

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

NORMAL VE YÜKSEK DAYANIMLI BETON KULLANILAN
BFRP VE ÇELİK DONATILI HİBRİT KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞI

Seçkin KOLUKIRIK

EYLÜL 2018

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Seçkin KOLUKIRIK tarafından hazırlanan NORMAL VE YÜKSEK DAYANIMLI BETON KULLANILAN BFRP VE ÇELİK DONATILI HİBRİT KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞI adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. İlker KALKAN
Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Dr. Öğretim Üyesi
Şule BAKIRCI ER

Jüri Üyeleri

Başkan : Dr. Öğretim Üyesi Mahmut Cem YILMAZ _____
Üye (Danışman) : Dr. Öğretim Üyesi Şule BAKIRCI ER _____
Üye : Dr. Öğretim Üyesi Eda AVANOĞLU SICACIK _____

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Sevgili ailem ve canım oğlum Cihan Ege KOLUKIRIK'a...



ÖZET

NORMAL VE YÜKSEK DAYANIMLI BETON KULLANILAN BFRP VE ÇELİK DONATILI HİBRİT KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞI

KOLUKIRIK, Seçkin

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Şule BAKIRCI ER

Eylül 2018, 60 sayfa

Çelik ve beton geleneksel betonarme yapılarda yaygın olarak kullanılan yapı malzemeleridir. Gelişen teknoloji ile birlikte olumsuz çevre koşullarına karşı daha uygun bir malzeme arayışı gündeme gelmiştir. FRP (fiber takviyeli polimer) kompozitler olarak bilinen malzeme türleri, süreci hızlandırarak araştırmacılara birçok avantaj sunmuştur. FRP malzemeler; birincil yapı malzemesi olarak, betonarme yapılarda takviye elemanı olarak ve betonarme yapıların güçlendirilmesinde giderek daha fazla ve yaygın bir şekilde uygulanmıştır. FRP malzemelerin; korozyon dayanımı, neme karşı dayanım, kimyasallara karşı yüksek direnç, manyetik direnç, düşük ısı iletkenliği, elektrik yalıtımı, hafifliği (düşük yoğunluk), yüksek çekme dayanımı, dinamik yükler altında iyi performans, yüksek mukavemet/ ağırlık oranı, uzun yıllar bakım gibi ek hizmete ihtiyaç duymaması, uzun ömürlü olması gibi avantajları bulunmaktadır. FRP donatılar lineer gerilme-şekil değiştirme davranışı gösterirler ve aniden koparlar, gevrektiler. FRP donatının bu dezavantajını büyük ölçüde elimine etmek için, çelik donatı ile birlikte, hibrit (çelik+ FRP donatı), kullanımı araştırılmaya başlanmıştır. Çalışmalarda temel amaç, korozyon dayanımını ön planda tutarak, çelik donatının süneklik özelliğinden, FRP donatının da yüksek dayanım özelliğinden birlikte faydalanmaktır. Bu çalışmada, FRP malzeme türlerinden birisi olan BFRP malzeme ve çelik hibrit edilmiş, farklı donatı kombinasyonlarında, üç adet normal, üç adet yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin eğilme performansları incelenmiştir. Kirişlerin yük deplasman ilişkileri,

yük taşıma kapasiteleri, deformasyon özellikleri, deplasman değerleri deneysel ve teorik olarak karşılaştırılmıştır. Af/As oranı arttıkça deformasyon faktörünün arttığı, beton basınç dayanımının bazalt (BFRP) - çelik donatılı hibrit kirişlerin eğilme davranışında kapasite üzerinde belirgin bir farklılık göstermediği tespit edilmiştir. Taşıma gücünün %20' sindeki deneysel ve teorik deplasman değerleri yakın bulunmuştur. Taşıma gücünün %40'ındaki deneysel deplasman değerlerinin, üç kirişte teorik deplasman değerlerine yakın iken, diğer üç kirişte teorik deplasman değerlerinin en az 2 katı olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: FRP, BFRP, Fiber Takviyeli Polimer, Bazalt Elyaf Donatı, Betonarme Kiriş, Eğilme Davranışı, Deformasyon Faktörü

ABSTRACT

FLEXURAL BEHAVIOR OF NORMAL AND HIGH STRENGTH CONCRETE HYBRID BEAMS REINFORCED WITH BFRP AND STEEL BARS

KOLUKIRIK, Seçkin

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Şule BAKIRCI ER

September 2018, 60 pages

Steel and concrete are commonly used building materials in conventional reinforced concrete structures. With the developing technology, the investigations for a more proper material against aggressive environmental conditions has come up. The types of materials known as FRP (fiber reinforced polymer) composites offered many advantages to researchers by accelerating the process. FRP materials; As the primary building material, reinforced concrete structures as reinforcement and reinforced concrete structures have been applied more and more widely. FRP materials has advantages as corrosion resistance, resistance to moisture, high resistance to chemicals, magnetic resistance, low thermal conductivity, electrical insulation, light weight (low density), high tensile strength, good performance under dynamic loads, high strength / weight ratio, long-term maintenance. FRP reinforcements indicate linear stress-strain behavior and suddenly rupture, they are brittle. In order to eliminate this disadvantage of the FRP reinforcement, the use of hybrid (steel + FRP reinforcement) with the steel reinforcement was investigated. The main purpose of the studies by prioritizing the corrosion resistans is to obtain advantage of the ductility of the steel reinforcement and the high strength of FRP reinforcement. In this study, BFRP and steel hybrid reinforced beams, bending performances of three normal and three high strength reinforced concrete beams were investigated in different hybrid (BFRP and steel) reinforcement combinations. Load displacement relations, load bearing capacities, deformation characteristics, displacement values of

the beams were compared experimentally and theoretically. It was determined that the deformability factor increased as the A_f / A_s ratio increased and the concrete compressive strength did not show a significant difference in the bending behavior of the basalt (BFRP) - steel reinforced hybrid beams. The experimental and theoretical displacement values were obtained to be close to 20%. Experimental displacement values in 40% of the ultimate load were close to the theoretical displacement values in three beams, while it was determined to be at least 2 times the theoretical displacement values in the other three beams.

