaklaştırılmıştır. Uygulama yüzeyinin epoksi ile daha iyi bir bağ kurabilmesi için yüzey önce tel fırça ile sonra da matkap ucu ile pürüzlendirilmiştir. Toz vb. yabancı maddeleri uzaklaştırmak için basınçlı hava tutulmuş ve nemli bir bezle temizlenmiştir. (Şekil 2.22).



Şekil 2.22 Beton yüzeyinin temizlenmesi (Kişisel arşiv, 2016)

Sikadur 31 karışımına hazır bileşenleri 3A(reçine)+B(sertleştirici) oranında en az 3 dakika boyunca spiral uçlu elektrikli karıştırıcı ile 100 devirli bir karıştırıcıyla düzgün kıvamlı ve homojen gri renkte olana kadar karıştırılmıştır (Şekil 2.23).



Şekil 2.23 Sikadur 31 epoksi bileşenlerinin karıştırılması (Kişisel arşiv, 2016)

Betonun yüzeyi temizlenmiş ve epoksi reçinesi uygulanabilir kıvama gelmiştir. Kullanıma hazır hale gelen epoksi reçinesi 2 mm kalınlığında beton yüzeyine spatula yardımıyla sürülmüştür. Sürülen epoksinin kalınlığı bir kürdan yardımı ile kontrol edilmiştir (Şekil 2.24 - 2.25).



Şekil 2.24 Yüzeyi temizlenmiş betonarme kiriş elemanı (Kişisel arşiv, 2016)



Şekil 2.25 Sikadur 31 epoksinin betonarme kirişe spatula yardımıyla sürülmesi (Kişisel arşiv, 2016)



Şekil 2.26 Sikadur 31 epoksinin betonarme kirişe uygulanmış hali (Kişisel arşiv, 2016)

Üzerine epoksi reçinesi sürülmüş betonarme kirişin, UYPB plaka elemanla yapışması sağlanmıştır. UYPB plakayı kirişe yapıştırmak için; kirişin uçlarına ve orta bölümüne yedi adet işkence kullanılmıştır. Bu işkenceler sadece lokal yapıştırma sağlamaktadır. Bu nedenle kiriş ve UYPB plaka arasında uygun yapışma sağlayabilmek için işkencelerin arasındaki her bir boşluğa 50 kg yük yerleştirilmiştir. Sistem test edilmeden önce en az iki haftalık bir süreyle oda sıcaklığında kürlemeye bırakılmıştır (Şekil 2.25-26-27-28). Kiriş altında çelik destekler koyarak benzer bir yapıştırma (bağlama sistemi) sahada uygulanabilir.



Şekil 2.27 UYPB plaka ile betonarme kirişin işkence aletiyle sabitlenmesi (Kişisel arşiv, 2016)



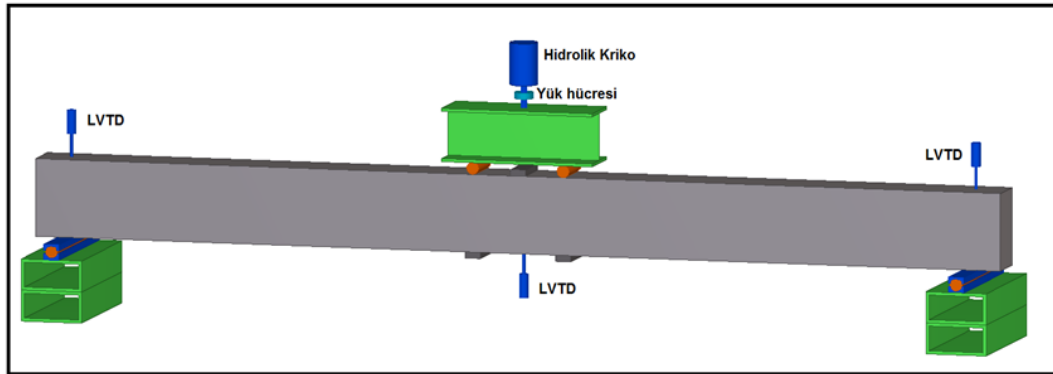
Şekil 2.28 UYPB plaka ile betonarme kirişin üzerine yük (Kişisel arşiv, 2016)

2.7 Deney ve Ölçüm Düzenegi

Gerçek ölçekli plaka deneylerinde ve kiriş deneylerinde kullanılacak deney düzenegi özdeştir. Elemanlar dört noktalı eğilme yükleri altında test edilmiştir. Elemanların temiz açıklığı 3000 mm ve yükler arasındaki mesafe 300 mm'dir. Tüm testlerde özdeş yükleme hızını elde edebilmek için yükleme kontrol makinesi kullanılmıştır. Yükleme işlemi numunelerde göçme gerçekleşinceye kadar uygulanmıştır.

Deneyler sırasında deplasman ölçümleri için elektronik deplasman ölçüm aletleri LVDT (Lineer Variable Differential Transformer) ölçerler kullanılmıştır. Elektronik deplasman ölçüm aletleri 0,0001 mm'lik deplasman değişimlerini elektronik olarak ölçebilmektedir. Ölçümler bir veri toplayıcısı ile bilgisayara aktarılmaktadır. Bilgisayarda deney sırasında deplasman ölçümlerini düzenli olarak alan, bilgisayarın sabit hafızasına kaydeden ve istenilen deplasman ölçümünün yüke karşı grafiğini çizerek deneyin takibini kolaylaştıran bir yazılım mevcuttur. Deneylerde kiriş uç deplasmanı ile yükün değişimi bilgisayar ekranında grafik olarak deney süresince izlenmiştir.

Testlerde üç adet LVDT kullanılmıştır. LVDT'lerden biri numunenin orta açıklığına yerleştirilmiş ve diğer iki LVDT ise mesnet noktalarında meydana gelen deformasyonu ölçebilmek için mesnete karşılık gelecek şekilde kiriş üst bölgesine yerleştirilmiştir. Deneysel düzeneğin şematik görünümünü ve ölçüm cihazlarının yerleşimi Şekil 2.29'da sunulmaktadır.



Şekil 2.29 Deney düzeneği

Sehim ölçümleri elektronik doğrusal deplasman ölçerler (LVDT) ve veri okuyucu aracılığı ile yapılmıştır. Deney elemanlarının orta noktasının net deplasmanı; mesnet çökmelerini gözönünde bulundurarak mesnetlerde oluşan sehimin ortalamasının, orta noktadan ölçülen toplam deplasmandan çıkartılması ile bulunmaktadır. Hesaplama için kullanılan Eşitlik 2.1'de verilmiştir.

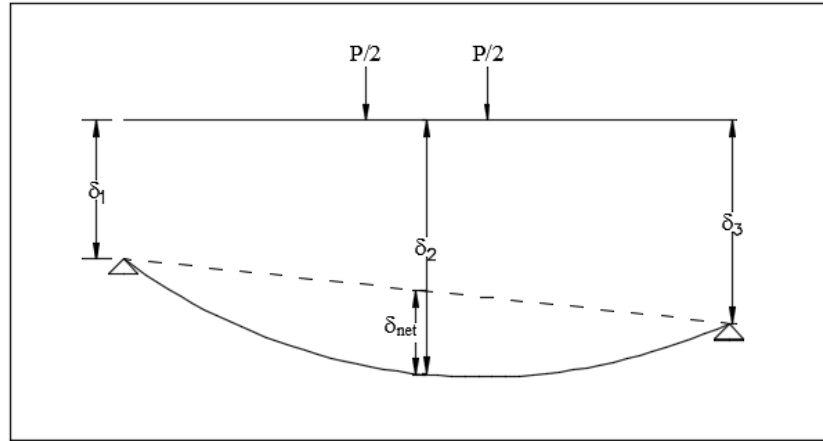
$$\delta_{2net} = \delta_2 - \frac{\delta_1 + \delta_3}{2} \quad (2.1)$$

Eşitlikte kullanılan terimler aşağıda verilmiştir.

δ_{2net} : Kiriş orta noktası düşey net deplasmanı (mm)

δ_2 : Kiriş orta noktası düşey deplasmanı (mm)

δ_1 , δ_3 : Sol ve Sağ mesnet çökmeleri (mm)



Şekil 2.30 Kiriş deformasyon geometrisi

2.7.1 Birim Deformasyonların Hesaplanması

Birim deformasyon ölçerler yapıştırılma doğrultusundaki şekil değiştirmeyi ölçen ölçüm aletleridir. Deneysel çalışmada UYPB plakaların üzerine birim deformasyon ölçerler yerleştirilerek UYPB plakaların deformasyon yapma kapasitelerinin belirlenmesine çalışılmıştır. Bu bağlamda UYPB plakaların üzerine 3 adet birim deformasyon ölçer yerleştirilmiştir. Deneyler sırasında elemanlardan birim deformasyon ölçümleri de alınmıştır. Bu ölçümler kirişin orta açıklığı ve mesnete karşılık gelecek şekilde kiriş üst bölgelerine yerleştirilmiştir.

Birim deformasyon ölçerler mekanik hareketleri elektronik sinyallere dönüştüren ölçüm aletleridir. Bu nedenle elemanlarda gerçekleşen birim deformasyonların değişiklikleri milivolt cinsinden ölçülmüştür. (2.2) no'lu bağıntı kullanılarak birim deformasyona dönüştürülmüştür.

$$V_o = \frac{GF \times \varepsilon}{4} \left(\frac{1}{1+GF+\frac{\varepsilon}{2}} \right) \times V_i \times GAIN \quad (2.2)$$

V_o : Okunan milivolt değeri V_i : Uygulanan gerilim

GF: Birim deformasyon faktörü (=2)

GAIN: Kanal kazanç değeri (=420)

ε : Birim deformasyon değeri



BÖLÜM ÜÇ

GERÇEK ÖLÇEKLİ UYPB PLAKALARIN EĞİLME DENEYLERİ

3.1 Giriş

Deneysel çalışmada öncelikle, üretimi ve kür süresi tamamlanan gerçek ölçekli plakların testleri gerçekleştirilmiştir. 30 mm, 50 mm ve 70 mm kalınlığa, 150 mm genişlik ve 3000 mm uzunluğa sahip plaklar yükleme çerçevesinde 4 noktadan eğilme altında test edilmiştir. Bu deneylerle elemanların tek başlarına eğilme kapasitelerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu elemanların betonarme kirişlere yapıştırılmasıyla elde edilecek katkı elbette farklı olacaktır. Ancak bu uygulama gerçek boyutlu plaklarda kalınlık değişimine bağlı olarak nasıl bir performans farklılığı gözlenebileceği hakkında ön bilgi vermesi açısından faydalı olacaktır.

Bu bölümde, test sonuçları ve deneysel gözlemler ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Her deney elemanı için yük geçmişi grafikleri, yük-deplasman grafikleri, birim deformasyon grafikleri verilmiştir. Deney elemanlarında gelişen çatlaklar ve göçme şekilleri deneyin anlatımı sırasında ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

3.2 30 mm Kalınlığa Sahip Plaka Deneyi

30 mm kalınlığa sahip plaka betonarme kirişe uygulanmadan önce davranışını değerlendirmek için test edilmiştir. 28 günlük kür süresini tamamlayan 30 mm kalınlığa sahip plaka, 2 gün boyunca kuruması için laboratuvar koşullarında saklanmıştır. Plaka 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 plakanın test öncesi durumu Şekil 3.1’de sunulmuştur.



Şekil 3.1 30 mm kalınlığında plaka deneyi (Kişisel arşiv, 2016)

Deney elemanı artan yükler altında test edilmiştir. 28,83 kg yük seviyesine kadar yük ve deplasman arasında lineer bir etkileşim gözlenmiştir. Bu yük seviyesine ulaşıldığı anda yükte ani bir artış gözlenmiş, 55,14 kg yük seviyesine sabit bir deplasman ile ulaşılmıştır. Daha sonra yükteki artış oranı azalmış ancak deplasmanda daha hızlı bir artış gözlenmiştir (Şekil 3.2).



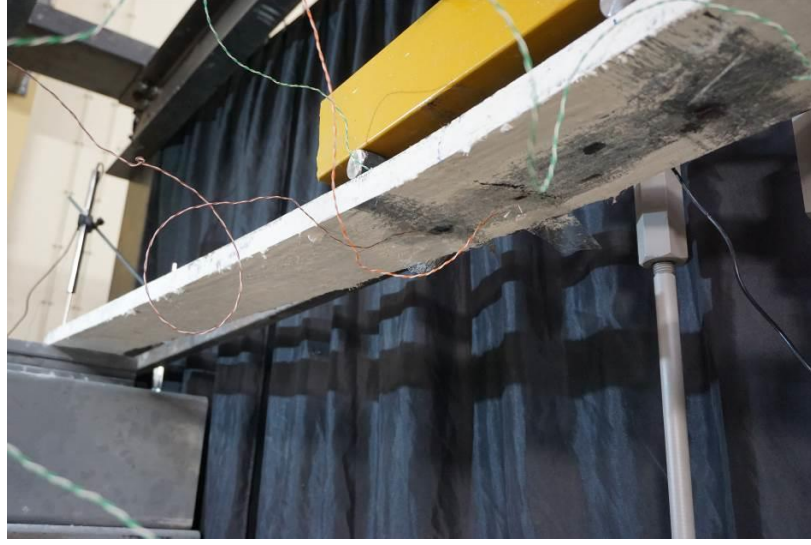
Şekil 3.2 Deney elemanının 30 mm deplasman hali (Kişisel arşiv, 2016)

Deney elemanına etkitilen yük 84,41 kg seviyesine ulaştıktan sonra yükte küçük değişimler gözlenmiş ancak deplasmanda sürekli bir artış gözlenmiştir. Yük-deplasman eğrisinden anlaşılabacağı üzere plaka sünek bir davranış göstermiştir. Deplasman 91 mm seviyesine ulaşmaya kadar plakada herhangi bir çatlak gözlenmemiştir. 91 mm deplasman seviyesine ulaşmış deney elemanının görünümü Şekil 3.3’de sunulmuştur.



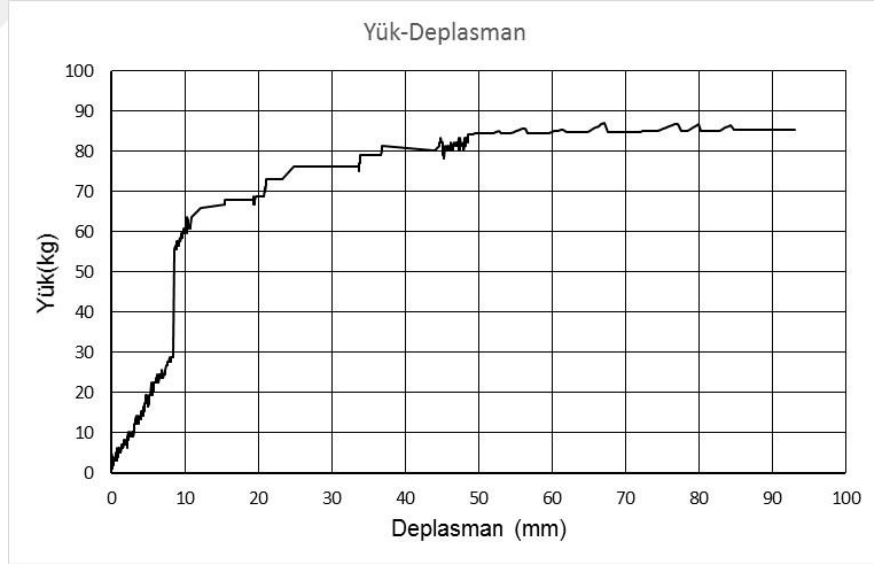
Şekil 3.3 Deney elemanının 91 mm deplasman yapmış görünümü (Kişisel arşiv, 2016)

Deney elemanı 91 mm deplasman seviyesini aştıktan sonra kiriş orta bölgesinde ani olarak bir çatlak gelişmeye başlamıştır. Çatlak gelişmeye başlar başlamaz lokalize olmuş ve çatlak genişliği ani olarak 0,3 mm seviyesine ulaşmıştır. Maksimum moment bölgesinde plakada oluşan çatlağın deney anında çekilmiş fotoğrafı Şekil 3.4’te sunulmuştur. Bu noktadan sonra ince plakada kırılma anında ne tür bir davranış oluşacağı bilinmediği ve ölçüm aletlerine zarar vermemek amacıyla deney sonlandırılmıştır.



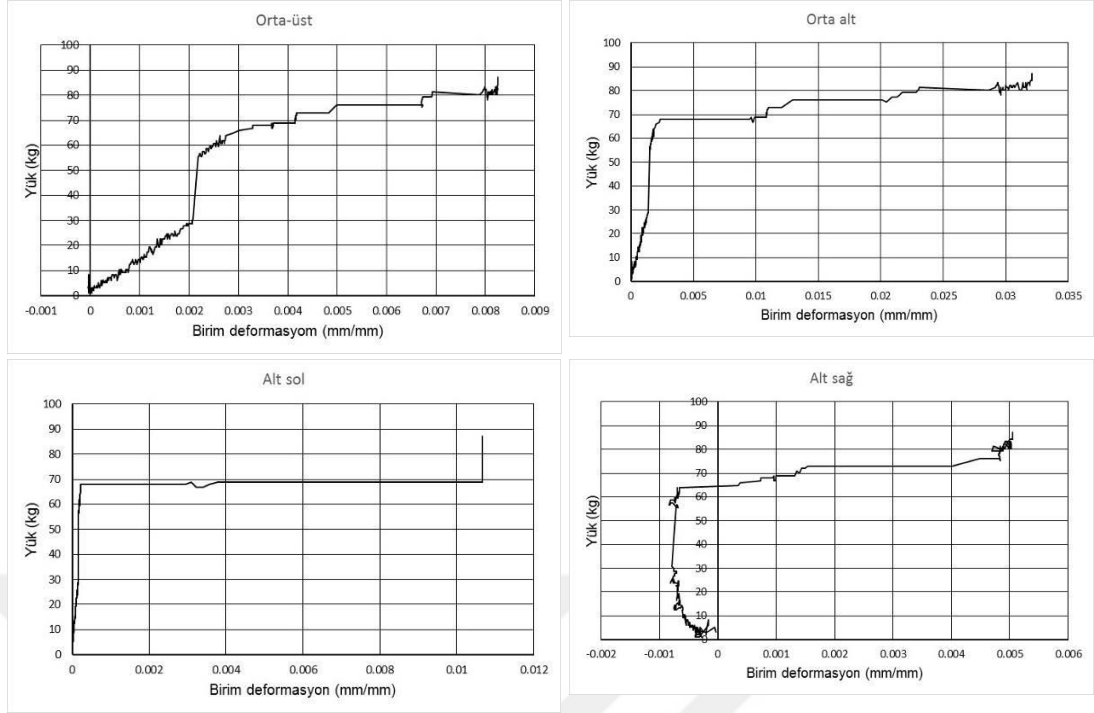
Şekil 3.4 Plakada çatlak oluşumu (Kişisel arşiv, 2016)

Plakada oluşan çatlığa rağmen yük kaldırıldıktan sonra deplasmanda yaklaşık %60 oranında bir geri dönüş meydana gelmiştir. 30 mm kalınlığa sahip plakanın yük deplasman eğrisi Şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.5 Yük-deplasman eğrisi

Yük-deplasman ölçümleri dışında plakadan birim deformasyon ölçümleri de alınmıştır. Deney elemanının birim deformasyon eğrileri Şekil 3.6’te sunulmuştur.



Şekil 3.6 30 mm kalınlığında plaka için yük-birim deformasyon eğrileri

Plakada oluşan en büyük birim deformasyon, plaka 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 plakada herhangi bir çatlak gelişmemesine rağmen birim deformasyon hızla artış göstermiştir. Bunun sebebi sünek bir davranış gösteren plakanın 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.