Key Words: FRP, BFRP, Fiber Reinforced Polymer, Bazalt Fiber Reinforced Polymer, Reinforced Concrete Beam, Flexural Behavior, Deformability Factor.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasını bana öneren ve tezimin hazırlanmasında hiçbir yardımı esirgemeyen, her türlü konuda destek olan, tez yöneticisi hocam, Sayın Dr. Öğretim Üyesi Şule BAKIRCI ER'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı takip eden, inceleyen, çok değerli bilgi görüş ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli hocam Dr. Öğretim Üyesi Eda AVANOĞLU SICACIK'a teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca bana her türlü desteği veren aileme; yüksek lisans eğitimim boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen, büyük sabır gösteren sevgili eşim Gamze KOLUKIRIK'a teşekkür ederim.

Bu çalışma Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Bilimi tarafından 2016/ 070 numaralı proje tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Kırıkkale Üniversitesi BAP Birimine teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. FRP Malzeme ve Çeşitleri	1
1.2. FRP'nin Avantajları	2
1.3. FRP'nin Dezavantajları	3
1.4. FRP'nin Hibrit Kullanımı	4
1.5. Literatür Çalışması	5
2. DENEYSEL ÇALIŞMA	15
2.1. Deney Programı	15
2.2. Malzeme Özellikleri	18
2.2.1. Beton Özellikleri	18
2.2.2. Çelik Donatı Özellikleri	19
2.2.3. BFRP Donatı Özellikleri	19
2.3. Kirişlerin Tasarımı ve Hazırlanması	20
2.4. Yükleme ve Ölçüm Düzenneği	21
2.5. Deneyler	24
2.5.1. HB2S3(B10S10) Numunesi Deneyi	24
2.5.2. HB2S3(B10S10) Numunesi Yük-Deplasman İlişkisi ve Grafiği	26
2.5.3. HB3S2(B10S10) Numunesi Deneyi	26
2.5.4. HB3S2(B10S10) Numunesi Yük-Deplasman İlişkisi ve Grafiği	29
2.5.5. HB3S2(B10S12) Numunesi Deneyi	29
2.5.6. HB3S2(B10S12) Numunesi Yük-Deplasman İlişkisi ve Grafiği	31

2.5.7. NB3S2(B10S10) Numunesi Deneyi	32
2.5.8. NB3S2(B10S10) Numunesi Yük-Deplasman İlişkisi ve Grafiği	34
2.5.9. NB2S3 (B10S12) Numunesi Deneyi	35
2.5.10. NB2S3 (B10S12) Numunesi Yük-Deplasman İlişkisi ve Grafiği ..	37
2.5.11. NB2S3 (B10S10) Numunesi Deneyi	38
2.5.12. NB2S3 (B10S10) Numunesi Yük-Deplasman İlişkisi ve Grafiği ..	40
3. TEORİK HESAPLAMALAR	42
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	50
5. SONUÇLAR	56
KAYNAKLAR	58



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. HB2S3 (B10S10) Kiriş Donatı Detayı.....	16
2.2. HB3S2 (B10S10) Kiriş Donatı Detayı.....	16
2.3. HB3S2 (B10S12) Kiriş Donatı Detayı.....	17
2.4. NB3S2 (B10S10) Kiriş Donatı Detayı.....	17
2.5. NB2S3 (B10S12) Kiriş Donatı Detayı.....	17
2.6. NB2S3 (B10S10) Kiriş Donatı Detayı.....	18
2.7. Yüksek Dayanımlı Kirişlerin Beton Dökümü Sonrası Görünüşleri.....	20
2.8. Normal Dayanımlı Kirişlerin Beton Dökümü Sonrası Görünüşleri.....	21
2.9. Yükleme Sistemi	22
2.10. Deney Düzeneği	23
2.11. Yükleme Düzeneği.....	23
2.12. HB2S3 (B10S10) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu	25
2.13. HB2S3 (B10S10) Kirişi Çatlak Gelişimi	25
2.14. HB3S2 (B10S10) Kirişi Yük- Deplasman Grafiği	26
2.15. HB3S2 (B10S10) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu	28
2.16. HB3S2 (B10S10) Kirişi Çatlak Gelişimi	28
2.17. HB3S2 (B10S10) Kirişi Yük- Deplasman Grafiği	29
2.18. HB3S2 (B10S12) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu	30
2.19. HB3S2 (B10S12) Çatlak Gelişimi	31
2.20. HB3S2 (B10S12) Kirişi Yük- Deplasman Grafiği	32
2.21. NB3S2 (B10S10) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu	33
2.22. NB3S2 (B10S10) Çatlak Gelişimi	34
2.23. NB3S2 (B10S10) Kirişi Yük- Deplasman Grafiği	35
2.24. NB2S3 (B10S12) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu	36
2.25. NB2S3 (B10S12) Çatlak Gelişimi	37
2.26. NB2S3 (B10S12) Kirişi Yük- Deplasman Grafiği	38
2.27. NB2S3 (B10S10) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu	39
2.28. NB2S3 (B10S10) Çatlak Gelişimi	40