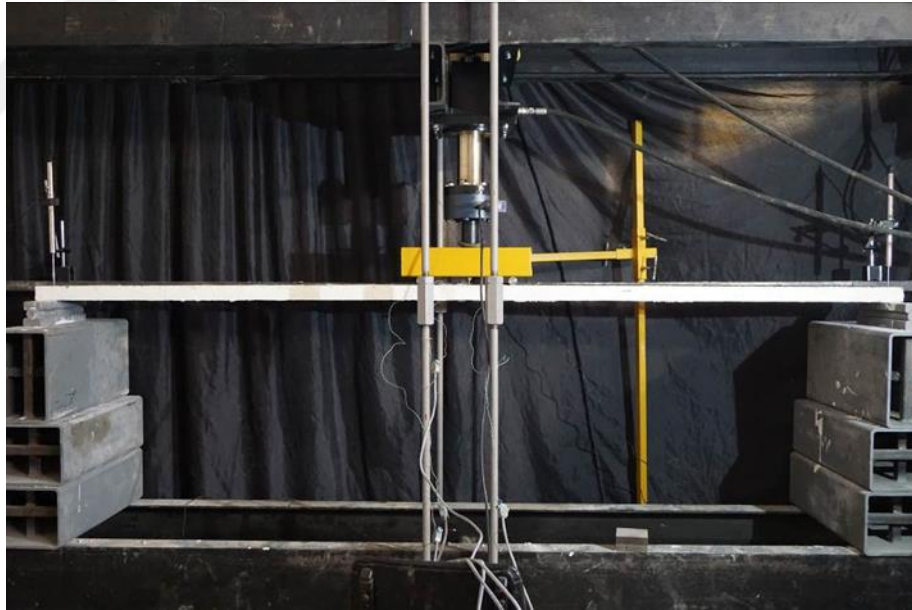
Plaka ortasının üst bölgesinde yer alan birim deformasyon ölçerde 28,83 kg yük seviyesine kadar lineer bir artış gözlenmiştir. Ani yük artışı birim deformasyon

davranışını etkilememiştir. Daha sonra artan eğriliğe bağlı olarak birim deformasyon artışı gözlenmiştir. Bu artışa rağmen birim deformasyon değeri plaka alt yüzündeki birim deformasyon değerinin ancak %25'i seviyesindedir (Şekil 3.6).

Plaka 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.

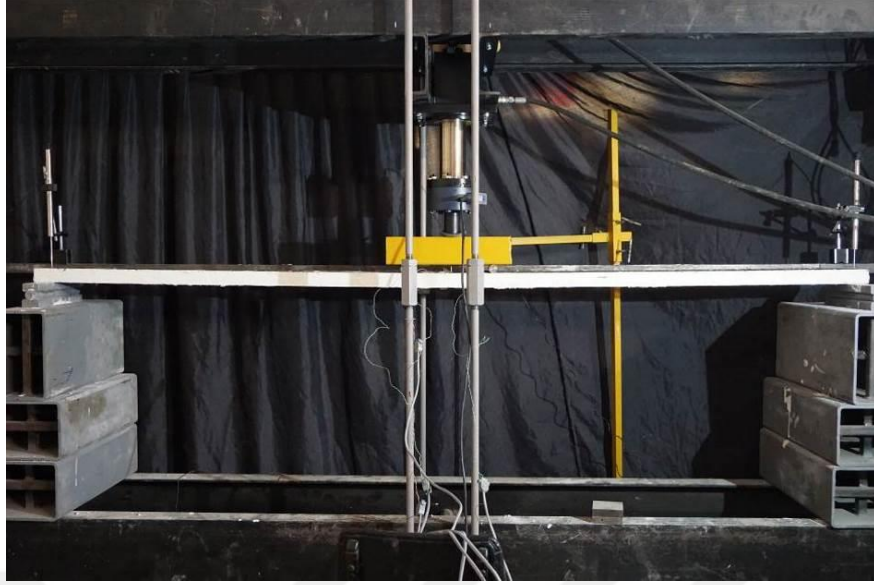
3.3 50 mm Kalınlığa Sahip Plaka Deneyi

50 mm kalınlığına sahip plaka 4 noktadan eğilme yükleri altında test edilmiştir. Plakanın deney öncesi çekilmiş fotoğrafı Şekil 3.7'de sunulmuştur.



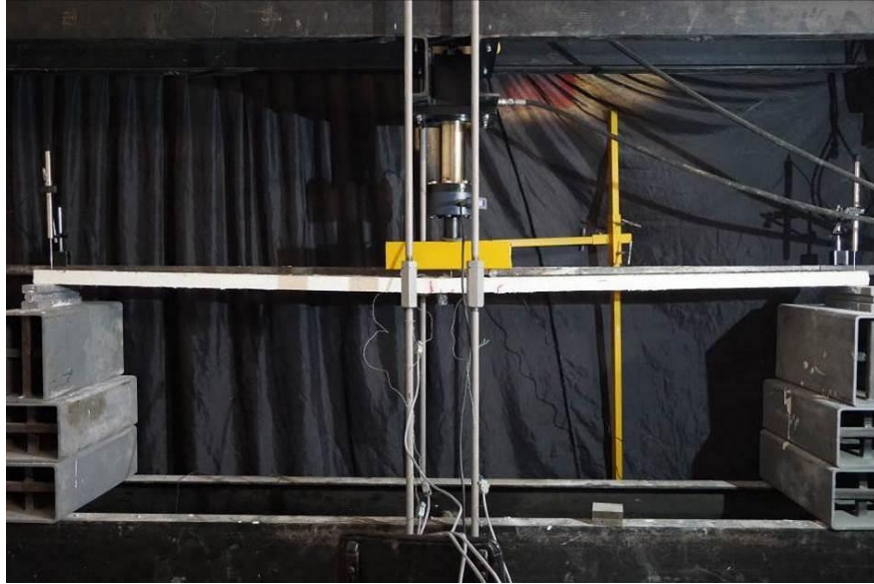
Şekil 3.7 50 mm kalınlığında plaka deneyi (Kişisel arşiv, 2016)

Plaka artan yükler altında test edilmiştir. Lifterde ilk çözülme 40 kg yük seviyesinde gerçekleşmiştir. Bu çözülmeye rağmen plaka davranışında bir değişiklik olmamıştır.



Şekil 3.8 40 kg yük seviyesinde plaka davranışı (Kişisel arşiv, 2016)

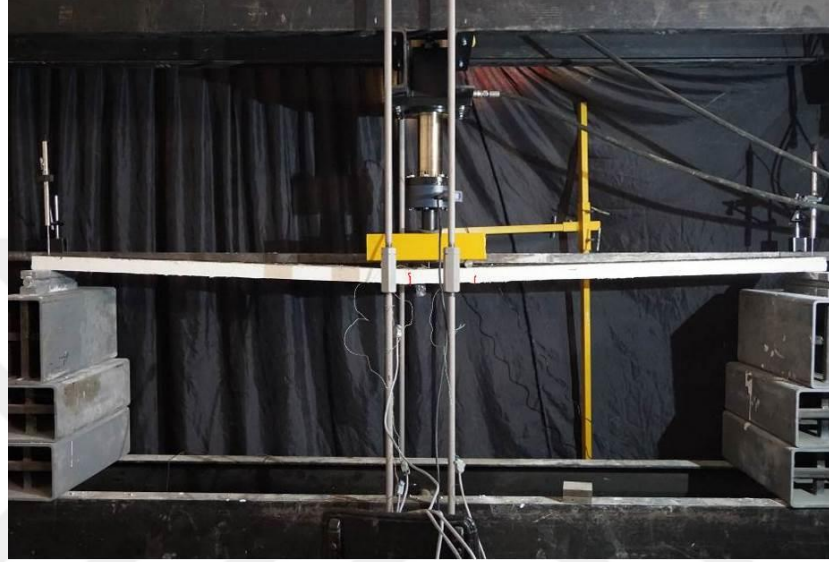
Plakada gözle gözlenen ilk çatlak 123 kg yük seviyesinde meydana gelmiştir. Bu çatlak dışında maksimum moment bölgesinde 2 adet kılcal çatlak daha gözlemlenmiştir. (Şekil 3.9).



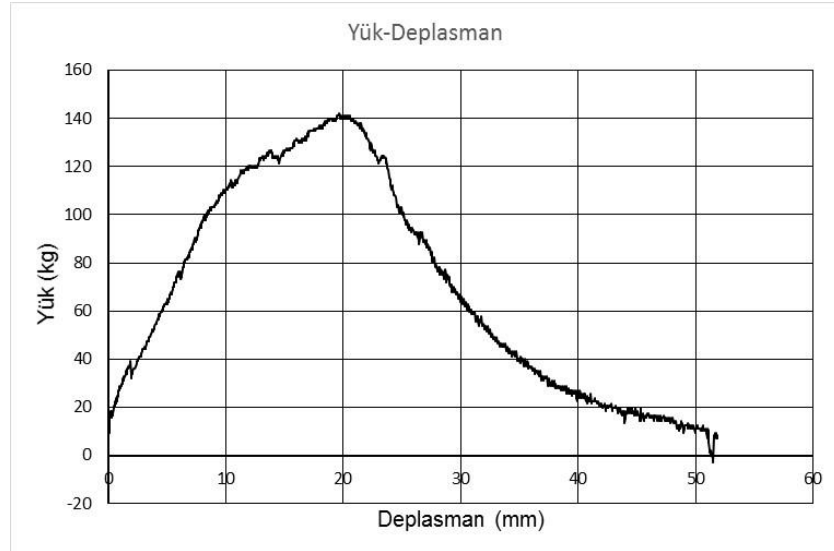
Şekil 3.9 70 kg yük seviyesinde plaka davranışı (Kişisel arşiv, 2016)

Deney elemanında daha önceki yük seviyelerinde gelişen ve plaka 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 plaka yük tutamaz hale gelmiştir. Plakanın Şekil 3.11’de sunulan yük-deplasman eğrisinden de gözleneceği üzere yükde çıkış eğrisine benzeyen bir düşüş gözlemlenmiştir. Plaka orta deplasmanı 50 mm’ye ulaşıncaya kadar deneye devam edilmiştir. Plakanın bu deplasman seviyesine ulaşmasından sonra deney sonlandırılmıştır.

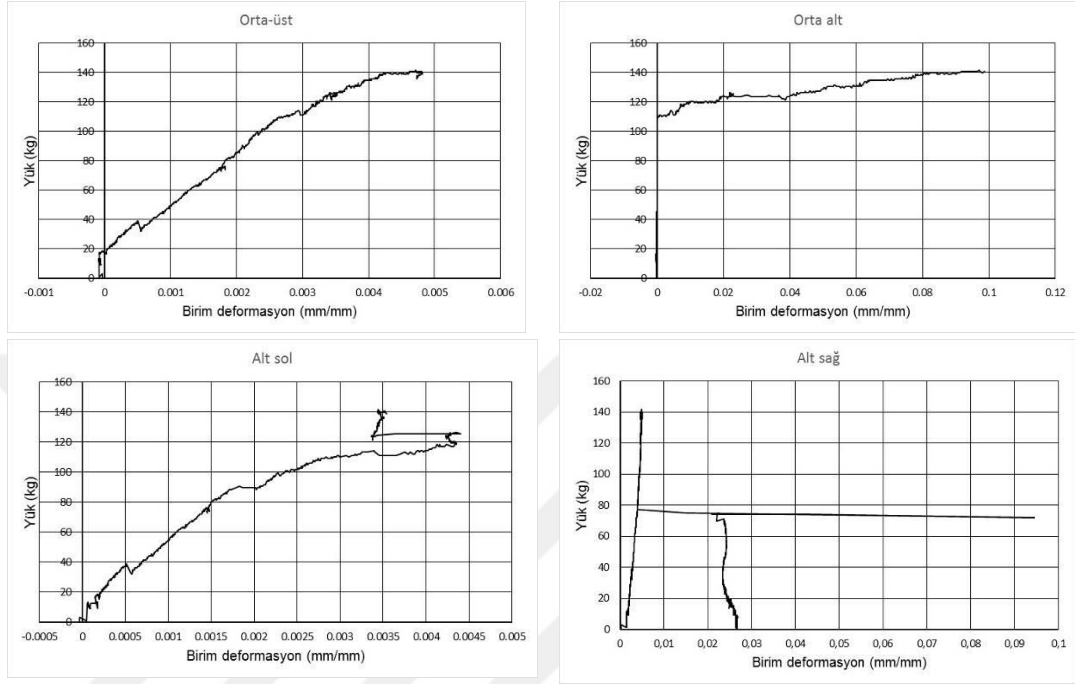


Şekil 3.10 Plakanın maksimum deplasman halinde çekilmiş fotoğrafı (Kişisel arşiv, 2016)



Şekil 3.11 Yük-deplasman eğrisi

Yük-deplasman ölçümleri dışında plakadan birim deformasyon ölçümleri de alınmıştır. Deney elemanlarının birim deformasyon eğrileri Şekil 3.12’de sunulmuştur.



Şekil 3.12 50 mm kalınlığında plaka için yük-birim deformasyon eğrileri

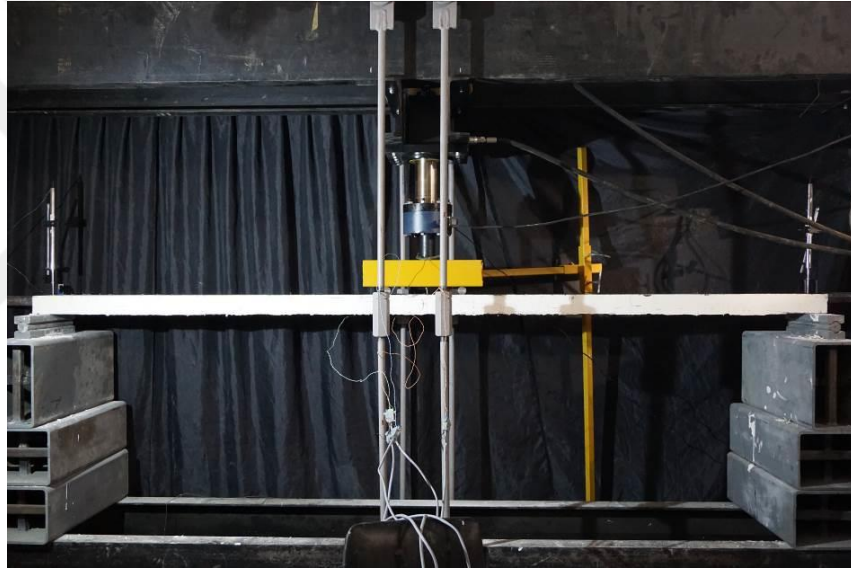
En büyük birim deformasyon plaka ortasında ve beklenildiği üzere plaka alt bölgesinde ölçülmüştür. Çatlağa en yakın olan birim deformasyon ölçerde 0,098 mm/mm birim deformasyon ölçülmüştür. Bu birim deformasyon ölçerde 110 kg yük seviyesine kadar değişim gözlemlenmemiş, bu yük seviyesinden sonra ise ani ve hızlı bir artış gözlenmiştir. İlk çatlak gelişiminden sonra çatlağın bu bölgede benzer genişlikte çok sayıda kılcal çatlak olması birim deformasyonun hızlı bir şekilde artmasına neden olmuştur. Birim deformasyon ölçümüne göre, plaka 50 mm deplasman seviyesine ulaşınca kadar çatlak genişlemeye yaklaşık aynı hızda devam etmiştir.

Plakanın altının sağ yük mesnetine denk gelen ölçüm cihazından çok sağlıklı sonuçlar elde edilmediği Şekil 3.12’den görülmektedir. Orta üst birim deformasyon ölçerde yükteki artışa lineer bir birim deformasyon artışı gözlemlenmiştir. Bu ölçümler alt yüzdeki, aynı lokasyondaki ölçümlere göre oldukça düşüktedir.

Alt sol birim deformasyon ölçer 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.

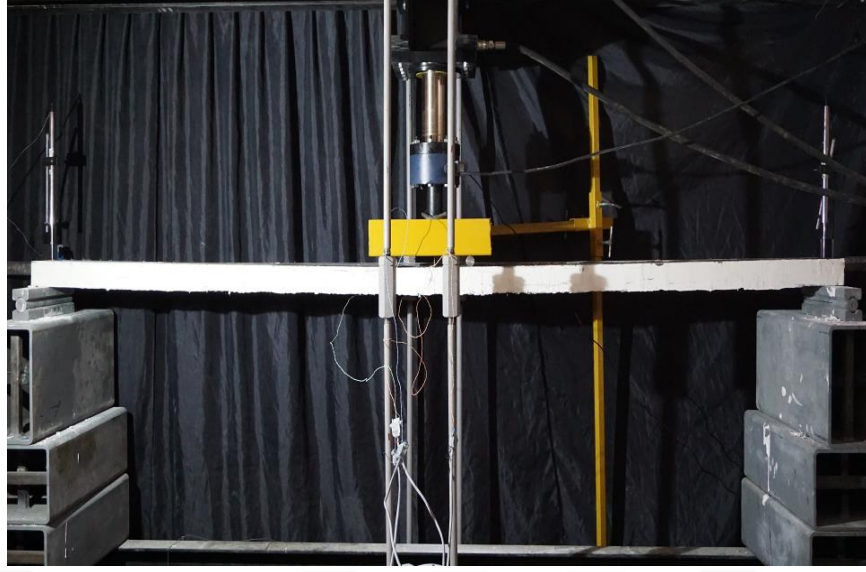
3.4 70 mm Kalınlığa Sahip Plaka Deneyi

70 mm plaka kalınlığına sahip plakanın deney öncesi çekilmiş fotoğrafı Şekil 3.13’de sunulmuştur.



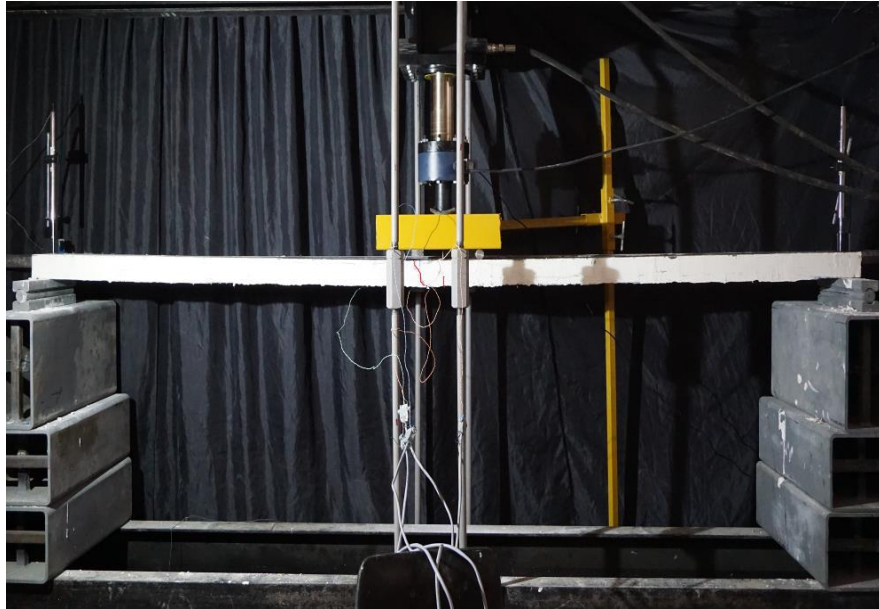
Şekil 3.13 70 mm kalınlığında plaka (Kişisel arşiv, 2016)

Plakada 250 kg yük seviyesine kadar herhangi bir çatlak gözlenmemiştir. Deney elemanı bu yük seviyesine kadar 7 mm deplasman yapmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.14 250 kg yük seviyesinde plaka davranışı (Kişisel arşiv, 2016)

İlk çatlak 253,05 kg yük, 7,07 mm deplasman seviyesinde maksimum moment bölgesinde gelişmiştir. Bu çatlak ile birlikte plakanın rijitliğinde yük-deplasman eğrisinden de görüleceği gibi düşüş meydana gelmiştir. Bu çatlaka rağmen plakanın yük taşıma kapasitesi düşmemiştir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15 Plakada ilk çatlak oluşumu (Kişisel arşiv, 2016)

Plakada 253,05 yük seviyelerinde gelişen çatlakın genişliği 0,7 mm seviyesine 13,28 mm ve 284,11 kg seviyesinde ulaşmıştır. Çatlak plaka üst yüzeyine ulaşırken

dallanmıştır. Çatlağın bir kesitte lokalize olmasından sonra plakada yük düşüşü gözlenmiştir.