2.29.	NB2S3 (B10S10) Kirişli Yük- Deplasman Grafiği	41
2.30.	Deney Elemanlarının Yük Deplasman Grafikleri	50
2.31.	Yüksek Dayanımlı Kirişlerin Yük- Deplasman Grafikleri	51
2.32.	Normal Dayanımlı Kirişlerin Yük- Deplasman Grafikleri	51
2.33.	HB2S3 (B10S10) ve NB2S3 (B10S10) Kirişlerinin Yük Deplasman Grafikleri	52
2.34.	HB3S2 (B10S10) ve NB3S2 (B10S10) Kirişlerinin Yük Deplasman Grafikleri	52
2.35.	HB3S2 (B10S10) ve HB3S2 (B10S12) Kirişlerinin Yük Deplasman Grafikleri	53
2.36.	NB2S3 (B10S12) ve NB2S3 (B10S10) Kirişlerinin Yük Deplasman Grafikleri	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Yüksek dayanımlı beton numune dayanımları.....	18
2.2. Normal dayanımlı beton numune dayanımları.....	19
2.3. Kirişte kullanılan çeliğin mekanik özellikleri	19
2.4. Kirişte kullanılan bazalt lifli donatının mekanik özellikleri	20
2.5. Kirişlerin donatı alanları, dengeli donatı oranları, efektif donatı oranları	43
2.6. Kirişlerin teorik ve deneysel taşıma gücü momentleri, akma momentleri....	44
2.7. Kirişlerin deformasyon faktörleri (DF).....	46
2.8. Kiriş deplasmanlarının Benmokrane ve diğerleri, Toutanji and Saafi, ACI 440.1R-15 yaklaşımları ve deneysel deplasmanlar ile karşılaştırılması	49
2.9. Kirişlerin en büyük yükleri, bu yüklere karşılık gelen deplasmanları, kopmadan sonraki yük ve deplasman değerleri	55

SİMGELER DİZİNİ

A_f	FRP donatı alanı
A_s	Çelik donatı alanı
a	Eşdeğer basınç bloğu derinliği
b	Kiriş gövde genişliği
c	Tarafsız eksen derinliği
c_u	Taşıma gücü değerinde tarafsız eksen derinliği
c_y	Akma anındaki tarafsız eksen derinliği
DF	Deformasyon Faktörü
d	Etkili kiriş yüksekliği
E_f	FRP'nin elastisite modülü
E_s	Çeliğin elastisite modülü
F_c	Basınç bölgesinde betona uygulanan bileşke kuvvet
F_f	Çekme bölgesinde FRP donatılara uygulanan bileşke kuvvet
F_s	Çekme bölgesinde çelik donatılara uygulanan bileşke kuvvet
f_c	Beton basınç dayanımı
f'_c	Beton basınç dayanımı
f_{ctd}	Betonun tasarım çekme dayanımı
f_f	FRP donatı çekme dayanımı
f_{fu}	FRP'nin tasarım çekme dayanımı
f_r	Beton kopma modülü
f_y	Çelik akma dayanımı
h	Kiriş yüksekliği
I_{cr}	Çatlama atalet momenti
I_e	Efektif atalet momenti
I_g	Tüm kesit atalet momenti

k	Nötr eksen derinliğinin takviye derinliğine oranı
M_a	Servis Momenti
M_{cr}	Çatlama momenti
M_u	Taşıma gücü momenti
M_y	Akma momenti
n_f	FRP donatının elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranı, FRP donatı adeti
n_s	Çelik donatının elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranı, çelik donatı adeti
β_d	Azaltma katsayısı
β_1	Eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğu dönüştürme katsayı. 28 MPa beton basınç dayanımına kadar 0.85 kullanılır. Beton basınç dayanımı 28 MPa'dan büyük ise her 7 MPa için 0.05 azaltılır, minimum değeri 0.65 alınır.
ϵ_{cu}	Betonun ezilme şekil değiştirmesi
ρ_{eff}	Efektif donatı oranı
ρ_f	FRP donatı oranı
$\rho_{f.b}$	Dengeli donatı oranı
ρ_s	Çelik donatı oranı
ϕ_u	Kırılmaya karşılık gelen eğrilik
ϕ_y	Çekme donatısının akmasına karşılık gelen eğrilik
ϕ_f	FRP donatı çapı
ϕ_s	Çelik donatı çapı

KISALTMALAR DİZİNİ

AFRP	Aramit Lif Takviyeli Polimer
BFRP	Bazalt Lif Takviyeli Polimer
BFRPRC	Bazalt Lif Takviyeli Polimer kullanılmış beton
CFRP	Karbon Lif Takviyeli Polimer
FRP	Lif Takviyeli Polimer
FRPRC	Lif Takviyeli Polimer kullanılmış beton
GFRP	Cam Lif Takviyeli Polimer
HSC	Yüksek Dayanımlı Beton
LVDT	Doğrusal Değişken Türevsel Dönüştürücü
RC	Betonarme
UHSC	Ultra Yüksek Dayanımlı Beton

1. GİRİŞ

1.1. FRP Malzeme ve Çeşitleri

Günümüzde; geleneksel betonarme yapılarda, ülkemizde ve dünyada yaygın olarak kullanılan yapı malzemesi, çelik ve betondur. Buna karşın, agresif çevre koşulları altındaki betonarme yapılarda, çelik donatı korozyonu, ciddi sorunlara neden olabilmektedir.

Örneğin, su yapılarında çelik donatıların kullanılması tavsiye edilmemektedir [1]. Bunun sebebi, betonarme eleman içerisindeki çeliğin olası korozyona uğramasıdır [2]. Benzer olarak geleneksel çelik donatı kullanılan köprü ve yer altı tankları gibi betonarme yapıların çoğu, sürekli olarak çevresel koşullara maruz kalmaktadır. Deneyler, çelik donatılı betonarme kirişlerin, özellikle tuz etkisi, donma çözünme ve alkali-silika reaksiyonlarının hasar verici etkilerine karşı çok duyarlı olduğunu göstermiştir. Yeni tasarlanan kirişlerde; korozyona karşı dayanıklı, metalik olmayan donatıların kullanılması ile bu problemin azaltılabileceği amaçlanmaktadır [3].

FRP (Fiber Takviyeli Polimer) kompozitler 21. yüzyılda geliştirilmiştir. Bu malzemeler ilk olarak askeriye ve uzay sanayinde kullanılmıştır. Son 30 yıldır bina türü yapılarda kullanılmaya başlanmıştır. Köprülerdeki çelik donatılı betonarme tablaların servis ömrü 25 yıl olarak beklenmektedir. Fakat FRP donatılı tablaların servis ömrünün en az 75 yıl olması beklenmektedir. Bazalt FRP donatılar, köprü kirişlerinde; tabliye ağırlığını azaltma, korozyon etkilerine karşı koruma, tamiratları azaltma özellikleri ile kullanılabilirliği önemli ölçüde artırmada mükemmel bir alternatiftir [3].

Malzemelerin belirtilen bu gelişim süreci içerisinde FRP kompozitler olarak bilinen türleri süreci hızlandırarak araştırmacılara birçok avantaj sunmuştur. FRP kompozitler son yirmi yılı geçen süre içerisinde binalar ve köprüler için hem ekonomik hem de birincil yapı malzemesi olarak gelişim göstermişlerdir.

FRP malzemeler, yüksek korozyon direnci, yüksek mukavemet ve iyi tasarım esnekliği gibi avantajları için betonarme yapılarda takviye elemanı olarak ve betonarme yapıların güçlendirilmesinde giderek daha fazla ve yaygın bir şekilde uygulanmıştır. Şu anda, FRP malzemeler, özellikle agresif çevresel koœullar altındaki yapılar için, altyapı korozyon sorunlarını çözmeye odaklı yeni yapılar geliœtirmek amacıyla kullanılmaktadır [4].

Betonarme yapılardaki çelik donatıların yerine FRP çubukların kullanılması etkili bir yöntemdir. Bu yöntem, çelik çubukların bozulmasından kaynaklanan beton dayanıklılık problemini çözmek ve elektromanyetikten korunmaya ihtiyaç duyulan özel yapıların gereksinimlerini karœılamak için kullanılabilir. Günümüzde, FRP çubuk takviyeli betonarme yapıların ve FRP çubukların performansı, inœaat mühendisliğinde önemli bir araœtırma alanıdır [5].

Son yıllarda, fiber takviyeli polimerlere (FRP), çelik takviyenin yerini alabilecek bir malzeme olabileceği ihtimali ile çok fazla ilgi gösterilmiştir. FRP malzeme; takviye çubukları, teller ve örgü kumaœlarının yanı sıra, kayıœ ve levhaların üretimi için de kullanılır. Ticari olarak temin edilebilen FRP malzemeler, camdan (G), aramit (A), karbon (C), bazalt (B) liflerin birbirine epoksi reçine, polyester veya vinil-ester ile bağlanması ile üretilir. Bu malzemeler GFRP, AFRP, CFRP ve BFRP olarak ayırt edilirler [6].

1.2. FRP'nin Avantajları

FRP malzemelerin birincil yapı malzemesi ve takviye elemanı olarak kullanılmasındaki en büyük etken, sahip olduğu karakteristik özellikleridir. FRP yapı malzemesi, bu karakteristik özellikleri sayesinde, pek çok yapı malzemesine, özellikle çeliğe, alternatif olma yolunda hızla ilerlemektedir. FRP, çelikle kıyaslandığında daha az çevresel etkiye sahip sürdürülebilir bir yapı malzemesi olarak kabul edilebilir [7].

FRP malzemenin avantajlarına bakıldığında aœağıdaki özellikler sıralanabilir [6-9].

- Korozyon dayanımı,
- Neme karşı dayanım
- Kimyasallar karşı yüksek direnç
- Manyetik direnç
- Düşük ısı iletkenliği
- Elektrik yalıtımı
- Hafiflik (Düşük yoğunluk)
- Yüksek çekme dayanımı
- Dinamik yükler altında iyi performans
- Yüksek mukavemet/ ağırlık oranı
- Uzun yıllar bakım gibi ek hizmete ihtiyaç duyulmaması
- Uzun ömür

1.3. FRP'nin Dezavantajları

FRP malzemenin tercih edilmesine imkan veren avantajları yanı sıra dezavantajları da bulunmaktadır. FRP malzemenin, çekme ve basınç gerilmesi arasındaki farklılık kadar boyuna ve enine mekanik özellikler arasındaki farklılıklar gibi bazı eksiklikleri vardır. FRP'nin ana eksikliği, çelik takviye ile karşılaştırıldığında, sünek olmayan davranışları ve uzun süreli yükler altında taşıma kapasitesi kaybı nedeniyle kırılmasıdır [6]. FRP donatılar lineer bir gerilme- şekil değiştirme davranışı izleyerek gevrek kırılma gösterirler. Ayrıca kullanıldıkları betonarme elemanda, daha büyük çatlak genişlikleri ve daha büyük sehim davranışlarına neden olurlar. [5,9]. FRP, kırılana kadar doğrusal elastik bir davranış sergiler ve genellikle geleneksel çelik çubuklara kıyasla sünekliğe sahip değildir. Bu da FRP'nin betonarme yapılarda takviye elamanı olarak kullanıldığında bir dezavantajdır [7].

Genel olarak, FRP materyalleri, çelik takviyeden daha düşük elastisite modülüne ve düşük termal genişleme katsayısına sahiptir. FRP takviyesi ultraviyoleye maruz kalmaya karşı duyarlıdır [6]. Diğer bir dezavantajı da ticari piyasada fiyatları yüksektir. İlk maliyeti yüksek olmasına rağmen uzun vadede sağlayacağı katkılar

dikkate alındığında yine avantajlı tarafta kalmaktadır. Örneğin, çelik korozyonunun büyük olasılıkla muhtemel olduğu, deniz yapılarını güçlendirmek için FRP çubuklarının kullanımı, deniz yapılarının servis ömrünü ve dayanıklılığı arttıracak ve bu da genel yaşam döngüsü maliyetlerinde bir azalmaya neden olacaktır [9].