Şekil 3.16 Plakanın maksimum deplasman halinde çekilmiş fotoğrafı (Kişisel arşiv, 2016)

Bu yük seviyesinden sonra bu kesitteki çatlağın genişliğinde artış gözlenmiş, yaklaşık 4 mm seviyesine ulaşmıştır. Buna rağmen plaka düşük yük seviyesinde olsa bile yük taşımaya devam etmiş, tamamen kırılmamıştır (Şekil 3.16). Plaka orta deplasmanı 50 mm seviyesine ulaşınca kadar teste devam edilmiştir. Bu deplasman seviyesinde deneye son verilmiştir. Plaka orta bölgesinde lokalize olmuş çatlağının görüntüsü Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.17 Plaka alt yüzündeki çatlak (Kişisel arşiv, 2016)

Deplasman (mm)

Şekil 3.18 Yük-deplasman eğrisi

Yük-deplasman ölçümleri dışında deney elemanından birim deplasman başına yük değeri de alınmıştır. Deney elemanlarının birim deformasyon eğrileri Şekil 3.19'da sunulmuştur.



The figure consists of four sub-graphs, each showing a load-deformation curve for a specific part of a structure. The y-axis for all graphs is 'Yük (kg)' (Load in kg) ranging from 0 to 350. The x-axis is 'Birim deformasyon (mm/mm)' (Unit deformation in mm/mm).

- Orta-üst (Top Middle):** The x-axis ranges from -0.15 to 0.15. The curve shows a sharp increase in load from 0 to about 100 kg at a deformation of 0.01 mm/mm, followed by a plateau and then a sharp drop to 0 at a deformation of 0.05 mm/mm.
- Orta alt (Middle Bottom):** The x-axis ranges from -0.0005 to 0.0035. The curve shows a linear increase in load from 0 to about 250 kg at a deformation of 0.0015 mm/mm, followed by a plateau and then a sharp drop to 0 at a deformation of 0.003 mm/mm.
- Alt sol (Bottom Left):** The x-axis ranges from -0.0005 to 0.004. The curve shows a linear increase in load from 0 to about 250 kg at a deformation of 0.001 mm/mm, followed by a plateau and then a sharp drop to 0 at a deformation of 0.0035 mm/mm.
- Alt sağ (Bottom Right):** The x-axis ranges from -0.0002 to 0.0018. The curve shows a linear increase in load from 0 to about 250 kg at a deformation of 0.0014 mm/mm, followed by a plateau and then a sharp drop to 0 at a deformation of 0.0018 mm/mm.

60

Plakadaki 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.

Plakanın ortasının üst bölgesinde yer alan ölçüm cihazından sağlıklı sonuçlar elde edilememiştir. Plaka 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.

Plaka alt ve sağ bölgesinde yer alan birim deformasyon ölçerde okunan değerler alt bölgedeki diğer birim deformasyon ölçerlerin yaklaşık yarısı kadardır. Benzer genişlikte çok sayıda çatlak bu deformasyon ölçere uzak olmasına rağmen birim deformasyon okunmasına neden olmuştur. Bu da literatürde yer alan genel kanıyı yani birim deformasyon ölçerlerin oluşan çatlağa olan uzaklığına bağlı olarak okunan değerlerde azalma gözlenmediğini kanıtlamaktadır.

Sonuç olarak çalışmada incelenmek üzere kalınlıkları 30 mm, 50 mm ve 70 mm olarak değişen 3 adet 150 x 3000 mm boyutlarında test plakaları üretilmiştir. Deneyler dört noktalı eğilme test düzeneği ile yapılmıştır. Bu testlerin amacı, tam ölçekli plakanın çıplak özelliklerini tanımlamak ve bir güçlendirme elemanı olarak uygulanmadan önce plaka kalınlığının test değerlerine etkisini gözlemlemektir. Kalınlığa bağlı olarak plakaların yük taşıma kapasiteleri ve aynı zamanda davranışları değişmektedir. Plakaların tümünde tipik olarak orta alt bölgede çatlak lokalizasyonu gözlenmiştir. 50 mm ve 70 mm kalınlığa sahip plakalarda ise ciddi lokalize olmuş çatlak gelişimleri gözlenmiştir. Çatlak genişliğinin artmasıyla tüm plakalarda yük kayıpları gözlenmiş, ancak lifler plakaların tamamen kırılmasını engellemiştir. Bu çatlak oluşumuna rağmen deney elemanları kırılmadan 50 mm deplasman seviyesine

ulaşabilmiflerdir. 30 mm kalınlığa sahip plaka ise 98 mm deplasman seviyesine ulaşmış ve daha sünek bir davranış göstermiştir. Böylelikle plaka kalınlıklarının artması sünekliği azaltırken yük taşıma kapasitesi ve rijitliği artmıştır. Eğilme yetersizliğine sahip betonarme kirişlere farklı kalınlıklarda UYPB plaka uygulanması ile farklı dayanım, davranış ve göçme şekilleri elde etmenin mümkün olacağı düşünülmektedir. Gerçekleştirilen plaka deneyleri bundan sonraki deneylere ışık tutacaktır.



BÖLÜM DÖRT

UYPB PLAKA İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERDE EĞİLME DENEYLERİ

4.1 Giriş

Çalışma kapsamında, eğilme dayanımı yetersiz betonarme kiriş elemanlar farklı kalınlıklardaki UYPB plakların yapıştırılmasıyla güçlendirilmiş ve eğilme testleri yapılmıştır. Bu deneylerle UYPB uygulamasıyla eğilme kapasitelerinde elde edilen artışın belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu bölümde, test sonuçları ve deneysel gözlemler ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur. Her deney elemanı için yük-deplasman grafikleri verilmiş, deney elemanlarında gelişen çatlaklar ve göçme şekilleri deneyin anlatımı sırasında ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur.

4.2 Kiriş-1

Kiriş-1 çalışmanın eğilme referans numunesidir. 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 (Kişisel arşiv, 2017)

İlk çatlak, kiriş orta bölgesinde kiriş eksenine dik ve ani olarak gelişim göstermiştir. 1072,74 kg yük ve 1,98 mm deplasman seviyesinde gerçekleşmiştir. Maksimum yükün yaklaşık %25'i kadardır Şekil 4.2'de sunulmuştur.



Şekil 4.2 İlk eğilme çatlakları (Kişisel arşiv, 2017)

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



Şekil 4.3 Kirişte gelişen eğilme çatlakları (Kişisel arşiv, 2017)

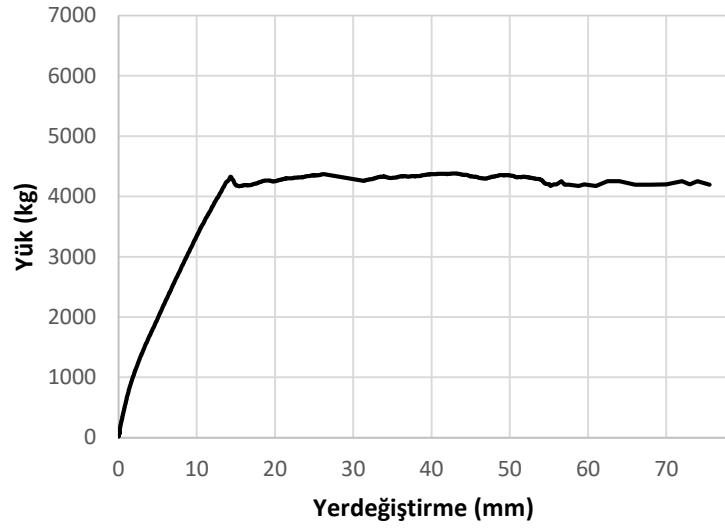
Yük-deplasman eğrisinden de anlaşılabacağı üzere buna bağlı olarak kirişin rijitliğinde azalma meydana gelmiştir. Yük 4406,19 kg ve 14,31 mm deplasman seviyesinde kirişin alt boyuna donatısı akmıştır. Numunenin nihai davranışını görmek için yüklemeye devam edilmiştir. Bu yük seviyesinden sonra kiriş yük tutamaz hale gelmiş ancak deplasman sünek davranışı gösterir şekilde artmaya devam etmiştir.



Şekil 4.4 Kiriş-1 çatlaklarının son hali (Kişisel arşiv, 2017)

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 (Şekil 4.4).

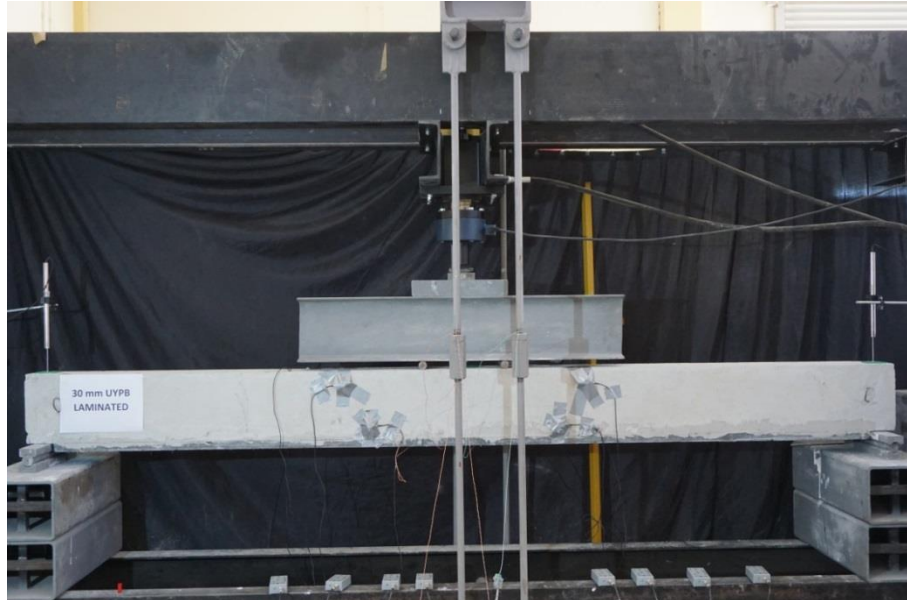
Deneye 75,53 mm deplasman seviyesine kadar devam edilmiştir. Bu deplasman seviyesinde basınç bölgesindeki betonun ezilmesi nedeniyle deneye son verilmiştir. Deney elemanının Yük-deplasman eğrisi Şekil 4.5'te sunulmuştur.



Şekil 4.5 Kiriş-1 Yük-Deplasman eğrisi

4.3 Kiriş-2

Kiriş-2, 30 mm kalınlığa sahip UYPB plaka ile güçlendirilmiş test numunesidir. Deney elemanı artan yükler altında göçme gerçekleşinceye kadar test edilmiştir. Deney elemanının test öncesi durumu Şekil 4.6’da sunulmuştur.



Şekil 4.6 30mm kalınlığa sahip UYPB ile güçlendirilmiş deney elemanı (Kişisel arşiv, 2017)

Deney elemanında yük 2350,45 kg değerine ulaştığı zaman ilk eğilme çatlağı meydana gelmiştir. Maksimum yükün yaklaşık %44'ü kadardır. Kiriş eksenine dik ve ani olarak gelişim gösteren çatlak Şekil 4.7'de sunulmuştur.



Şekil 4.7 İlk eğilme çatlağı (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 4.8 Kiriş-2 plakanın kirişten ayrılmış hali (Kişisel arşiv, 2017)

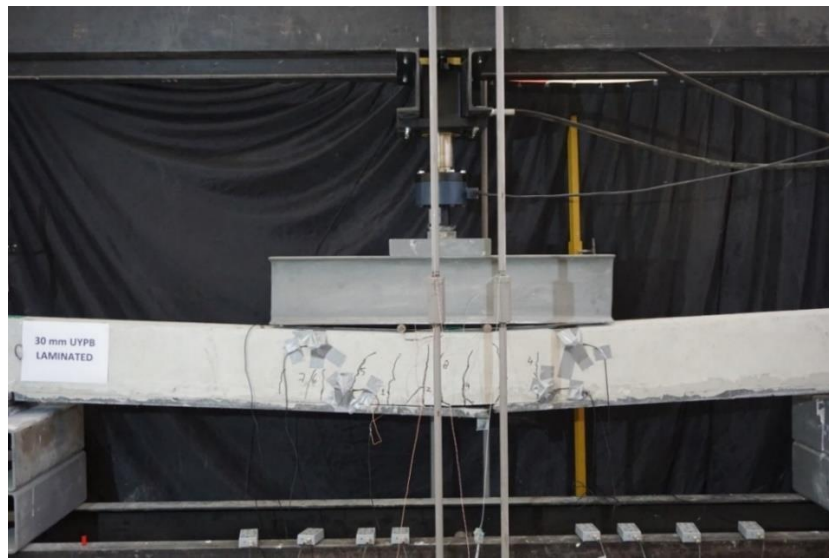
Deney elemanı yük arttıkça yeni eğilme çatlakları meydana gelmiş ve kirişin orta kısmında yoğunlaşmıştır. 4327,67 kg seviyesinde oluşan çatlak ile birlikte yükte ani

düşüş meydana gelmiş ancak UYPB plaka kirişin mevcut durumunu muhafaza etmesini sağlamıştır. Bu azalmadan sonra yük-deplasman eğrisinin eğiminin, çatlaktan önceki eğime göre arttığı görülmektedir. UYPB plakanın katkısıyla numune daha rijit davranmaya başlamıştır.



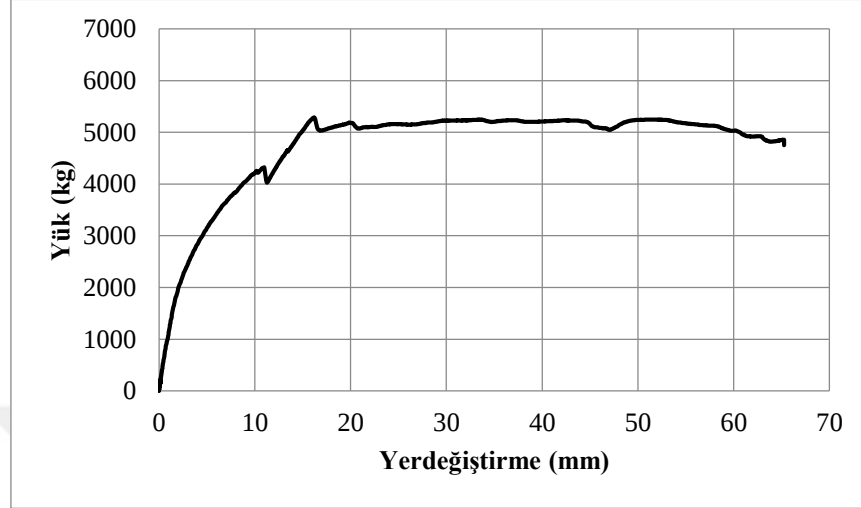
Şekil 4.9 Kiriş-2 çatlak oluşumu (Kişisel arşiv, 2017)

Yük 5361,67 kg seviyelerinde akmaya başlamıştır. Numunenin nihai davranışını görmek için yüklemeye devam edilmiştir.



Şekil 4.10 Kiriş-2 65,22 mm deplasman yapmış hali (Kişisel arşiv, 2017)

65,22 mm değerine kadar ulaştığı zaman numune basınç bölgesinde betonun ezilmesiyle deneye son verilmiştir (Şekil 4.10- 4.11).



Şekil 4.11 Kiriş-2 yük-deplasman eğrisi

Plakada meydana gelen şekil değişimini ölçmek için birim deformasyon ölçerler kullanılmıştır. Plaka ortasının alt yüzüne ve 2 tekil yükün etki ettiği noktanın plakaya denk gelen alt yüzüne birer adet birim deformasyon ölçer yapıştırılmıştır. Maksimum momentin olduğu bu bölgede kırılmanın yoğunlaşacağı düşünüldüğü için birim deformasyon ölçerler bu aralıkta kullanılmıştır. Birim deformasyon ölçerlerden milivolt cinsinden elde edilen veriler Şekil 4.12- 4.13- 4.14'te sunulmuştur.

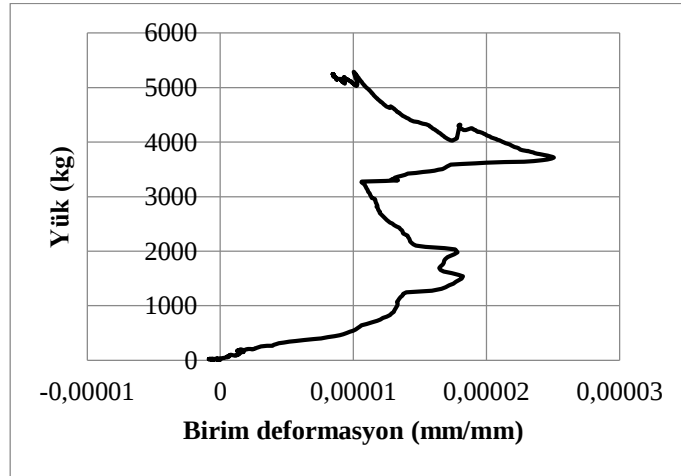
Plakada ana çatlak, kirişe etkiyen 2 tekil yükten sağdakine denk gelecek şekilde gelişmiş, bu kesitte yoğunlaşmış ve plakayı bu kesitten iki parçaya ayırmıştır. Birim deformasyon değerlerinde de bu kırılmayı destekleyecek veriler ölçülmüştür. Çatlağın olduğu kesite denk gelen birim deformasyon ölçerde diğer birim deformasyon değerlerinden çok büyük değerler ölçülmüştür.

Sağ tekil yükün altındaki ölçümde, 4327,67 kg yük seviyesine kadar birim deformasyon değerleri lineer bir artış eğilimi göstermiştir. Bu yük seviyesinde ise birim deformasyon değeri ani olarak iki katından fazla bir değere ulaşmıştır. Bu değer yaklaşık olarak liflerde sıyrılmanın görsel olarak belirlendiği yük seviyesidir. Bu ani artışın akabinde birim deformasyon değerlerinde azalma gözlenmeye başlanmıştır.

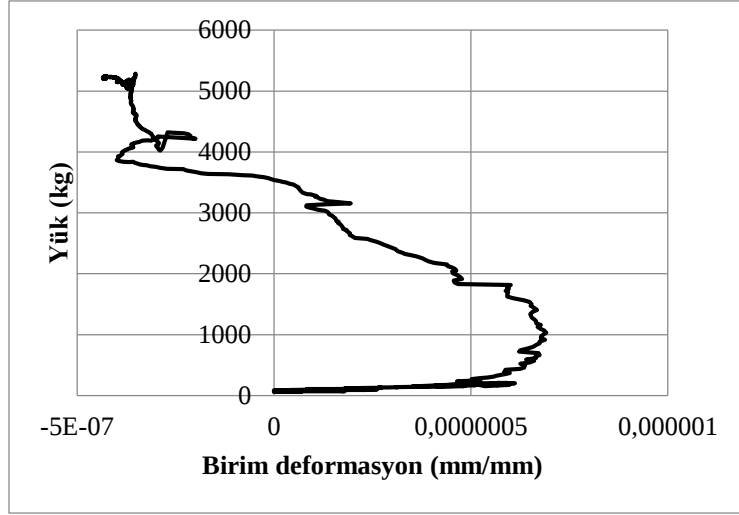
Birim deformasyon ölçer çatlağa çok yakın yerleştirilmiştir. Çatlağın büyümesiyle ve plakanın iki ayrı plaka gibi davranmaya başlamasıyla kendi doğrultusundaki uzama, hemen öncesine göre azalmıştır. Plakada gelişen çatlağın genişliğinin artmasıyla birim deformasyon değerlerinde buna bağlı olarak düşüş devam etmiştir (Şekil 4.12).