1.4. FRP'nin Hibrit Kullanımı

Yukarıda açıklandığı üzere FRP donatının dezavantajını büyük ölçüde elimine etmek için, çelik donatı ile birlikte, hibrit, kullanımı araştırılmaya başlanmıştır. Çalışmalarda temel amaç, çelik donatının süneklik özelliğinden, FRP donatının da yüksek dayanım özelliğinden birlikte faydalanmak istenilmesidir.

FRP donatı kullanmış betonarme (FRPRC) elemanların sünekliğini arttırmak için, birçok araştırmacı FRPRC kirişlerine boyuna çelik çubukların eklenmesi tasarımını deneysel olarak araştırmıştır. Çelik çubukların eklenmesiyle, hibrit FRPRC kirişinin sünekliği, saf FRPRC kirişine kıyasla önemli ölçüde iyileştirilmiştir. Bu gibi süneklik düzeltilmesi, yapısal geçmeden önce, özellikle de yapı sismik yükler altındayken, önceden uyarı vereceği için önemlidir.

Çelik çubuklar, eğilme elemanının sünek davranışının korunmasında önemli rol oynar. Hibrit donatı senaryosunda, mukavemet esas olarak FRP takviyesiyle, süneklik ise çelik takviyesiyle sağlanabilir. Çelik donatı, kirişin yük taşıma kapasitesi için tasarlanmadığından, özellikle agresif ortamda belirli bir ölçüde çelik korozyonu kabul edilebilir. Optimize edilmiş yapısal performans, hibrit donatının uygun şekilde tasarlanmasıyla sağlanabilir. Ayrıca, hibrit FRPRC kirişlerinin deformasyonu ve çatlak genişliği, saf FRPRC kirişlerine kıyasla azalır.

Hibrit FRPRC kirişte, iki çeşit takviye elemanı; yani FRP ve çelik çubuklar, mukavemet ve sünekliğin iyileştirilmesinde farklı roller oynarlar. Hibrit FRPRC'deki çelik takviye, sünekliği artırabilse de; hibrit donatı oranı iyi tasarlanmamışsa, FRP takviyesinin kırılma kapasitesi nedeniyle, hibrit FRPRC'nin yük taşıma kapasitesi ciddi ölçüde azalabilir. Bu nedenle hibrit takviye oranı, A_f / A_s , sünekliği iyileştirme ve

yüksek yük taşıma kapasitesini koruma arasındaki dengeyi optimize etmek için önemli bir faktördür [7].

1.5. Literatür Çalışması

M.W. Goldstone ve arkadaşları [9], cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) çubuklarla takviye edilmiş, yüksek dayanımlı beton (HSC) ve ultra yüksek dayanımlı beton (UHSC) kirişlerinin eğilme davranışını deneysel olarak araştırmışlardır. Deneysel olarak, 28 günlük basınç dayanımları 80 MPa ve 120 MPa olan, 10 cm genişliğinde, 15 cm yüksekliğinde, 2,40 m uzunluğunda 6 adet betonarme kiriş kullanılmıştır. Kirişlerde üç farklı çapta donatı kullanılmıştır. Aderansı arttırmak için, tüm GFRP çubuklar kum ile kaplıdır. Kirişlerde kullanılan etriyeler çelik olup, donatı çapı 4 mm, etriye aralığı 5 cm'dir. Üretilen altı kiriş, üç noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Testlerde, kırılma modları, yük- deplasman ilişkisi, enerji absorbe kapasitesi, donatı yük- şekil değiştirme davranışı, beton yük- şekil değiştirme davranışı, donatı oranı etkisi, beton dayanımı etkisi HSC (Yüksek Dayanımlı Beton) ve UHSC (Ultra Yüksek Dayanımlı Beton) incelenmiştir. Test sonuçlarında, denge üstü donatı oranlı yüksek dayanımlı (HSC) ve ultra yüksek dayanımlı (UHSC) kirişlerinin; denge altı donatı oranlı ani ve gevrek kırılmalık gösteren HSC ve UHSC kirişlere kıyasla yük taşımaya devam ettiği görülmüştür. Denge üstü donatı oranlı kirişlerde, beton dayanımının artmasıyla yük taşıma kapasitesinin arttığı; donatı oranının ve beton dayanımının artmasıyla, enerji absorbe kapasitesinin arttığı görülmüştür. Bununla birlikte, denge üstü donatı oranlı kirişlerde, aynı donatı oranı için, beton dayanımının artmasıyla, kiriş orta deplasmanında artışın meydana geldiği görülmüştür. Fakat, kırılmanın donatının kopması ile son bulduğu, denge altı donatı oranlı kirişlerde, beton dayanımının artmasının; yük taşıma kapasitesinde, kiriş orta deplasmanında, çatlama sonrası eğilme rijitliği ve enerji absorbe kapasitesinin artmasında önemli bir etkisinin olmadığı anlaşılmıştır.

Zhang ve arkadaşları [10], bazalt elyaf takviyeli polimer (BFRP) çubuklarla takviye edilmiş betonarme kirişlerin eğilme davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel olarak, farklı donatı oranlarında BFRP donatılı, altı adet; bir adet referans kirişi

olmak üzere yedi kiriş üretilmiştir. Üretilen kirişlerin genişliği 18 cm, yüksekliği 23 cm, uzunluğu 1,80 m'dir. Üretilen kirişler dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları sonlu elamanlar yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Lau ve arkadaşları [11], 28 cm genişliğinde, 38 cm yüksekliğinde, 4.60 m boyunda 12 adet kiriş numunesi üretmiştir. Numunelerden beş tanesinde sadece cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) donatı, üç tanesinde sadece çelik donatı, üç tanesinde hem GFRP hem çelik (hibrit kullanım) donatı bulunmakta olup, bir tanesinde hiç donatı bulunmamaktadır. Kirişlerin donatı oranları farklıdır. Kullanılan etriyeler 8 mm çapında çelik olup, 20 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Ayrıca sadece GFRP ve sadece çelik donatı kullanılan kirişlerde, etriye kanca derecesi de değişken olarak kullanılmış olup, etkisi araştırılmıştır. Kirişler üç noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Test sonuçlarında, hibrit kirişlerin, sadece GFRP kullanılan kirişlere göre daha sünek davrandıkları görülmüştür. Eğilme sünekliğinin, denge üstü GFRP donatılı kirişlerde takviye oranının artırılmasıyla, hibrit kirişlerde ise çelik oranının artırılmasıyla artacağı belirlenmiştir.

Qu ve arkadaşları [12], çalışmalarında çelik ve cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) çubuklarının betonarmede kullanılması, bu kullanım ile uygun mukavemet, faydalı ve yüksek durabilite özellikleri içeren betonarme malzeme hedeflenmiştir. Hibrit çelik ve GFRP takviyeli betonarme kirişlerin yük-deplasman davranışını teorik ve deneysel olarak araştırılmıştır. Sadece çelik veya sadece GFRP çubuklarla takviye edilmiş iki kontrol kirişini de içeren sekiz kiriş test edilmiştir. Takviye miktarı ve GFRP' nin çeliğe oranı araştırılan ana parametrelerdendir. Hibrit kirişler, normal efektif takviye oranı ile, iyi süneklik, kullanışlı ve yüksek yük taşıma kapasitesi sergilemişlerdir. Hibrit yapıya dahil olan çelik, kirişin sünekliğini artırmıştır. Deney sonuçları ile teorik analizden elde edilen tahminler karşılaştırıldığında, hibrit çelik-GFRP betonarme kirişlerin yük taşıma kapasiteleri, eğilme davranışı ve çatlak genişliği konularından tatmin edici cevaplar alınmıştır.

Qin ve arkadaşları [7], çalışmalarında FRP ve çelik takviye çubuklarından oluşan hibrit betonarme kirişlerin davranışını simüle etmek için toplam 15 adet üç boyutlu

doğrusal olmayan sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Tahmin edilen sonuçları, deneysel gözlemlerle karşılaştırarak, simülasyon şemasının doğruluğunun teyit edilmesi için altı model kullanılmıştır. Ayrıca, sonlu eleman modelleri, FRP ve çelik arasındaki hibrit donatı oranının, hem düşük hem de aşırı takviyeli tasarımlarda etkisini araştırmak için kullanılmış olup, FRPRC kirişlerindeki hibrit takviye oranını belirlemek için kılavuz oluşturmuşlardır. Deneysel ve simülasyon sonuçları arasındaki sapmanın % 10'dan daha küçük olması nedeniyle, FRPRC kirişlerinin yük-şekil değiştirme davranışını tahmin etmek için geliştirilen sonlu eleman modellerinin uygulanabileceği sonucuna varılmıştır. Mühendisler ve araştırmacılar, gelişmiş sonlu eleman modellerini FRPRC'nin performansını araştırmak amacıyla güçlü bir araç olarak kullanabileceklerini belirlemişlerdir. Aşırı takviyeli senaryoda, hibrit takviye oranı, A_f / A_s , yeterli süneklik ve rijitlik için 1 ila 2.5 aralığında tavsiye edilmiştir. Süneklik gelişimini çelik sağlamaktadır. FRP takviyesinin miktarı, aşırı uzamaya engel olmak için çelik takviyenin miktarından daha büyük olmalıdır. Hibrit FRPRC için aşırı takviye edilmiş tasarım; yüksek rijitlik, yüksek yük taşıma kapasitesi ve iyi süneklik davranışı için tercih edilen bir seçenek olarak gösterilmektedir. Az takviye edilmiş tasarımın, A_f / A_s 'ın dikkatlice kontrol edilmesi şartıyla ekonomik bir yol olarak da kullanılabilmesi anlaşılmıştır.

Lapko ve arkadaşları [3], BFRP donatı takviyeli kirişlerin deneysel ve teorik sehimlerinin karşılaştırmalı analizini yapmışlardır. Çalışmanın temel amacı, BFRP donatılı betonarme kirişlerin deformasyon davranışını elde etmektir. Başlıca hedef, BFRP donatıların ana mekanik özelliklerini tanımlamak ve eğilmeye konu betonarme kirişte, donatı olarak kullanılmasının uygun olup olmayacağına karar vermektir. 8 mm çapında BFRP donatı kullanılarak 3 adet kiriş, referans kirişi olarak da çelik donatılı 3 adet kiriş üretilmiştir. Deney numunelerinin eni 8 cm; yüksekliği 14 cm, boyu ise 1,2 m' dir. Deney numunelerinin orta açıklık bölgesinde, üst tarafta boyuna donatı ve etriye bulunmamakta olup, mesnet bölgelerinde 2 adet 8 mm çapında çelik boyuna donatı ile etriyeler yerleştirilmiştir. Test kirişlerinde kullanılan beton sınıfı C30/37'dir. Test kirişlerinin incelenmesi sırasında, kritik yüklerde kiriş sehim, betonarme rijitliği ve çatlak genişlikleri kaydedilmiştir. Bu, bazalt BFRP çubuklarının kesit rijitliğinin çok daha az olduğu, aynı kesitteki çelik çubuklarla takviye edilmiş kirişlere kıyasla daha yüksek sehim ve çatlak genişlikleri ortaya

çıkardığını göstermiştir. Bilinen formüllere dayanılarak, BFRC kiriş sehimlerinin teorik analiz sonuçları, özellikle düşük yükleme seviyeleri altında deneysel olarak elde edilen deplasmanlara kıyasla bazı önemli tutarsızlıklar göstermiştir. Sonuçlar, korozyona karşı tam dirençli olan bazalt donatının, çevresel saldırıya maruz kalmış betonarme köprü kirişleri gibi betonarme yapıların güçlendirilmesi için iyi bir alternatif olabileceğini ortaya koymuştur.