Bu kesitlere yakın başka bir çatlak oluşmadığı için diğer iki birim deformasyon ölçerde okunan değerler çok küçüktür. Literatürde, birim deformasyon ölçerin oluşan çatlağa yakınlığına göre daha büyük değerler ölçeceği ilkesi bulunmaktadır. Mevcut ölçümlerde de bu ilkeye uygun değerler elde edilmiştir. Kiriş ortasından yapılan ölçümler, sol tekil yükün altına denk gelen birim deformasyon ölçere göre iki kat büyüklüktedir.

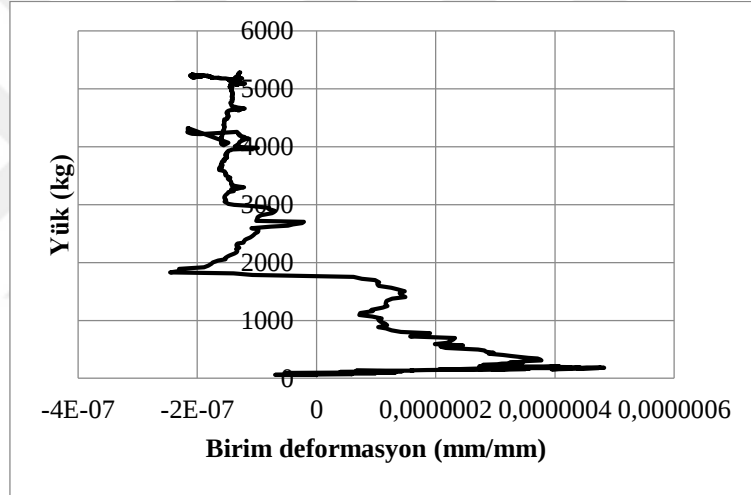
UYPB plakada bu iki deformasyon ölçerlere yakın çatlak oluşmamış ve bu nedenle bunlarda düşük yük seviyelerinde bir gevşeme oluşmuştur. Buna bağlı olarak birim deformasyon ölçerler eksi değerleri yani buruşmayı temsil edecek değerler okumuştur. Yükteki artış ile UYPB plakada gerilmenin artmasıyla gerilme değerleri artı değere yani uzama dönmüştür (Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14).



Şekil 4.12 Kiriş-2 sağ mesnet altı yük-gerilme eğrisi



Şekil 4.13 Kiriş-2 kiriş ortası yük-gerilme eğrisi



Şekil 4.14 Kiriş-2 sol mesnet altı yük-gerilme eğrisi

4.4 Kiriş-3

Kiriş-3 50 mm kalınlığa sahip UYPB ile güçlendirilmiş test numunesidir. Deney elemanı eğilme dayanımı düşük olacak şekilde tasarlanan kirişe 50 mm kalınlığa sahip UYPB plaka yapıştırılarak güçlendirilmiştir. Deney elemanının test öncesi durumu Şekil.4.15'te sunulmuştur. Deney elemanı artan yükler altında göçme gerçekleşinceye kadar test edilmiştir.



Şekil 4.15 50mm kalınlıĝa sahip UYPB ile güçlendirilmiş deney elemanı (Kişisel arşiv, 2017)

Deney elemanında ilk çatlak maksimum dayanımın yaklaşık %55'inde, kiriş orta bölgesinde, 3785,19 kg yük seviyesinde gerçekleşmiştir. Kiriş eksenine dik ve ani olarak gelişim gösteren çatlak Şekil 4.16'da sunulmuştur.



Şekil 4.16 İlk eĝilme çatlaĝı (Kişisel arşiv, 2017)

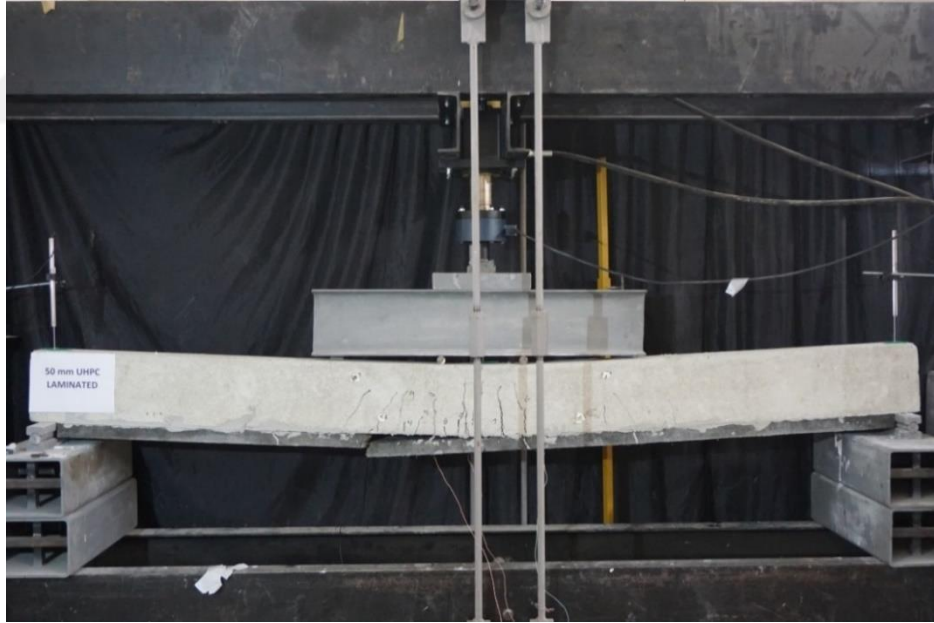


Şekil 4.17 Kiriş-3 plakanın kirişten ayrılmış hali (Kişisel arşiv, 2017)

Uygulanan yükün artmasıyla kiriş ortasında oluşan kılcal çatlakların sayısında artış gözlenmiştir. 4504,09 kg değerinde UYPB plakanın kirişten ayrılması esnasında dikkate değer sesler duyulmuştur. Ancak UYPB plaka iki parçaya ayrılana kadar plakanın yük taşıma kapasitesine katkısı devam etmiştir. 50 mm kalınlıklı UYPB plaka 6931,01 yük seviyesinden sonra kirişten ayrılmıştır. Bu yük seviyesinden sonra plaka ve kiriş iki ayrı eleman gibi davranış göstermeye başlamış ve yük-deplasman eğrisinde de görüldüğü üzere yük, referans kiriş seviyesine kadar düşmüştür.

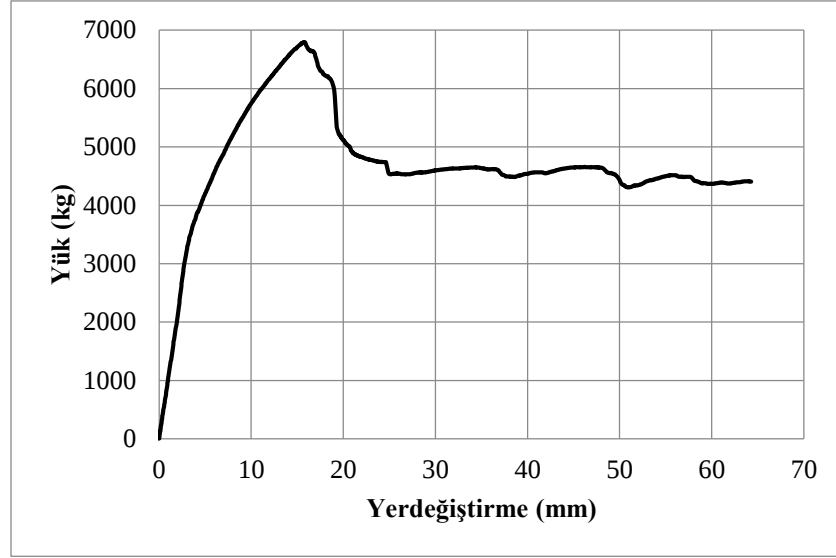


Şekil 4.18 Kiriş-3 çatlak oluşumu (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 4.19 Kiriş-3 66,45 mm deplasman yapmış hali (Kişisel arşiv, 2017)

Kiriş, UYPB plakanın katkısını kaybettikten sonra 4710,07 kg yük seviyesine inmiştir. Epoksi ile yapıştırılan UYPB plaka kiriş yüzeyinden ayrılmamış ve 66,45 mm'ye kadar deplasman yapmaya devam etmiştir. (Şekil 4.18 - 4.19).



Şekil 4.20 Kiriş-3 yük-deplasman eğrisi

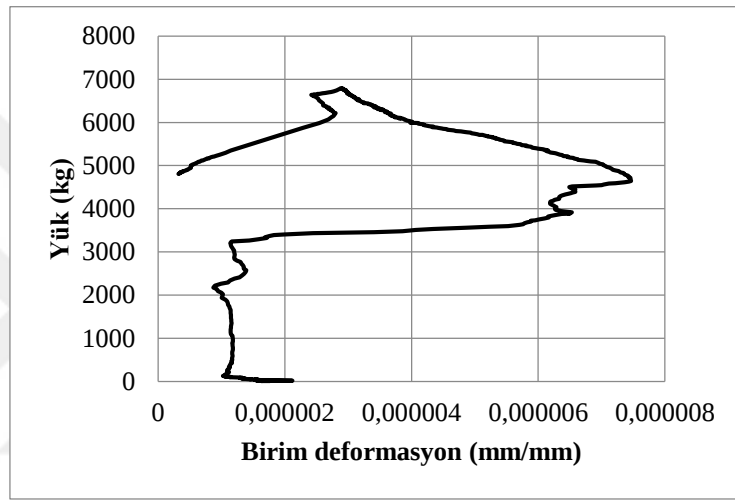
Plakalarda meydana gelen şekil değişimini ölçmek için birim deformasyon ölçerler kullanılmıştır. Plaka ortasının alt yüzüne ve 2 tekil yükün etki ettiği noktanın plakaya denk gelen alt yüzüne birer adet birim deformasyon ölçer yapıştırılmıştır. Maksimum momentin olduğu bu bölgede kırılmanın yoğunlaşacağı düşünüldüğü için birim deformasyon ölçerler bu aralıkta kullanılmıştır. Birim deformasyon ölçerlerden milivolt cinsinden elde edilen veriler Şekil 4.21, 4.22, 4.23'de sunulmuştur.

Plakada ana çatlak, kirişe etkiyen 2 tekil yükten soldakine denk gelecek şekilde gelişmiş, bu kesitte yoğunlaşmış ve plakayı bu kesitten iki parçaya ayırmıştır. Birim deformasyon değerlerinde de bu kırılmayı destekleyecek veriler ölçülmüştür. Çatlağın olduğu kesite denk gelen birim deformasyon ölçerde diğer birim deformasyon değerlerinden çok büyük değerler ölçülmüştür.

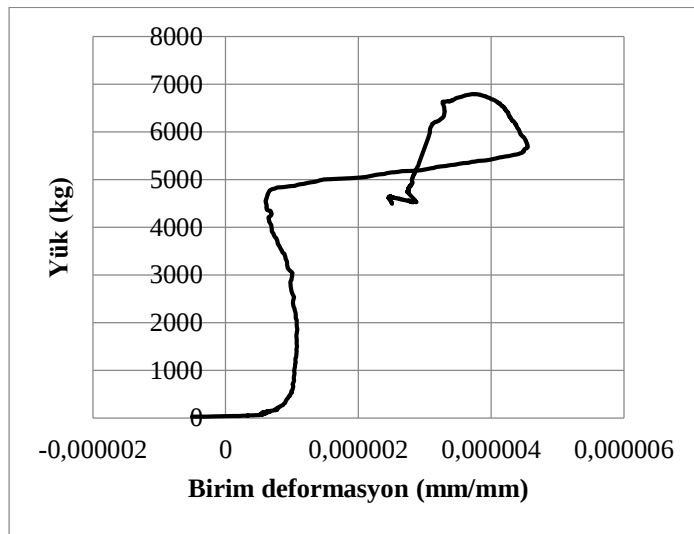
Sağ tekil yükün altındaki ölçümde, 6931,01 kg yük seviyesine kadar birim deformasyon değerleri lineer bir artış eğilimi göstermiştir. Bu yük seviyesinde ise birim deformasyon değeri ani olarak dört katından daha fazla bir değere ulaşmıştır. Bu değer yaklaşık olarak liflerde sıyrılmanın görsel olarak belirlendiği yük seviyesidir. Bu ani artışın akabinde birim deformasyon değerlerinde azalma gözlenmeye başlanmıştır. Birim deformasyon ölçer çatlağa çok yakın yerleştirilmiştir. Çatlağın büyümesiyle ve plakanın iki ayrı plaka gibi davranmaya başlamasıyla kendi

doğrultusundaki uzama, hemen öncesine göre azalmıştır. Plakada gelişen çatlağın genişliğinin artmasıyla birim deformasyon değerlerinde buna bağlı olarak düşüş devam etmiştir (Şekil 4.21).

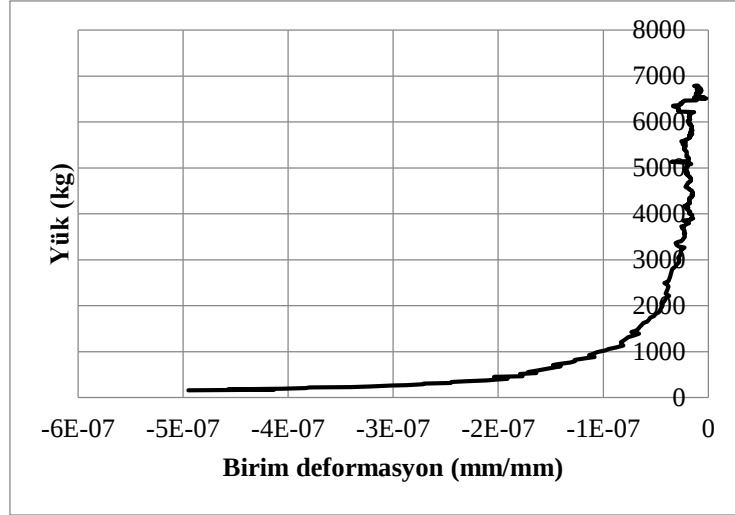
Bu kesitlere yakın olarak orta mesnetteki birim deformasyon ölçerle okunan değerlerde sol mesnete oranla fazladır. Literatürde, birim deformasyon ölçerin oluşan çatlağa yakınlığına göre daha büyük değerler ölçeceği ilkesi bulunmaktadır. Mevcut ölçümlerde de bu ilkeye uygun değerler elde edilmiştir.



Şekil 4.21 Kiriş-3 sağ mesnet altı yük-gerilme eğrisi



Şekil 4.22 Kiriş-3 kiriş ortası yük-gerilme eğrisi



Şekil 4.23 Kiriş-3 sol mesnet altı yük-gerilme eğrisi

4.5 Kiriş-4

Kiriş-4, 70 mm kalınlığa sahip UYPB ile güçlendirilmiş test numunesidir. Deney elemanı 70 mm kalınlığa sahip UYPB plaka yapıştırılarak güçlendirilmiştir. Artan yükler altında göçme gerçekleşinceye kadar test edilen deney elemanının test öncesi durumu Şekil 4.24’te sunulmuştur.

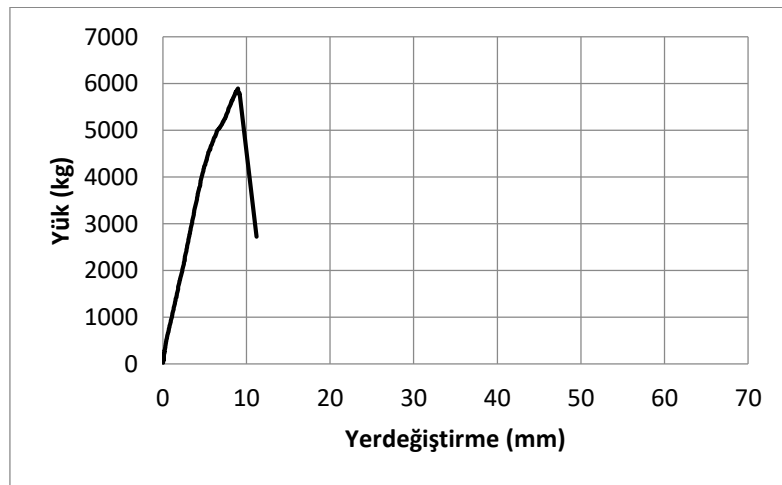


Şekil 4.24 70mm kalınlığa sahip UYPB ile güçlendirilmiş deney elemanı (Kişisel arşiv, 2017)

Deney elemanında ilk eğilme çatlağı 5612,11 kg yük seviyesinde gelişmiştir. Bu yük seviyesinde orta mesnette 8,20 mm deplasman ölçülmüştür. Bu değer maksimum yükün yaklaşık %95'i kadardır. Bu esnada liflerden ses gelmeye başladığı anda (lifler devereğe girdiği anda) maksimum yük olan 5896,22 kg, 8,97 mm deplasman seviyesinde ani ve sesli olarak 70 mm kalınlıklı UYPB plaka kirişin arayüzünden ayrılmıştır. 11,21 mm deplasman ve 2723,71 kg seviyesinde diğer elemanlara göre gevrek davranış göstermiş ve göçme meydana gelmiştir.



Şekil 4.25 Kiriş-4 plakanın kirişten ayrılmış hali (Kişisel arşiv, 2017)



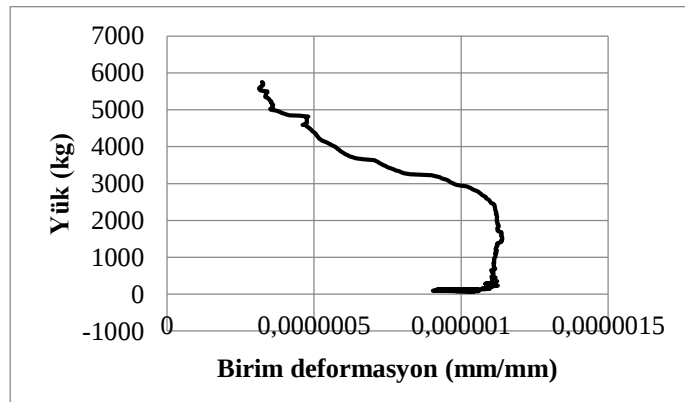
Şekil 4.26 Kiriş-4 yük-deplasman eğrisi

Plakalarda meydana gelen şekil değişimini ölçmek için birim deformasyon ölçerler kullanılmıştır. Plaka ortasının alt yüzüne ve 2 tekil yükün etkidiği noktanın plakaya denk gelen alt yüzeyine birer adet birim deformasyon ölçer yapıştırılmıştır. Maksimum momentin olduğu bu bölgede kırılmanın yoğunlaşacağı düşünüldüğü için birim deformasyon ölçerler bu aralıkta kullanılmıştır. Birim deformasyon ölçerlerden milivolt cinsinden elde edilen veriler Şekil 4.27, 4.28, 4.29’da sunulmuştur.

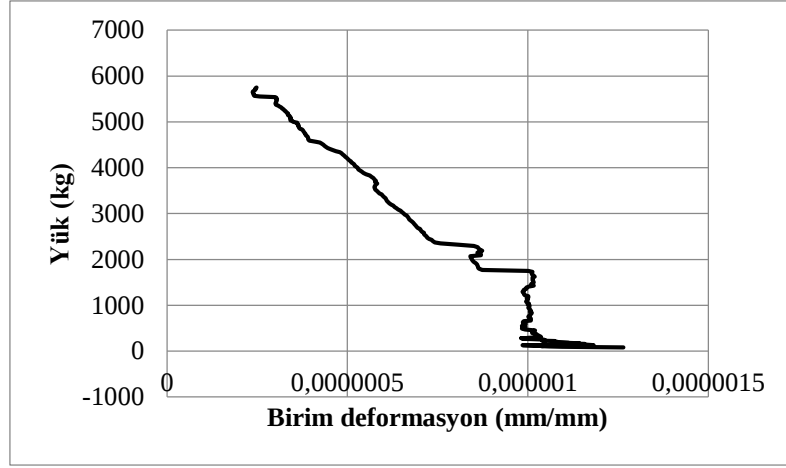
Plakanın sağ taraftan ayrılması ile sağ mesnetteki birim deformasyon ölçerennyüksek değeri göstermiş bunu orta mesnet ve sol mesnet takip etmiştir. Çatlağın olduğu kesite denk gelen birim deformasyon ölçerde diğer birim deformasyon değerlerinden daha büyük değerler ölçülmüştür.

Sağ tekil yükün altındaki ölçümde, 5612,11 kg yük seviyesine kadar birim deformasyon değerleri lineer bir artış eğilimi göstermiştir. Bu yük seviyesinde ise birim deformasyon değeri ani olarak iki katına yakın bir değere ulaşmıştır. Bu değer yaklaşık olarak liflerde sıyrılmanın görsel olarak belirlendiği yük seviyesidir. (Şekil 4.27).

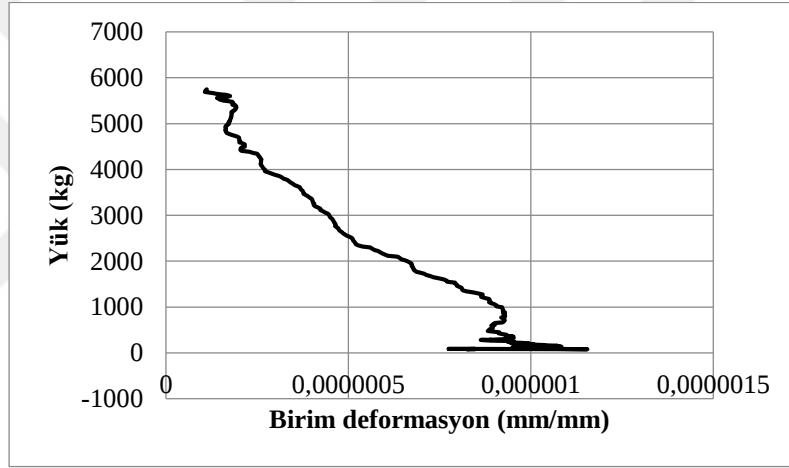
Bu kesitlere yakın olarak orta mesnetteki birim deformasyon ölçerde okunan değerlerde sol mesnete oranla fazladır. Literatürde, birim deformasyon ölçerin oluşan çatlağa yakınlığına göre daha büyük değerler ölçeceği ilkesi bulunmaktadır. Mevcut ölçümlerde de bu ilkeye uygun değerler elde edilmiştir.



Şekil 4.27 Kiriş-4 sağ mesnet altı yük-gerilme eğrisi



Şekil 4.28 Kiriş-4 kiriş ortası yük-gerilme eğrisi

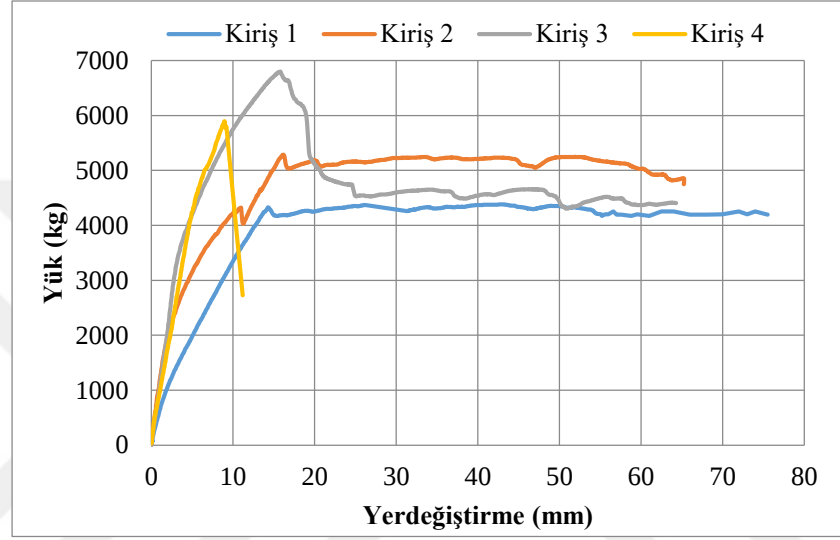


Şekil 4.29 Kiriş-4 sol mesnet altı yük-gerilme eğrisi

BÖLÜM BEŞ

DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde deney sonuçları; dayanım ve davranış, süneklik, enerji tüketimi ve rijitlik başlıkları altında değerlendirilmiştir. Test sonuçları UYPB eleman kalınlıklarına göre gruplandırılarak, irdelenmiştir.



Şekil 5.1 UYPB ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin yük-deplasman eğrileri

Kirişlerin eğilme testlerinden elde edilen karakteristik değerler Tablo 5.1’de sunulmuştur.

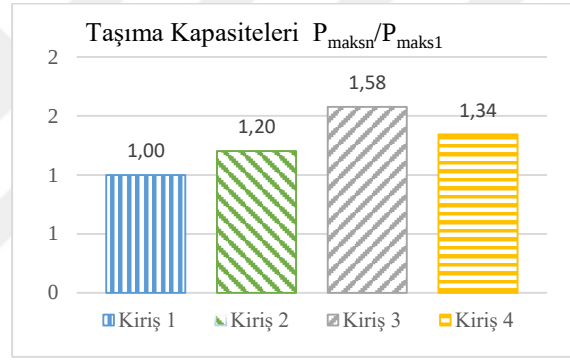
Tablo 5.1 Kirişlerin eğilme testlerinden elde edilen karakteristik değerler

Kiriş No	P_{cr} (kg)	Δ_{cr} (mm)	P_y (kg)	Δ_y (mm)	P_{maks} (kg)	P_u (kg)	Δ_u (mm)	Δ_u / Δ_y	E (kgmm)	E_u / E_1
Kiriş-1	1072,74	1,98	4406,19	14,31	4391,28	4278,73	75,53	5,28	269500,74	1,00
Kiriş-2	2350,45	2,74	5361,67	16,29	5285,79	4947,66	65,22	4,00	315989,60	1,17
Kiriş-3	3785,19	3,91	4700,89	24,79	6931,01	4484,71	66,45	2,68	287243,80	1,07
Kiriş-4	5612,11	8,20	-	-	5896,22	2723,71	11,21	-	27122,61	0,10

5.1 Dayanım ve Davranış

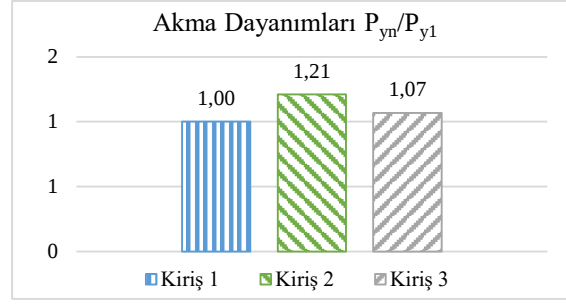
Dayanım, güçlendirme yöntemi ile elde edilen katkının değerlendirilmesinde kullanılan önemli bir parametredir. Çalışmada deney elemanlarının eğilme dayanımlarını değerlendirmek için yük-deplasman eğrileri kullanılmıştır. Ayrıca deney elemanlarının maksimum yük düzeyindeki deplasman değerleri de karşılaştırılmıştır.

Kiriş-2, Kiriş-3 ve Kiriş-4'te UYPB plaka betonarme kirişlere epoksi yardımıyla yapıştırılmıştır. Uygulanan UYPB plakalar erken yük seviyesinde bir ve birden fazla parçaya kırılmasından sonra deney elemanları eğilme kapasitelerine ulaşmışlardır.



Şekil 5.2 UYPB kalınlıklarının yük taşıma kapasitesine etkisi

Şekil 5.2'de UYPB plaka uygulaması ile dayanım açısından elde edilen katkı sunulmuştur. Kiriş 3 referans elemana göre taşıma kapasitesinde %58 oranında artış sağlanmıştır. Bu değer çalışmada elde edilen en büyük dayanım artışıdır. Kiriş 4 %34'lük ve Kiriş 2 %20'lik artış sağlamıştır.



Şekil 5.3 UYPB kalınlıklarının akma dayanımlarının karşılaştırılması

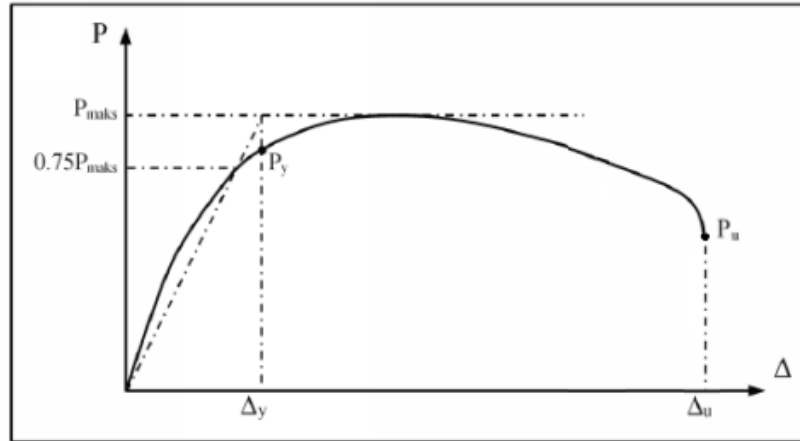
Kiriş 2 ve Kiriş 3'ün akma dayanımları sırasıyla 1,21 ve 1,07'dir. Elemanların plastik şekil değiştirmeye başladığı gerilme, akma dayanımıdır. UYPB plaka uygulaması betonarme kirişlerde yük taşıma kapasitesini arttırmış ve bu durum akma dayanımlarının da artmasına sebep olmuştur. UYPB plaka uygulaması ile referans elemana göre sırasıyla %21 ve %7 oranında artış meydana gelmiştir. Kiriş 4'te gevrek kırılma gerçekleşmiştir.

Sonuç olarak, UYPB kalınlığının artmasıyla uygulandığı elemanın kesit yüksekliğini doğrudan artırılacağı da göz önünde bulundurulduğunda dayanımda artış beklenmesi normaldir. Ancak elde edilen artışın tek nedeni bu değildir. Eğilme bölgesine yapıştırılan üstün özellikli beton yeni bir kompozit kiriş oluşumuna neden olmuştur. Eğilme bölgesine yapıştırılan UYPB plakanın kalınlığının artmasıyla plakanın rijitliği artmış böylece betonarme kiriş ve plaka arasında deplasman farklı olmuştur. İki farklı rijitliğe sahip malzemenin farklı deplasman yapma isteği nedeniyle eğilme yükleri altında tüm yük epoksi arayüzünde yoğunlaşmış ve epoksi aracılığı ile aktarılmaya çalışılmıştır. Epoksi taşıyabileceğinden daha fazla kayma gerilmesine maruz kaldığında UYPB plaka yüzeyden ayrılmıştır. Kiriş 4'de meydana gelen ani kırılmanın nedeni budur. Görüldüğü üzere plaka kalınlığı belli bir seviyenin üzerine çıktığında davranışı olumsuz etkilemiş, kiriş sünek eğilme davranışından gevrek duruma geçmiştir.

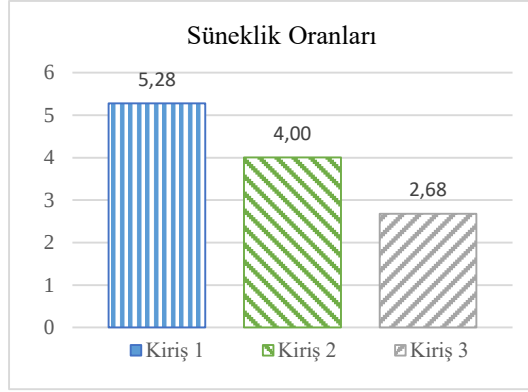
5.2 Süneklik

Genel anlamda süneklik, “dayanımda önemli bir azalma olmadan, büyük deformasyon yapabilme yeteneği” olarak tanımlanabilir. Ayrıca süneklik, plastik deformasyon yapabilme yeteneği olarak da tanımlanabilir.

UYPB kalınlık değişiminin süneklik üzerindeki etkisini belirleyebilmek için deney elemanlarının deplasman süneklikleri belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bunun için öncelikle yük-düşey yerdeğiştirme ilişkileri kullanılarak akma yükü (P_y), maksimum yerdeğiştirmeye karşılık gelen yük taşıma kapasitesi (P_u), akma yerdeğiştirmesi (Δ_y) ve maksimum yerdeğiştirme (Δ_u) değerleri yük deplasman eğrisinden elde edilmiştir. Akma yerdeğiştirmesinin belirlenmesinde, ideal elasto-plastik davranıştaki akmayı esas alan azaltılmış rijitlik yaklaşımı kullanılmıştır (Park, 1988; Türker ve diğer. 2016). Bu yaklaşımda akma yerdeğiştirmesi (Δ_y), kirişin maksimum yük taşıma kapasitesinin (P_{maks}) %75'ine karşılık gelen nokta ile yük-yerdeğiştirme eğrisinin başlangıç noktasını birleştiren bir doğrunun yardımıyla geometrik olarak belirlenmektedir (Şekil 5.4).



Şekil 5.4 Akma yer değiştirmesinin belirlenmesi (Park, 1988)



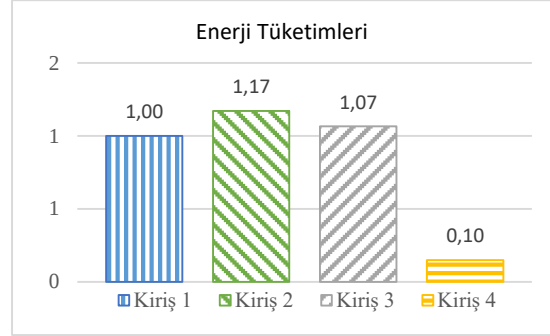
Şekil 5.5 UYPB kalınlıklarının süneklik üzerindeki etkisinin karşılaştırılması

Süneklik oranı; maksimum yerdeğiştirme değeri ile akma anına karşılık gelen yerdeğiştirme değerinin oranlanması ile hesaplanmıştır. Referans kiriş olan Kiriş 1'in yaptığı en fazla yerdeğiştirme 75,53 mm ile deneysel programda da elde edilen en yüksek yer değıştirme değeridir. Buna uygun olarak süneklik oranı da 5,28 ile en yüksek süneklik oranıdır. Kiriş 2 ve Kiriş 3'ün deplasman süneklikleri sırasıyla 4,00 ve 2,68'dir. UYPB plaka uygulaması ile referans elemana göre %76 ve %51 süneklik oranlarında azalma meydana gelmiştir. UYPB plaka betonarme kiriş ile birlikte çalışarak yük taşıma kapasitesini arttırmış ve elemanlardaki kalınlık değişimi referans kirişe göre deplasman yapma kapasitelerinde azalmaya sebep olmuştur. Eğilme bölgesine yapıştırılan UYPB plakanın kalınlığının artmasıyla eleman daha rijit hale gelmiştir. Eğilme dayanımı yetersiz kirişe yapıştırılan bu plakalar, eğilme bölgesinde rijit bir levha gibi davranarak kirişin deplasman yapma kapasitesini azaltmıştır. Bu da dayanımı artan elemanların deplasman sünekliklerinin düşmesine neden olmuştur.

Süneklik genel olarak kırılmadan önce büyük plastik deformasyonlara uğrayabilme özelliği olarak tanımlanabilir. Ancak eğer deprem yükleri altında yapının taşıma kapasitesi yeterli değilse, süneklik miktarı bu enerjiyi sönümlemede yeterli olmayacaktır. Bu yapının dayanımını önemli ölçüde azaltan bir sorundur. Yapının deprem yükleri altında yeterli dayanıma sahip olabilmesi için hem sünek hem de taşıma kapasitesinin yeterli olması gereklidir. Elemanların sünekliğini değerlendirirken sadece süneklik oranını karşılaştırmak yeterli olmayacaktır. Elemanların süneklik miktarını değerlendirirken süneklik oranına ek olarak enerji tüketimlerinin de değerlendirilmesi gerekmektedir.

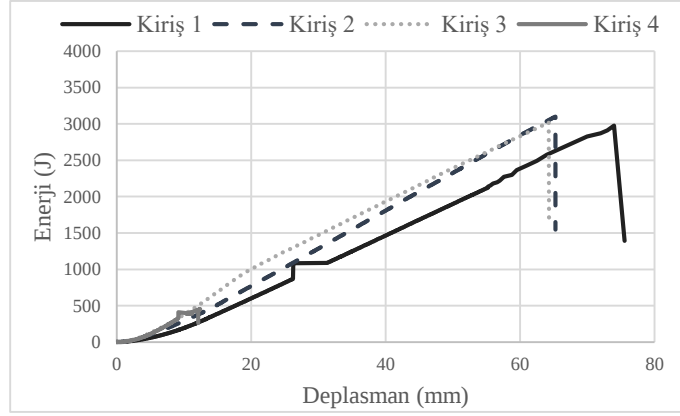
5.3 Enerji Tüketimleri

Enerji tüketimi; deney elemanlarına uygulanan yük sonucunda çizilen yük-deplasman grafiklerinde oluşan kapalı alanın hesaplanmasıyla elde edilmiştir. Deney elemanlarının enerji tüketimleri göçmede hesaplanmıştır (Tablo 5.1).



Şekil 5.6 UYPB kalınlıklarının enerji tüketimlerinin karşılaştırılması

Deney elemanlarının birikimli enerji tüketim oranları Şekil 5.6’da sunulmuştur. Deney elemanlarında süneklik oranlarının azalmasına rağmen taşıma kapasiteleri arttığı için enerji yutma kapasiteleri de artmıştır. En fazla enerjiyi Kiriş 2 tüketmiştir. Kiriş 2; 310703,03 kgmm enerji tüketmiştir. Deney elemanı referans elemanından 1,17 kat fazla enerji tüketmiştir. Bunu 1,07 kat ile Kiriş 3 takip etmiştir. Deney programında en az enerjiyi Kiriş 4 tüketmiştir. Deney elemanı referans elemandan %90 daha az enerji tüketmiştir. 70 mm kalınlığa sahip UYPB plaka betonarme kirişe yapıştırıldığında, deney elemanının deplasman yapma kapasitesini sınırlandırmış bu nedenle eleman 27122,61 kgmm enerji tüketerek ani ve sesli olarak gevrek bir şekilde göçmüştür.



Şekil 5.7 UYPB kalınlıklarına göre enerji-deplasman grafiği

Deney elemanlarının enerji-deplasman grafiği Şekil 5.7'de sunulmuştur. Deney elemanlarının enerji tüketimlerinin karşılaştırılması için birikimli enerji tüketim grafikleri oluşturulmuştur. Grafiklerde düşey ekseninde birikimli enerji tüketimleri, yatay ekseninde elemanların deplasmanları verilmiştir.

UYPB kalınlığının artmasıyla dayanımı artan deney elemanlarında deplasman süneklikleri azalsa bile, dayanım artışına paralel bir şekilde enerji yutma kapasitesi artışı gözlenmemiştir. Kiriş 3 Kiriş 2'ye göre daha az enerji tüketmiştir. Kiriş 4'te UYPB plaka kalınlığının artmasıyla rijitlik artmakta ve elemanların deplasman yapma kapasiteleri azalmaktadır. Bu da elemanların enerji yutma kapasitelerini azaltmaktadır.

5.4 Rijitlik

Deney elemanlarının rijitlikleri yük deplasman grafikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Rijitlik, belirlenen yük düzeyinin, grafiğin orijinine birleştirilmesi ile elde edilen doğrunun eğimidir. Rijitlikler başlangıç yük düzeyi ve akma yük düzeyi için hesaplanmıştır. Başlangıç rijitliği, deney elemanı test edilirken oluşan ilk eğilme çatlağının yük düzeyi için hesaplanmıştır.

UYPB kalınlık değişiminin rijitlik üzerindeki etkisini belirleyebilmek için deney elemanlarının başlangıç ve akma rijitlikleri belirlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bunun için öncelikle yük-düşey yerdeğiştirme ilişkileri kullanılarak ilk eğilme çatlağının

yükü (P_{cr}), ilk eğilme çatlağına karşılık gelen yerdeğiştirme (Δ_{cr}) değeri ve akma yükü (P_y), akma yerdeğiştirmesi (Δ_y) değerlerinin orjin noktasıyla birleşmesinden oluşan eğrinin eğimi olarak elde edilmiştir.