Oh ve arkadaşları [13], yeni geliştirilen cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) donatının, beton eğilme elemanlarında takviye olarak özelliklerini araştırmak için kiriş testleri yapmışlardır. Aşırı takviyeli dokuz kiriş, farklı donatı çeşitleri, farklı donatı oranları ve farklı pas payı kalınlığı kullanılarak kırılana kadar düzenli olarak yüklenmiştir. Sonuçlar, kırılma modu, moment eğriliği, eğilme kapasitesi, yük-sehim ilişkisi ve çatlak genişliği ile karakterize edilmiştir. Test sonuçları teorik model ve yeni geliştirilen GFRP donatı performansının piyasada bulunan GFRP donatısı ile karşılaştırılabilir olduğunu gösteren, American Concrete Institute dizayn kodları, ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, deneysel gözlemlere dayanarak, çok katmanlı GFRP donatılı kirişlerin eğilme kapasitesini tahmin etmek için bir denklem ve moment eğriliği için teorik bir model de sunulmuştur.

Inman ve arkadaşları [14], çalışmalarında betonarme kirişler içerisindeki bazalt fiber takviyeli polimer (BFRP) çubuk ve konvansiyonel çelik çubuk üzerindeki mekanik ve çevresel performansı genel olarak karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, betonarme kirişlerdeki BFRP liflerinin, üretim sırasında daha az malzeme ve enerji kaynağı gerektirdiği için, çevre profiline ve daha az emisyonu sahip olduğu için, çelikten daha güçlü ve daha hafif olduğunu göstermektedir. Prefabrik BFRP betonarme kirişlerinin, çelik betonarme kirişlerinin emisyonlarının yaklaşık yarısında emisyon olduğundan, gelecekteki pazarda yerinde inşa edilmek yerine prekast sektöründe olması beklenmektedir.

Kassem ve arkadaşları [15], karbon, cam ve aramit fiber çubuk takviyeli 24 adet tam ölçekli betonarme kirişin eğilme davranışı ve kullanılış performansı incelemişlerdir. Kirişler 3 m uzunluğunda, 20 cm genişliğinde, 30 cm derinliğinde dikdörtgen kesitlidir. On altı kirişe CFRP çubuklar, dört kirişe GFRP çubuklar, iki kirişe aramit-

FRP çubuklar ve iki tanesi referans kirişi olmak üzere çelik çubuklar takviye edilmiştir. Farklı yüzeylere sahip kumlu ve nervürlü olmak üzere, iki tip FRP çubuk kullanılmıştır; Kirişler; 2,75 m mesnet açıklığı olacak şekilde dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Deney sonuçları mevcut tasarım esasları ile karşılaştırılmıştır. Deney programında ana değişkenler; donatı çeşidi, donatı oranı ve donatı dizilişidir. Deneylelerden elde edilen sonuçlar; çatlama dayanımı, nihai dayanım, deplasman ve çatlak genişliği, farklı tasarım kodları dikkate alınarak karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlara ve tahmin modellerine dayanarak, şu sonuçlara ulaşılmıştır. Tüm FRP takviyeli kirişler; çatlayana kadar ve çatlama ile kırılma arasında neredeyse lineer bir davranış sergilemiştir. Bununla birlikte, kırılma nispeten büyük deplasmanlarda gerçekleşmiştir. Deneylelerden elde edilen sonuçların ACI 440.1R-06 (ACI Committee 440 2006) ile uyumlu olduğu görülmüştür. Kesit orta açıklığındaki nötr eksen derinlikleri, kırık kesit analizine dayanan sayısal tahminler ile iyi bir şekilde karşılaştırılmıştır. Tahmin edilen çatlama momentlerinin deney sonuçları ile iyi bir uyum içinde olduğu gözlenmiştir. Deney programında seçilen parametreler (donatı oranı, donatı diziliş ve donatı tipi), kiriş rijitliği ve yük-deplasman davranışını etkilemiştir. FRP çubuklarıyla takviye edilmiş kirişlerdeki çatlak genişliği, kırılma momenti ile doğrusal olarak değişmiştir. Çatlama genişliği, daha büyük takviye oranlarına sahip kirişler için daha küçüktür. Ayrıca kum kaplı çubuklarla takviye edilmiş kirişler, nervürlü çubuklar ile takviye edilmiş kirişlere kıyasla daha fazla çatlak ve daha az çatlak genişliği sergilemiştir. Bu da, test edilen kum kaplı çubukların, nervürlü çubuklardan daha iyi bir aderansa sahip olduğu sonucunu göstermiştir.

Tomlinson ve arkadaşları [16] bazalt lif katkılı polimer (BFRP) donatı ve etriye takviyeli betonarme kirişlerin kesme ve eğilme davranışı incelenmişlerdir Dokuz adet $150 \times 300 \times 3100$ mm ölçülerinde betonarme kiriş, BFRP eğilme dayanımının etkisi incelenmek üzere, yapısal performans üzerindeki dengeli oran olan 0.28 ile 1.60 arasında değişen oranlar ile, dört noktalı eğilme testi altında test edilmiştir. Çeşitli BFRP eğilme donatı oranlarına sahip betonarme kirişler ile BFRP veya çelik kesme donatısı takviyeli kirişlerin yanı sıra herhangi bir kesme donatısı olmayan kirişler de test edilmiştir. Çalışma; nihai ve servis yüklerinin, tüm kesme donatı tipleri için eğilme donatı oranı ile arttığı, servis yük seviyelerinin ise etriye tipinden