Tablo 5.2 Deney elemanlarının rijitlik değerleri

Kiriş No	Başlangıç Rijitliği (kg/mm)	Akma Rijitliği (kg/mm)	(K _n */K ₁) Oranı	
			Başlangıç	Akma
1	541,79	307,91	1,00	1,00
2	857,83	329,14	1,58	1,07
3	968,08	189,67	1,79	0,62
4	684,40	-	1,26	-

* K_n = n numaralı deney elemanının rijitliği

Kiriş 2 ve 3 ve 4'ün, referans deney elemanına oranla başlangıç rijitliklerinde sırasıyla %58, %79 ve %26 oranında artış meydana gelmiştir. En büyük başlangıç rijitliğine sahip eleman 1,79 ile Kiriş 3'tür. Kiriş 3 aynı zamanda en yüksek taşıma kapasitesine de sahip olan elemandır. UYPB plaka ile güçlendirilen kirişlerin hem dayanımları hem de başlangıç rijitleri artmıştır.

Kiriş 2 ve Kiriş 3'ün akma rijitlikleri sırasıyla 1,07 ve 0,62'dir. UYPB plaka uygulaması betonarme kirişlerde yük taşıma kapasitesini artmasına sebep olmuştur.

Eğilme dayanımı yetersiz kirişe yapıştırılan bu plakalar, eğilme bölgesinde rijit bir levha gibi davranmasını sağlamıştır. UYPB plaka betonarme kiriş ile birlikte çalışarak yük taşıma kapasitesini arttırmış ve elemanlardaki kalınlık değişimi referans kirişe göre rijitlik artışına sebep olmuştur.

Sonuç olarak bu uygulama elemanın dayanım ve davranışının yanında başlangıç rijitliğini de önemli oranda artırmıştır. Uygulanan UYPB lamine ile belli farklı oranda dayanımı artan deney elemanlarının başlangıç rijitlikleri de artmıştır.

Boyuna donatı akma dayanımına ulaşınca kadar oluşan çatlak sayısı veya genişliği artıkça elemanın akma rijitliği düşmektedir.



BÖLÜM ALTI

ANALİTİK ÇALIŞMA

Sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilen doğrusal olmayan analiz, betonarme elemanların davranışlarının tahmin edilmesinde başarılı bir yöntemdir. Bu yöntem kullanılarak geliştirilen programlar içerisinde ANSYS Sonlu Elemanlar Programı, malzeme tanımlanmasındaki başarısından dolayı literatürde tercih edilmektedir (Barbosa ve Ribeiro, 1998; Ashour ve Morley, 1993).

Bu çalışmada yapılan kabuller şunlardır.

- (a) Plak kalınlığının orta noktalarının geometrik yerleri bir düzlem oluşturur ve plak geometrisi başlangıçta düz konumda olup Plak üzerine gelen yükler plak orta düzlemine diktir.
- (b) Plak kalınlığı, diğer boyutların yanında çok küçüktür.
- (c) Sehimler bir başka deyişle plak düzleminde oluşacak olan çökmeler, plak kalınlığı yanında çok küçüktür.
- (d) Malzeme homojen, izotrop ve Hook yasasına uyan lineer-elastik malzemedir.
- (e) Saint Venant ilkesi geçerlidir. Buna göre ele alınan modelde statik değişiklikler dar bir bölge içerisinde kalmaktadır.
- (f) Bernoulli-Navier hipotezi geçerlidir. Düzlem kesitlerin, deformasyondan sonra da düzlem kalmaya devam edeceği ve elastik eğriye dikliğini koruduğu kabul edilecektir.
- (g) Kirchhoff – Love Hipotezi geçerlidir. Bir başka deyişle plak orta düzlemine dik bir doğru üzerinde bulunan noktalar şekil değiştirmeden sonra da şekil değiştirmiş şeklin orta düzlemine dik kalır. Bu nedenle Plak düzlemindeki kuvvetlerin etkisi

altında plak orta düzleminde bir başka değişle tarafsız düzlemde deformasyon olmadığı kabul edilir.

(h) Plak orta düzlemine (tarafsız eksenine) dik doğrultudaki σ_z normal gerilmeleri, σ_x ve σ_y gerilmeleri yanında yok denebilecek kadar küçüktür. Bu sebeple σ_z sıfır alınabilir.

(g) σ_z ve μ sıfır'a eşit olduğundan $\varepsilon_z \approx 0$ alınabilir. (i) Yukarıdaki varsayım gereğince $\varepsilon_z \approx 0$ alınabilir. Ayrıca $\sigma_z \approx 0$ ve $\mu \approx 0,20$ olduğundan $\varepsilon_z \approx 0$ alınabilir.

(j) Plak düzlemindeki kuvvetlerin etkisi altında plak orta düzleminde (tarafsız ekseninde) deformasyon olmadığı kabul edilir. Böylece birim boy ve açı değişimleri yaklaşık sıfır kabul edilir (Timeshenko ve Woinowsky-Krieger, 1959; Ugural, 1999).

Çalışmada doğrusal olmayan analiz için yapılan yaklaşım ve varsayımlar şu şekildedir. Öncelikle hesaplamalarda beton ile donatı arasında tam aderans sağlandığı kabul edilmiştir. Bu nedenle beton ve donatı arasında yeni bir eleman, yay tanımlanmamıştır. Beton ve donatının malzeme modelleri ve rijitlikleri ayrı ayrı tanımlanmıştır. Epoksinin çekme ve basınç kuvvetleri altında benzer davranış sergilediği kabul edilmiştir. Epoksi için yeni bir eleman tanımlamak yerine betonarme kirişin çekme yüzeyi ile UYPB plakanın basınç yüzeylerine kontak tipi olarak bonded tanımlaması yapılmıştır.

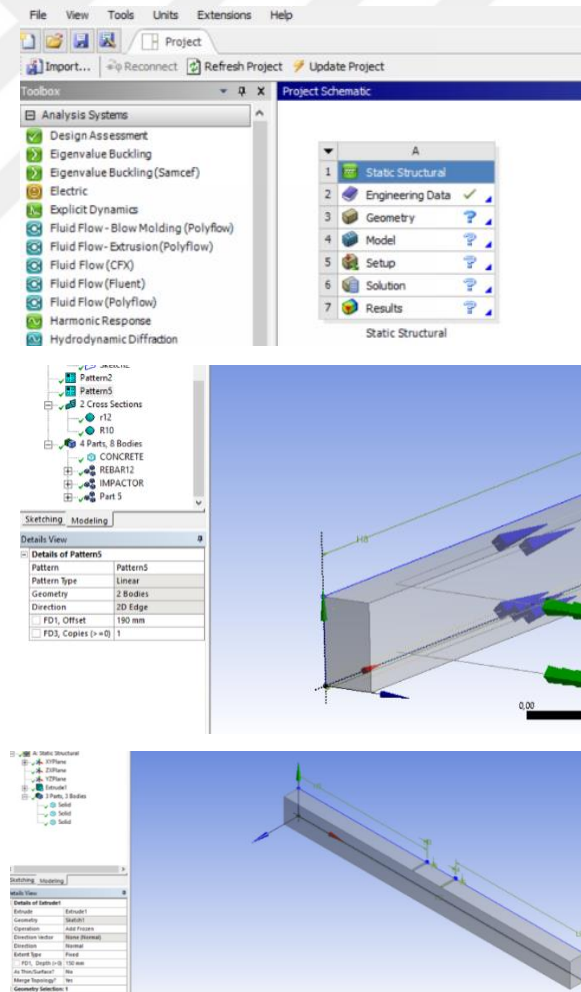
Bu bölümde Ansys Workbench analiz programında deneysel olarak yaptığımız çalışmanın sonlu elemanlar olarak modellenmiş, malzeme özelliklerinin tanımlanmış, sınır şartlarının belirlenmiş, analiz yapılarak sonuçlar elde edilmiştir.

6.1 Ansys Programında Analiz Yapılması

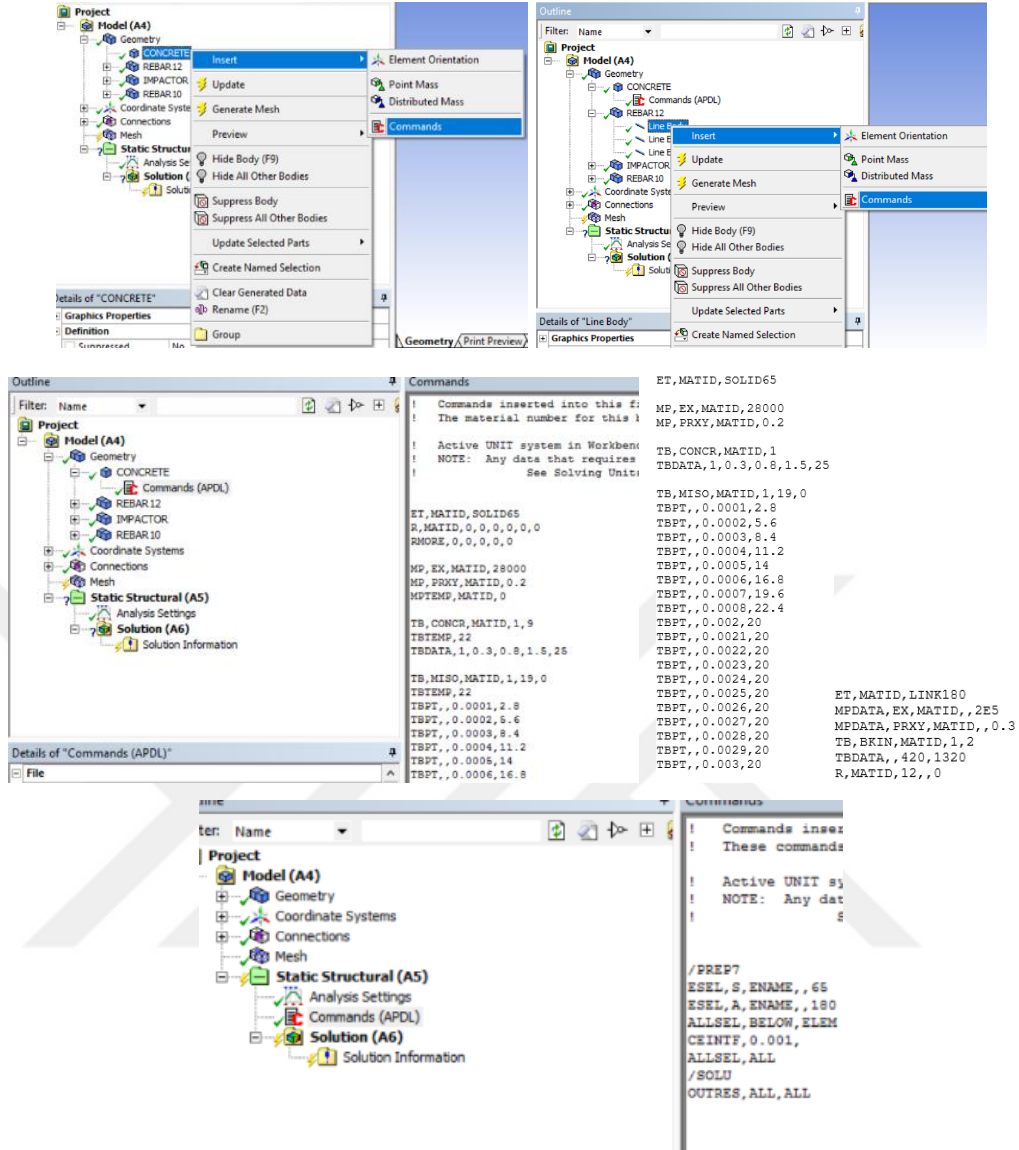
Deney elemanlarının Ansys DesignModeler bölümü ile modellenmesi yapılmıştır. Betonarme kiriş ve UYPB plakayı iki farklı eleman olarak programa tanıtabilmek için ayrı hacimler olarak oluşturularak farklı solid elemanlar elde edilmiştir. Ansys

program görüntüleri Şekil 6.1’de verilmiştir. Beton, donatı ve UYPB malzemeleri deneyde kullanılan elemanlar ile aynı özelliklere sahiptir. Malzeme tanımlamaları yapılırken beton elemanlar için (C20 beton ve UYPB) Solid 65 kodları kullanılarak yazılan text dosyaları, donatı için ise çubuk elemanların programa tanıtılmasında kullanılan Link 180 isimli kod diliyle yazılan text dosyası kullanılmıştır. Malzeme özelliklerinin programa tanıtılması görseli ise Şekil 6.2’de verilmektedir.

Bu dosyaları programa tanıtmak için sol taraftaki modül ağacından Geometry bölümünün altındaki elemana sağ tıklayarak insert, commands komutlarıyla text dosyaları eklenmiştir. Beton ve donatının beraber çalışmasını tanımlamak için Static Structural bölümünün altına commands oluşturularak prep7 text dosyasıyla malzemelerin birlikte çalışacağı tanımlanmıştır.



Şekil 6.1 Ansys program görüntüsü



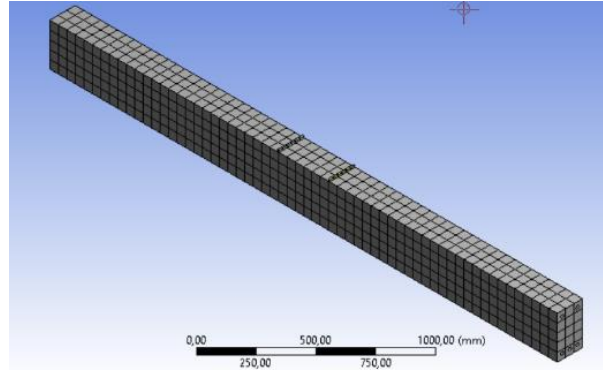
Şekil 6.2 Ansys Model modülü malzeme özellikleri tanımlama

Çayıroğlu (bt), Sonlu Elemanlar yöntemi ile parça modellenirken, model küçük parçalardan oluşan temel elemanlara ayrılmaktadır. Buna mesh işlemi denir. Tüm elemanların köşelerinde düğümler (node) bulunmaktadır. Hesaplamalar bu düğüm noktaları üzerinde gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla model önce elemanlara (element) bölünmüş, elemanların köşe noktaları ise modeli temsil eden noktalar uzayını oluşturmuştur. Hesaplamalarla elde edilen sonuçlar bu noktaların üzerindeki değerlerdir.

Hesaplamalar nodlar üzerinde gerçekleştirilirken, bu nodlar üzerinde denklemler oluşturulmaktadır. Problemin büyüklüğüne göre binlerce denklem elde edilebilmektedir. Bu denklem takımlarının çözümleri ise bilgisayar ile mümkün olmaktadır. Sonuç olarak hesaplama sonucunda bulunan değerler mesh yapılarak elde edilmiş nodlar üzerinden okunan değerlerdir. Bu nedenle iyi bir hesaplama için öncelikle iyi bir element yapısı ve ona bağlı olarak nod yapısı oluşturmak önemlidir. Sonlu elemanlar yönteminin mantığı elemanları aşağıdaki matris formuna dönüştürebilmektir.

$$[K] \cdot [D] = [R] \quad (6.1)$$

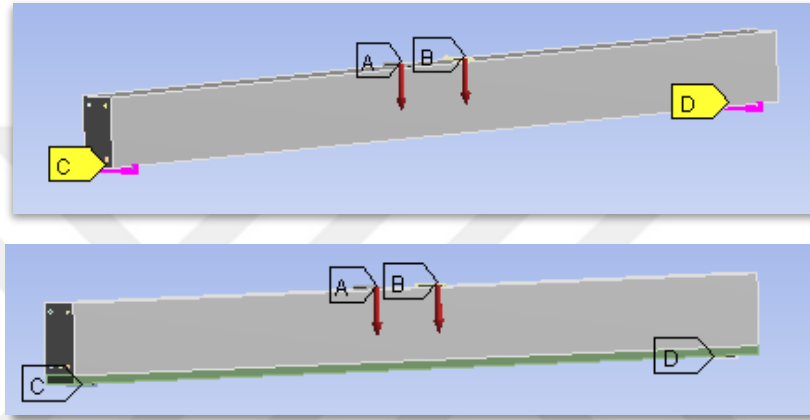
Çayiroğlu (bt), Burada [D] büyüklük alanının nodlardaki bilinmeyen değerleri temsil eden vektör (vektör matrisleri sütun şeklindedir), [R] bilinen yük vektörü ve [K] ise bilinen sabitler matrisidir. Basite indirgersek; R sınır şartlarını (dışarıdan etkiyen yükler vs.), K sistemin yapısını (katı, akışkan, gaz vs özellikleri), D ise aranan nodlar üzerindeki değerleri (gerilme, kuvvet vs.) temsil etmektedir. Sonuç olarak; sonlu elemanlar modelini oluşturduktan sonra sonuçları değerlendirebilmemiz için mesh işlemi çok önemlidir.



Şekil 6.3 Ansys Model modülü mesh tanımlama

Doğrusal olmayan analizin gerçek davranışı verebilmesi için kiriş elemanı küçük sonlu eleman parçalarına (meshlere) ayrılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Donatı ve beton arasındaki aderans etkisi ile mesnet serbestlikleri de programda dikkate alınmıştır.

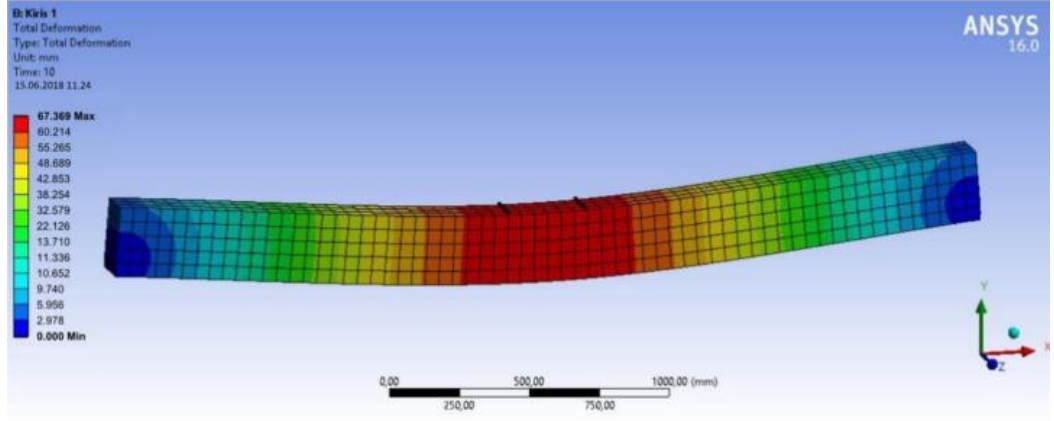
Deneyisel çalışmada, kirişe uygulanan zamana bağlı yükleme ilişkisi, Ansys'te de yükün zamana bağlı olarak tanımlanması suretiyle yansıtılmıştır. Deneyde kullanılan deney düzeneyini yansıtmak amacıyla ANSYS'te de kiriş üzerinde 1x1 cm² alana 2 noktadan yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Mesnet serbestlikleri tanımlanmıştır. Referans eleman ve UYPB plaka ile güçlendirilmiş elemanlar için mesnetlerin ve yüklerin atanması ile ilgili görsel Şekil 6.4'te verilmiştir. Sonuçlar excel dosyası olarak alınarak grafiğe dönüştürülmüştür.



Şekil 6.4 Mesnetlerin ve yüklerin atanması

6.2 Analiz Sonuçları

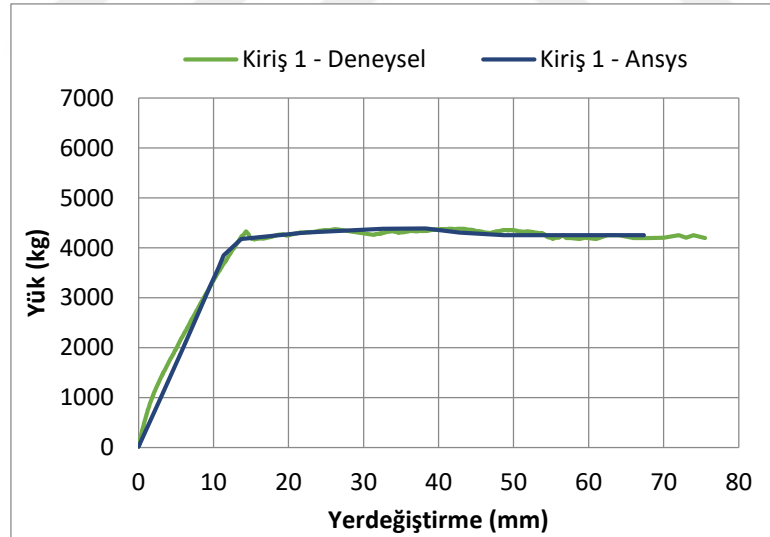
Bu analizin sonucuda çıkan değerler aşağıdaki şekillerde sırasıyla referans kiriş elemanı, 30 mm UYPB ile güçlendirilmiş kiriş elemanı, 50 mm UYPB ile güçlendirilmiş kiriş elemanı ve 70 mm UYPB ile güçlendirilmiş kiriş elemanı olarak verilmiştir.



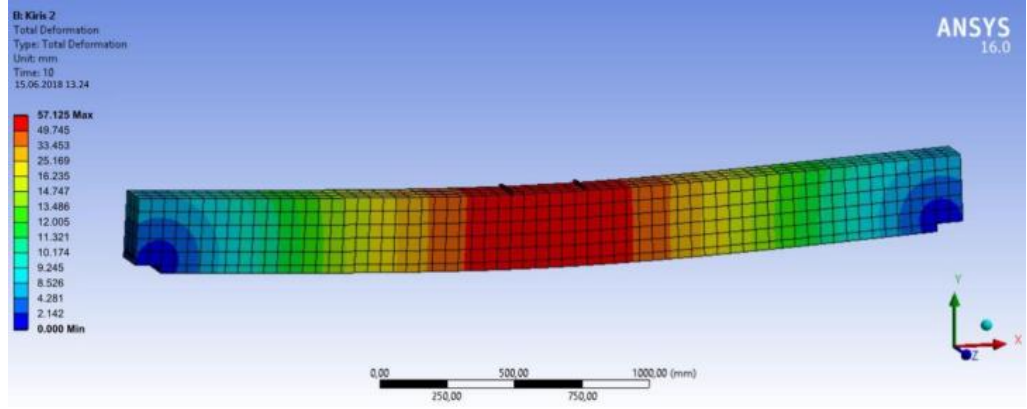
Şekil 6.5 Kiriş-1 analiz sonucu



Şekil 6.6 Kiriş-1 son hali (Kişisel arşiv, 2017)



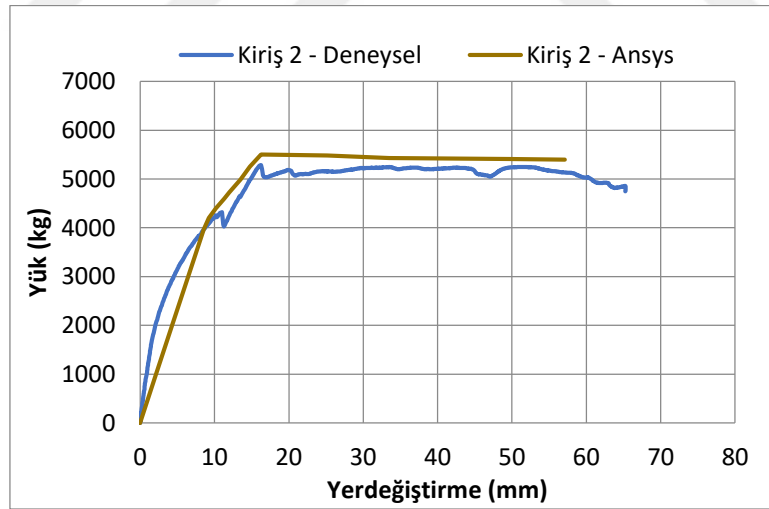
Şekil 6.7 Kiriş-1 yük-deplasman eğrileri



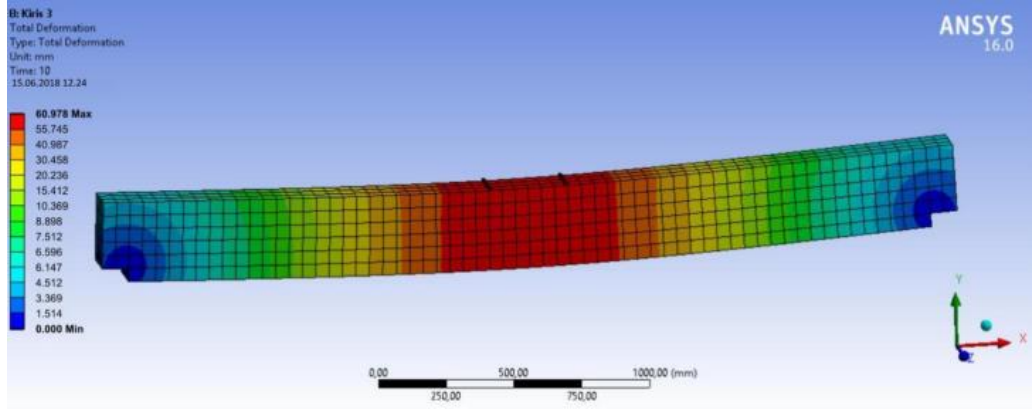
Şekil 6.8 Kiriş-2 analiz sonucu



Şekil 6.9 Kiriş-2 son hali (Kişisel arşiv, 2017)



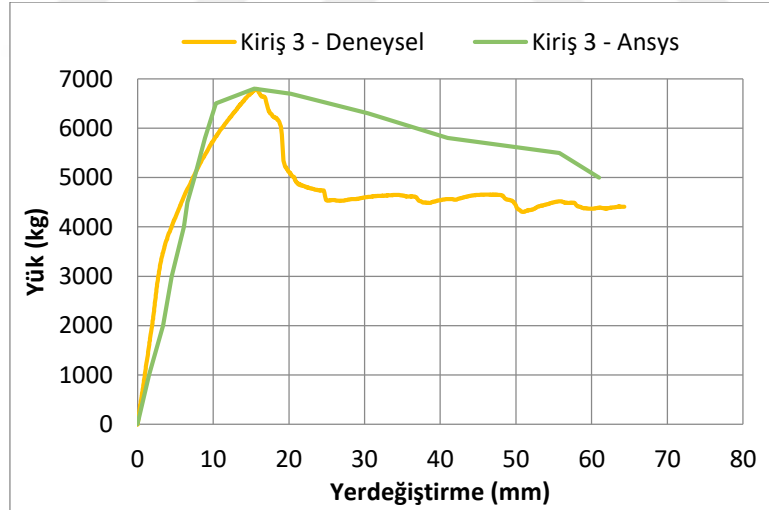
Şekil 6.10 Kiriş-2 yük-deplasman eğrileri



Şekil 6.11 Kiriş-3 analiz sonucu

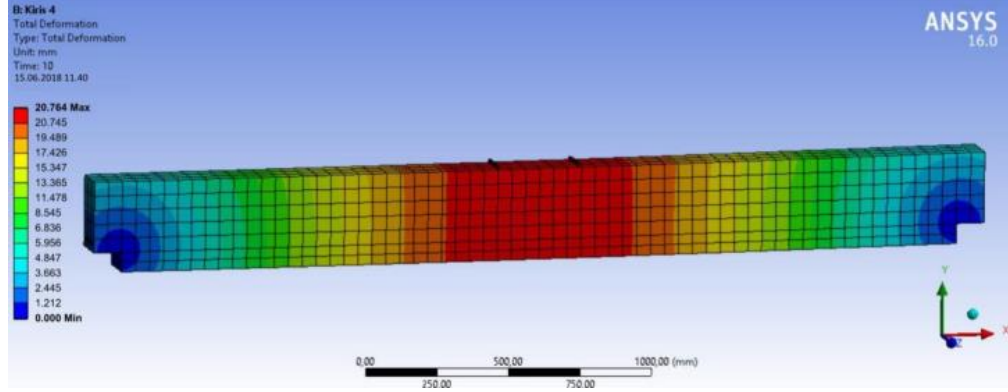


Şekil 6.12 Kiriş-3 son hali (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 6.13 Kiriş-3 yük-deplasman eğrileri

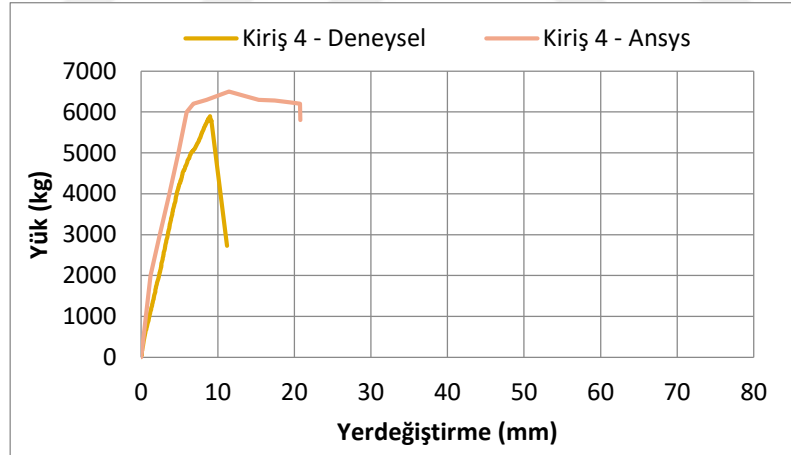
Çoklu deneylerle gerçek plaka davranışı Ansys programına öğretilirse 3. deneye daha yakın sonuçlar elde edilebilir.



Şekil 6.14 Kiriş-4 analiz sonucu



Şekil 6.15 Kiriş-4 son hali (Kişisel arşiv, 2017)



Şekil 6.16 Kiriş-4 yük-deplasman eğrileri

Elde edilen sonuçlarda; betonarme kiriş yüzeyinden UYPB plaka yüzeyine epoksi yerine geçecek bir tanımlama olduğunu düşündüğümüz kontak tipi olarak bonded ile yük aktarımı yapılmıştır. Ancak çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre, bonded tanımlamasının bu tip uygulamalar için doğru bir tanımlama olmadığı kanaati oluşmuştur. Bu yargı, Ansys analiz sonuç görüntülerinin kirişin altına yapıştırılan

kompozit plakanın sanki betonarme kirişin devamıymış gibi görünmesinden de anlaşılabilir.

Kirişlerin deneysel sonuçları ve teorik sonuçlarından elde edilen karakteristik değerler Tablo 6.1’de sunulmuştur.

Tablo 6.1 Kirişlerin eğilme testlerinden elde edilen karakteristik değerler

Kiriş No	P _y (kg)		Δ_y (mm)		P _{maks} (kg)		P _u (kg)		Δ_u (mm)	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
Kiriş-1	4406,19	4262,06	14,31	13,04	4391,28	4385,11	4278,73	4250,32	75,53	67,37
Kiriş-2	5361,67	4400,13	16,29	11,37	5285,79	5501,63	4947,66	5403,04	65,22	57,13
Kiriş-3	4700,89	5900,37	24,79	14,68	6931,01	6802,71	4484,71	5003,26	66,45	60,98
Kiriş-4	-	5501,49	-	5,33	5896,22	6503,34	2723,71	6000,84	11,21	20,76

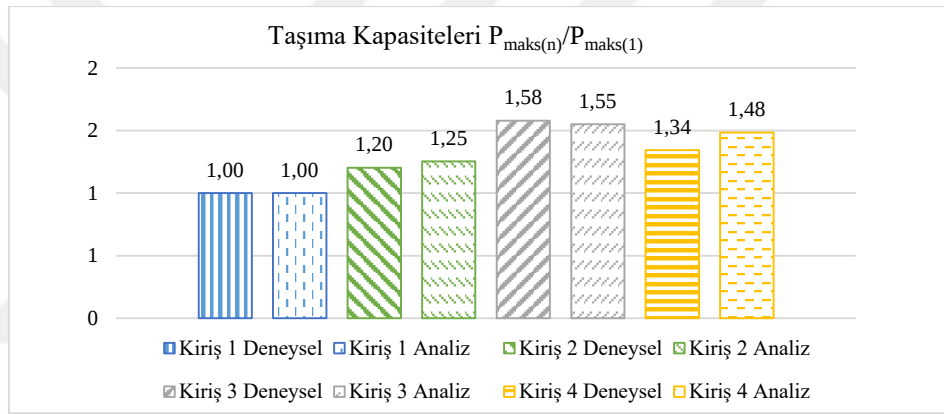
Kiriş No	Δ_u / Δ_y		E (kgm)		E _n / E ₁	
	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik	Deneysel	Teorik
Kiriş-1	5,28	5,17	269500,74	266824,77	1,00	1,00
Kiriş-2	4,00	5,03	315989,60	325792,44	1,17	1,22
Kiriş-3	2,68	4,16	287243,80	280326,93	1,07	1,05
Kiriş-4	-	3,89	27122,61	103284,76	0,10	0,39

Deneysel çalışmada Kiriş 4 sünek eğilme davranışından gevrek duruma geçmiştir. Bu nedenle süneklik ve akma değerleri Kiriş 4’te tabloda bulunmamaktadır. Teorik

sonuçlarda ise Ansys'e kontak tipi bonded olarak tanımlandığı için Kiriş 4'te deneysel sonuçlarla analiz sonuçları arasında süneklik ve süneklik oranlarında farklılıklar çıkmıştır.

6.2.1 Dayanım ve Davranış

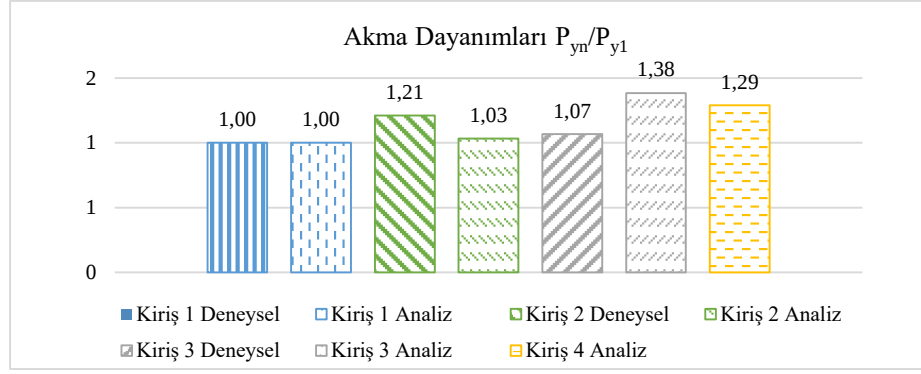
Deneysel ve teorik veriler dayanım ve davranış açısından değerlendirilerek aşağıda sunulmuştur. Çalışmada deney elemanlarının eğilme dayanımlarını değerlendirmek için yük-deplasman eğrileri kullanılmıştır. Ayrıca deney elemanlarının maksimum yük düzeyindeki deplasman değerleri de karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.17 UYPB kalınlıklarının yük taşıma kapasitesine etkisi

Şekil 6.17'de UYPB plaka uygulaması ile dayanım açısından elde edilen katkı sunulmuştur. Analiz sonucunda Kiriş 3 referans elemana göre taşıma kapasitesinde %55 oranında artış sağlanmıştır. Kiriş 4 %48'lik ve Kiriş 2 %25'lik artış sağlamıştır.

Deneysel ve teorik verileri karşılaştırdığımızda; en yüksek dayanımı 50 mm UYPB plaka ile güçlendirilmiş Kiriş 3'te deneysel ve teorik olarak sırasıyla %58 ve %55 ile gerçekleşmiştir. Diğer kirişlerde de deneysel ve teorik olarak sırasıyla Kiriş 2'de %20 ve %25, Kiriş 4'te ise %34 ve %48'lik artış sağlanmıştır. Deneysel ve teorik sonuçlara göre UYPB plaka ile güçlendirme taşıma kapasitesini arttırmada katkı sağlamıştır.



Şekil 6.18 UYPB kalınlıklarının akma dayanımlarının karşılaştırılması

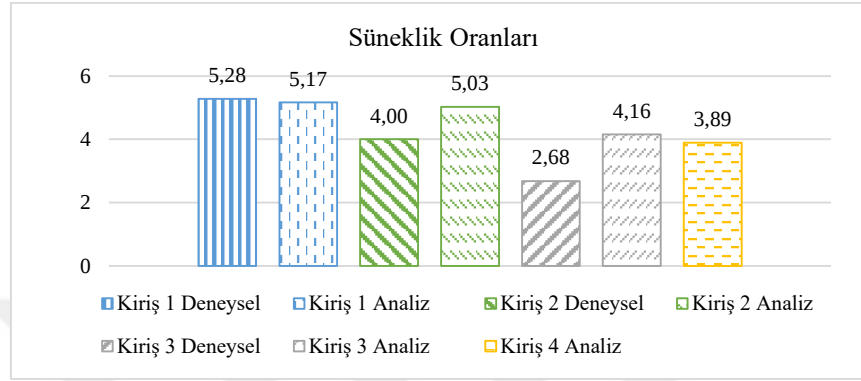
Şekil 6.18’de teorik veriler sonucunda Kiriş 2 ve Kiriş 3’ün akma dayanımları sırasıyla 1,03 ve 1,38’dir. UYPB plaka uygulaması betonarme kirişlerde yük taşıma kapasitesini arttırmış ve bu durum akma dayanımlarının da artmasına sebep olmuştur. UYPB plaka uygulaması ile referans elemana göre sırasıyla %3 ve %38 oranında artış meydana gelmiştir.

Deneyisel ve teorik sonuçları karşılaştırdığımızda en yüksek akma dayanımı iki test için de Kiriş 3’te meydana gelmiştir. Deneyisel ve teorik olarak sırasıyla %7 ve %38 oranlarında artış gerçekleşmiştir. Diğer kirişlerde de deneyisel ve teorik olarak meydana gelen artış oranları sırasıyla Kiriş 2’de %21 ve %3’tür. Kiriş 4’te ise gevrek kırılma meydana gelmiştir. Deneyisel ve teorik analize göre UYPB plaka uygulaması betonarme kirişlerde yük taşıma kapasitesini arttırmıştır.

Eğilme bölgesine yapıştırılan üstün özellikli beton yeni bir kompozit kiriş oluşumuna neden olmuştur. Bu kompozit kirişi oluşturan betonarme kiriş ve UYPB plakanın rijitlikleri farklıdır. Farklı rijitliklere sahip elemanlarda farklı deplasman yapma isteği oluşmaktadır. Bu nedenle eğilme yükleri altında tüm yük epoksi arayüzünde yoğunlaşmış ve epoksi aracılığı ile aktarılmaya çalışılmıştır. Epoksi taşıyabileceğinden daha fazla kayma gerilmesine maruz kaldığında UYPB plaka yüzeyden ayrılmıştır. Deneyisel çalışmada Kiriş 4’de meydana gelen ani kırılmanın nedeni budur. Görüldüğü üzere plaka kalınlığı belli bir seviyenin üzerine çıktığında davranışı olumsuz etkilemiş, kiriş sünek eğilme davranışından gevrek duruma geçmiştir.

6.2.2 Süneklik

Deneyisel ve teorik veriler süneklik açısından değerlendirilerek aşağıda sunulmuştur.



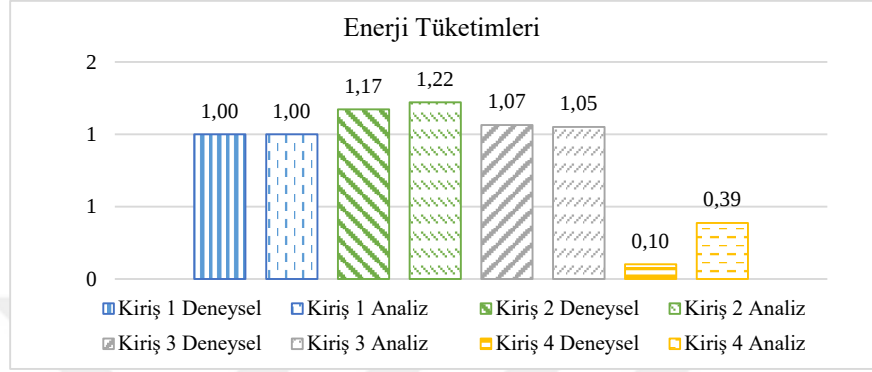
Şekil 6.19 UYPB kalınlıklarının süneklik üzerindeki etkisinin karşılaştırılması

Teorik sonuçlara göre Kiriş 1 ve Kiriş 2 ve Kiriş 3'ün deplasman süneklikleri sırasıyla 5,17, 5,03 ve 4,16'dır. Deneyisel sonuçlara göre Kiriş 1, Kiriş 2 ve Kiriş 3'ün deplasman süneklikleri sırasıyla 5,28, 4,00 ve 2,68'dir. Süneklik oranı Kiriş 4'te grafiğe dahil edilmemiştir. Ansys'e kontak tipi bonded olarak tanımlandığı için Kiriş 4 için deneyisel sonuçlarla analiz sonuçları arasında süneklik ve süneklik oranlarında farklılıklar çıkmıştır.

UYPB plaka betonarme kiriş ile birlikte çalışarak yük taşıma kapasitesini arttırmış ve elemanlardaki kalınlık değişimi referans kirişe göre deplasman yapma kapasitelerinde azalmaya sebep olmuştur. Eğilme bölgesine yapıştırılan UYPB plakanın kalınlığının artmasıyla eleman daha rijit hale gelmiştir. Eğilme dayanımı yetersiz kirişe yapıştırılan bu plakalar, eğilme bölgesinde rijit bir levha gibi davranarak kirişin deplasman yapma kapasitesini azaltmıştır. Deneyisel sonuçlarda da elemanın daha rijit davranış gösterdiği görülmektedir.

6.2.3 Enerji Tüketimleri

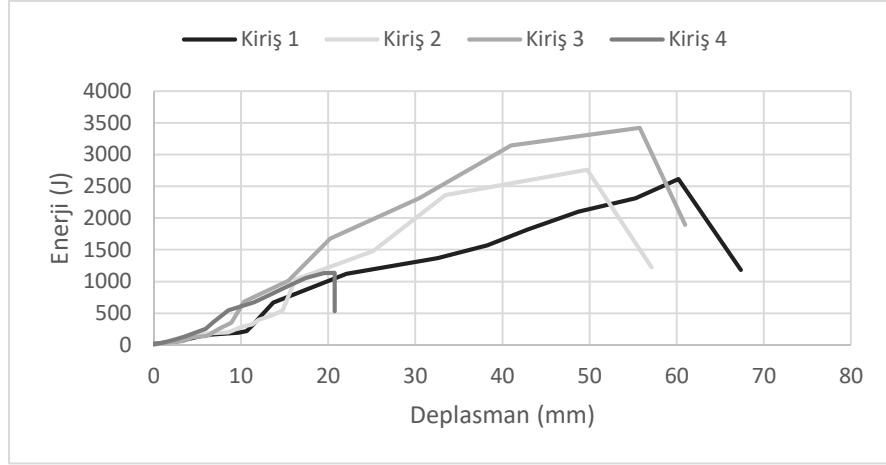
Deneyel ve teorik veriler enerji tüketimleri yönünden değerlendirilerek aşağıda sunulmuştur.



Şekil 6.20 UYPB kalınlıklarının enerji tüketimlerinin karşılaştırılması

Deney elemanlarının birikimli enerji tüketim oranları Şekil 6.20’de sunulmuştur. Deney elemanlarında süneklik oranlarının azalmasına rağmen taşıma kapasiteleri arttığı için enerji yutma kapasiteleri de artmıştır. Teorik sonuçlarda en fazla enerjiyi Kiriş 2 tüketmiştir. Kiriş 2; 325792,44 kgmm enerji tüketmiştir. Deney elemanı referans elemandan 1,22 kat fazla enerji tüketmiştir. Bunu 1,05 kat ile Kiriş 3 takip etmiştir. Deney programında en az enerjiyi Kiriş 4 tüketmiştir. Deney elemanı referans elemandan %61 daha az enerji tüketmiştir.

Deneyel sonuçlarla teorik sonuçları karşılaştırdığımızda deneyel uygulamadan elde edilen verilerde daha az enerji harcandığı görülmektedir. Kirişler daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olurken daha az deplasman yapmış ve sünekliği azaltmıştır. Bunun sonucunda enerji yutma kapasiteleri azalmıştır.



Şekil 6.21 UYPB kalınlıklarına göre enerji-deplasman grafiği (Teorik)

UYPB kalınlığının artmasıyla dayanımı artan deney elemanlarında bu artışa paralel bir enerji yutma kapasitesi artışı gözlenmemiştir. Kiriş 3 Kiriş 2'ye göre daha az enerji tüketmiştir. Kiriş 4'te UYPB plaka kalınlığının artmasıyla rijitlik artmakta ve elemanların deplasman yapma kapasiteleri azalmaktadır. Bu da elemanların enerji yutma kapasitelerini azaltmaktadır.

BÖLÜM YEDİ

TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapı malzemeleri teknolojisinde meydana gelen güncel gelişmeler, ultra yüksek performanslı beton (UYPB) gibi çeşitli çimento esaslı kompozitleri ortaya çıkarmıştır. UYPB, geleneksel betona göre eğilme yükleri altında yüksek enerji yutma kapasitesine ve dayanıma sahiptir. Bu yeni nesil çimento esaslı kompozitler; düşük geçirimsizlik, geliştirilmiş durabilite, sınırlı rötre ve korozyon dayanımının artırılması gibi diğer yüksek performans özellikleri de sağlamaktadır. Bu çalışmada farklı kalınlıklarda UYPB plakalar ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin dört noktalı eğilme testleri yapılmış ve kalınlık değişiminin eğilme davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

- Ön hazırlık testleri çelik mikroliflerin işlenebilirlik düşürme etkisi ile başa çıkabilmek için %68 hacimde yapıştırıcıya ihtiyaç duyulduğunu göstermiştir. Lif olmadan düzgün karışım elde etmek için yaklaşık 150 mm akış çapı amaçlanmış ve her bir fiber hacmi için sabit akışkanlaştırıcı dozajı kullanılmıştır. Sonuç olarak %3 oranında lifli UYPB ile eğilme dayanımı 40 MPa ve basınç dayanımı 200 MPa değerini aşan, optimum işlenebilirlik sağlayan UYPB üretilmiştir.
- Gerçek ölçekli plaka testlerinde amaç, tam ölçekli plakanın çıplak özelliklerini tanımlamak ve bir güçlendirme elemanı olarak uygulanmadan önce plaka kalınlığının test değerlerine etkisini gözlemlemektir. Plakaların tümünde tipik olarak orta alt bölgede çatlak oluşumu gözlenmiştir. 50 mm ve 70 mm kalınlığa sahip plakalarda ise ciddi lokalize olmuş çatlak gelişimleri gözlenmiştir. Çatlak genişliğinin artması ile tüm plakalarda yük kayıpları oluşmuş, ancak lifler plakaların tamamen kırılmasını engellemiştir.
- Eğilme dayanımı yetersiz betonarme kiriş elemanlar farklı kalınlıklardaki UYPB plakaların yapıştırılmasıyla güçlendirilerek eğilme testleri yapılmıştır. Kirişler, göçme gerçekleşene kadar yüklenmiştir. Kiriş 1, Kiriş 2 ve Kiriş 3'te

ilk çatlaklar; kirişin orta bölgesinde, kiriş eksenine dik ve ani olarak gelişim göstermiştir. Daha sonra kirişlerin alt boyuna donatısı akmıştır. UYPB plakanın katkısıyla numuneler daha rijit davranmaya başlamış ve kirişlerin basınç bölgesindeki beton ezilene kadar deneylere devam edilmiştir. Kiriş 4'te ise ilk çatlaktan sonra liflerden ses gelmeye başladığı anda plaka kirişten parça kopararak ayrılmıştır. Diğer elemanlara göre gevrek davranış göstererek göçme meydana gelmiştir.

- Gerçekleştirilen deneysel testlerde referans elemana göre taşıma kapasitesinde en düşük %20, en yüksek %58 oranında artış sağlanmıştır. Teorik testlerde referans elemana göre taşıma kapasitesinde en düşük %25, en yüksek %55 oranında artış sağlanmıştır. UYPB kalınlığının artmasıyla uygulandığı elemanın kesit yüksekliğini doğrudan artırılacağı da göz önünde bulundurulduğunda dayanımda artış beklenmesi normaldir. Ancak elde edilen artışın tek nedeni bu değildir. Eğilme bölgesine yapıştırılan üstün özellikli beton yeni bir kompozit kiriş oluşumuna neden olmuştur. Eğilme bölgesine yapıştırılan UYPB plakanın kalınlığının artmasıyla plakanın rijitliği artmış böylece betonarme kiriş ve plaka arasında deplasman farklı olmuştur. İki farklı rijitliğe sahip malzemenin farklı deplasman yapma isteği nedeniyle eğilme yükleri altında tüm yük epoksi arayüzünde yoğunlaşmış ve epoksi aracılığı ile aktarılmaya çalışılmıştır. Epoksi taşıyabileceğinden daha fazla kayma gerilmesine maruz kaldığında UYPB plaka yüzeyden ayrılmıştır. Deneysel çalışmada Kiriş 4'de meydana gelen ani kırılmanın nedeni budur. Görüldüğü üzere plaka kalınlığı belli bir seviyenin üzerine çıktığında davranışı olumsuz etkilemiş, kiriş sünek eğilme davranışından gevrek duruma geçmiştir.
- Eğilme bölgesine yapıştırılan UYPB plakanın kalınlığının artmasıyla eleman daha rijit hale gelmiştir. Bu da dayanımı artan elemanların deplasman sünekliklerinin düşmesine neden olmuştur.
- Yapının deprem yükleri altında yeterli dayanıma sahip olabilmesi için hem sünek hem de taşıma kapasitesinin yeterli olması gereklidir. Elemanların

sünekliğini değerlendirirken sadece süneklik oranını karşılaştırmak yeterli olmayacaktır. Elemanların süneklik miktarını değerlendirirken süneklik oranına ek olarak enerji tüketimlerinin de değerlendirilmesi gerekmektedir.

- UYPB plaka ile güçlendirilmiş deney elemanlarında süneklik oranında azalma olmasına rağmen taşıma kapasitelerindeki artıştan dolayı Kiriş 1'e (referans elemana) göre enerji yutma kapasiteleri de artmıştır. Hem deneysel hem de teorik testlerde UYPB plaka kalınlığının artmasıyla rijitlik artmakta ve elemanların deplasman yapma kapasiteleri azalmaktadır. Bu da elemanların enerji yutma kapasitelerini azaltmaktadır.
- Deney elemanları içerisinde en büyük birim deformasyon Kiriş 2'de ölçülmüştür. 30 mm kalınlığa sahip UYPB plaka testin ilk aşamalarında rijit bir davranış göstermiştir. Ancak matris içindeki liflerin sıyrılmaya başlamasıyla birim deformasyon kontrolsüz bir şekilde artmaya başlamıştır. Plakanın kırılmasından sonra birim deformasyon düşmeye başlamış ancak çatlak genişliğinde ki bu kontrolsüz artışa bağlı olarak en büyük deformasyon bu elemanda ölçülmüştür. Birim deformasyon davranışını iyileştirmek ve çatlak oluşumunu azaltmak için UYPB plakaların içerisine boyuna donatı yerleştirilerek; UYPB'nin erken yük seviyesinde lokalize olan çatlak nedeniyle kırılmasının önüne geçilebilir. Böylece eğilme kapasitesinde daha belirgin artış sağlanabileceği düşünülmektedir.
- Betonarme kiriş yüzeyinden UYPB plaka yüzeyine epoksi yerine geçecek bir tanımlama olduğunu düşündüğümüz kontak tipi olarak bonded ile yük aktarımı yapılmıştır. Ancak bonded seçiminin bu tip uygulamalar için doğru bir tanımlama olmadığı görülmüştür. Ara yüze epoksiyi tanımlayacak kontak elemanların girilmesi durumunda daha gerçekçi sonuçlar elde edileceği düşünülmektedir. İleriki çalışmalarda kontak elemanlarla geliştirilerek analiz yapılması önerilmektedir.

- Çoklu deneyler yapılarak oluşturulacak gerçek plaka davranışı Ansys programına öğretilirse deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar elde edilebilir.
- Laboratuvar ortamında yapılan deneylerde; uygun koşulların sağlanması, deney süreleri, malzeme temini ve test edilebilecek eleman sayısının sınırlı olması gibi zorluklar düşünüldüğünde sonlu eleman programları ile analiz ön bilgi vermesi için kullanılabilir. Model oluşturulurken elemalara daha fazla sayıda sonlu eleman parçalarına ayırarak daha hassas çözümlere ulaşılabilir. Ancak bunun için yüksek kapasiteli bilgisayarların kullanılması gerekmektedir.
- Bu çalışmada elde edilen deney sonuçlarına göre; plaka kalınlığı belli bir kalınlığın üzerine çıktığında (50 mm) elemanların göçme modu sünek davranıştan gevrek davranışa dönüşmüştür. Bu durum yanlış güçlendirme yöntemlerinin kullanılması durumunda yapıya ya da elemanlara istem dışı (yetersiz bilgi ve tecrübe ile) zarar verilebileceğini göstermesi açısından önemlidir.

KAYNAKLAR

- Ambily, P. S., Umarani, C., Ravisankar, K., Prem, P. R., Bharatkumar, B. H. ve Iyer, N. R. (2015). Studies on ultra high performance concrete incorporating copper slag as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 77, 233-240.
- Araújo D.L., Nunes F. G. T. ve Andrade R.D.T. (2014). Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams. *Maringá*, 36 (3), 389-397.
- Ashour, A. F. ve Morley, C. T. (1993). Three - dimensional nonlinear finite element modelling of reinforced concrete structures. *Finite Elements in Analysis and Design*, 15 (1), 43-55.
- Aydın, S., Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y. ve Yiğiter H. (2010). Effect of aggregate type on the mechanical properties of RPC. *ACI Materials Journal*, 107 (5), 441-449.
- Barbosa, A., Idelsohn, S., Oñate, E., ve Dvorkin, E. (1998). *Analysis of reinforced concrete structures using ANSYS nonlinear concrete model*. Federal University of Minas Gerais Department of Structural Engineering, Barcelona, Spain.
- Brühwiler, E. (2013). Rehabilitation and strengthening of concrete structures using ultra-high performance fibre reinforced concrete. *Structural Engineering International*, 23(4), 450-457.
- Celep, Z. ve Kumbasar, N. (2000). *Deprem mühendisliğine giriş ve depreme dayanıklı yapı tasarımı içinde* (84-87). İstanbul: Beta Dağıtım.
- Çayıroğlu İ. (2013). *Bilgisayar destekli tasarım Ansys statik analiz ders notları*.2 Eylül 2019, <http://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/BilgisayarDestekliTasarim/BilgisayarDestekliTasarimVeAnaliz-1-hafta.pdf>

- Ferrari, V. J., de Hanai, J. B. ve 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.
- Hassanean, Y. A., Assaf, K. A., Raheem, S. E. A. ve Arafa, A. N. (2013). Flexural behavior of strengthened and repaired RC beams by using steel fiber concrete jacket under repeated load. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 3 (3), 564.
- Hussein M., Kunieda M. ve Nakamura H. (2012). Strength and ductility of RC beams strengthened with steel-reinforced strain hardening cementitious composites. *Cement & Concrete Composites*, 34, 1061–1066.
- Iskhakov, Y., Holschemacher R. K. ve Mueller T. (2013). High performance repairing of reinforced concrete structures. *Materials and Design*, 44, 216–222.
- Julio, E. N., Branco, F. A., ve 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.
- Kang, S. T. ve Ryu, G. S. (2011). The effect of steel - fiber contents on the compressive stress-strain relation of ultra high performance cementitious composites (UHPC). *Journal of the Korea Concrete Institute*, 23 (1), 67-75.
- Li, V. C., Wu, H. C., Maalej, M., Mishra, D. K. ve 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. ve 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. ve Rinaldi Z. (2010). Strengthening and repair of RC beams with fiber reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites* 32, 731–739.
- Park, R. (1988). Ductility evaluation from laboratory and analytical testing. In *Proceedings of the 9th world conference on earthquake engineering, Tokyo-Kyoto, Japan*, 8, 605-616.
- Prem, P. R. ve Murthy, A. R. (2016). Acoustic emission and flexural behaviour of RC beams strengthened with UHPC overlay. *Construction and Building Materials*, 123, 481-492.
- Ruano G., Isla F., Pedraza R.I., Sfer D. ve Luccioni B. (2014). Shear retrofitting of reinforced concrete beams with steel fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 54, 646–658.
- Rong, Z., Sun, W., Xiao, H. ve 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.
- Shi, C., Wang, D., Wu, L. ve 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.
- Santos D. S., Santos P. M. D. ve 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. ve Júlio E. N. (2013). A state - of - the - art review on roughness quantification methods for concrete surfaces. *Construction and Building Materials*, 38, 912–923.

- Tanarslan, H. M., Alver, N., Jahangiri, R., Yalçinkaya, Ç. ve Yazıcı, H. (2017). Flexural strengthening of RC beams using UHPFRC laminates: Bonding techniques and rebar addition. *Construction and Building Materials*, 155, 45-55.
- Tanarslan, H. M. (2017). Flexural strengthening of RC beams with prefabricated ultra high performance fibre reinforced concrete laminates. *Engineering Structures*, 151, 337-348.
- Taşdemir, M. A., Bayramov, F. ve Yerlikaya, M. (2003/4). Geleneksel ve yüksek performanslı çelik donatılı betonlar. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426, 76-84.
- Türker, K., Birol, T., Yavaş, A. ve Hasgöl, U. (2016). Ultra yüksek performanslı lifli beton içeren kirişlerde etkin çelik lif tipi incelemesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16 (3), 776-785.
- Türker, K., Birol, T., Yavaş, A., Hasgöl, U. ve Yazıcı, H. (2019). Ultra yüksek performanslı lifli beton içeren kirişlerin eğilme davranışı. *Teknik Dergi*, 30 (1), 8777-8801.
- Timoshenko, S. P. ve Woinowsky - Krieger, S. (1959). *Theory of plates and shells*. (2nd Ed.) Boston: McGraw-hill.
- Ugural, A. C. ve Ugural, A. C. (1999). *Stresses in plates and shells* 366. Boston: McGraw-Hill.
- Vaitkevičius V., Šerelis E. ve Hilbig H. (2014). The effect of glass powder on the microstructure of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 68, 102-109.
- Wille K. ve Boisvert - Cotulio C. (2015). Material efficiency in the design of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 86, 33-43.

Wuest John (2006). Structural behavior of reinforced concrete elements improved by layers of ultra high performance reinforced concrete. *6th International PhD Symposium in Civil Engineering Zurich*, 23-26.

Yalçinkaya Ç. ve Yazıcı H. (2017). Effects of ambient temperature and relative humidity on early-age shrinkage of UHPC with high-volume mineral admixtures. *Construction Building Materials*, 144, 252–259.

Yalçinkaya Ç. ve Yazıcı H. (2016). Effect of early-age freeze-thaw exposure on the mechanical performance of self-compacting repair mortars. *Composite Materials: Science and Engineering*, 23, 335–344.

Yang, J., Peng, G. F., Gao, Y. X. ve Zhang, H. (2015). Mechanical properties and durability of ultra-high performance concrete incorporating coarse aggregate. *In Key Engineering Materials*, 629, 96-103.

Yazıcı, H. ve Yardımcı, M. ve Aydın, S. ve 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.

Yazıcı, H., Yiğiter, H., Karabulut, A. Ş. ve 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.

Yu, R., Spiesz, P. ve 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. ve 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. ve Sun, W. (2014). Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 50, 540-548.