etkilenmediğini göstermiştir. Bu çalışma ile, çeşitli potansiyel kırılma modlarını, yani eğilme çekmesi, eğilme basıncı, etriye olmayan kirişlerin kayma kırılması ve BFRP etriyesi kopmasıyla kayma kırılması incelenmiştir. Sonuçlar, referans çelik takviyeli kirişler ve çeşitli tasarım şartnameleri önerileri ışığında karşılaştırılmış ve değerlendirilmiştir. Şu sonuçlara ulaşılmıştır. Kirişlerin nihai kapasiteleri, eğilme veya kesme olsun, kırılma modundan bağımsız olarak doğrudan eğilme donatı oranı ile ilgilidir. Öte yandan, servis yükleri aralığındaki yük deplasman ilişkileri, kesme donatısı tipi tarafından belirgin şekilde etkilenmemiştir. Etriye olmayan kirişlerde, BFRP eğilme donatı oranı (ρ) arttıkça, majör diyagonal kesme çatlamaının meydana geldiği yük artmıştır. BFRP etriyeli kirişlerde, etriye kopması ile kirişler kırılmıştır. BFRP eğilme takviye oranı arttıkça nihai kesme kapasiteleri artmıştır. BFRP eğilme takviyeli kirişler ile BFRP veya çelik etriyeli kirişler, aynı takviye oranına (ρ) sahip olan kontrol çelik takviyeli muadillerinden, önemli ölçüde daha yüksek mukavemetlere (2.6-2.9 kat) sahip olmuştur. ACI 440.1R-06 ve CSA S806-12 şartnamelerinin, BFRP eğilme takviyeli kirişlerin, eğilme dayanımını tahmin etmek için yeterli görülmüştür.

Pawlowski ve arkadaşları [17], BFRPRC (bazalt lif takviyeli polimer kullanılan betonarme) kirişlerinin eğilme davranışlarının sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Bilindiği üzere, bazalt elyaf takviyeli polimerler (BFRP) yeni bir malzemedir. Kullanımındaki deneyim eksikliği nedeniyle, BFRP'nin betonarmede kullanımının araştırılması önerilmiştir. Ayrıca, daha önceden mevcut şartnamelerde bunun donatı elemanı olarak kullanılması düşünülmemiştir. Bu makale, kısa süreli statik yükler altında, BFRP takviyeli betonarme kirişlerin eğilme davranışının deneysel ve sayısal olarak incelenmesinin sonuçlarını sunmaktadır. Kirişlerin takviye oranı açısından farklılaştığı ve bu parametrenin etkisi incelenmiştir. Bu parametrenin kirişlerin rijitliği ve eğilme mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Deney elemanları, daha sonra Sonlu Elemanlar Yöntemi ile analiz edilmiştir. Bu çalışma, BFRPRC kirişlerinin eğilme davranışlarının sayısal ve deneysel bir çalışmasının sonuçlarını sunmaktadır. Bu sonuçlara dayanarak, bazı çıkarımlar yapılmıştır. Takviye oranının, BFRPRC kirişlerinin eğilme davranışı üzerinde önemli bir etkisi vardır. Takviye oranındaki artış, nihai yüklerde ve kirişlerin rijitliğinde de artışa neden olur. BFRPRC üyelerinin iki kırılma modu

vardır. Donatı oranı ρ_f , ρ_{fb} dengeli takviye oranından (ACI 440.1R-06'ya göre) daha büyük olduğunda, kirişler betonun ezilmesi ile kırılır. Bu tür bir kırılma ani değildir, kirişin davranışı biraz süneklik gösterir. Bununla birlikte, takviye oranı ρ_f , ρ_{fb} dengeli takviye oranından (ACI 440.1R-06'ya göre) düşük olduğunda, donatı kopması nedeniyle kirişler aniden kırılır. BFRP çubuklarının mekanik özellikleri nedeniyle, kirişler büyük deplasmanlarda meydana gelen kırılmaya kadar neredeyse doğrusal (lineer) davranır. Kirişlerin tasarımı, kullanılabilirlik sınır durumlarına tabidir. FRP çubukları montaj sırasında hasara çok duyarlıdır. Bu tür bir takviye için beklenmedik hasarlardan kaçınmak için özen gösterilmelidir. Yapılan çalışma sonucunda, deneysel ve sayısal sonuçlarda uyum gözlenmiştir. Gelecekte sayısal hesaplamaların, laboratuvar testlerine iyi bir alternatif olabileceği belirlenmiştir.

High ve arkadaşları [18], bazalt fiber takviyeli polimer (BFRP) çubukların betonarme elemanlar için eğilme takviye elemanı olarak ve betonun mekanik özelliklerini arttırmak için bazalt liflerinin katkı maddesi olarak kullanılmasını araştırmışlardır. Ticari-ulaşılabilirliği kapsamında, malzeme özellikleri ve gelişim süreci değerlendirilmiştir. Bu makalede sunulan araştırma programı iki çalışmadan oluşmaktadır. İlk çalışmada, BFRP çubuklarıyla takviye edilmiş beton elemanların eğilme davranışları incelenmiştir. İlk çalışmanın bir parçası olarak, iki BFRP çubuğunun mekanik özellikleri ve bağ kuvvetleri araştırılmıştır. BFRP takviyeli beton elemanların deplasman ve dayanımını öngören ACI 440.1R-06 tasarım kılavuzlarının uygulanabilirliği tartışılmıştır. İkinci çalışmada, betonun özelliklerini geliştirmek için iki farklı tipteki bazalt lifinin kullanılmasının etkisi araştırılmıştır. Test sonuçlarına dayanarak, bazı sonuç elde edilmiştir. Bu çalışmada ortalama 45 GPa elastisite modülüne, yaklaşık 1000 MPa nihai çekme dayanımına sahip olan nervürlü BFRP kullanılmıştır. BFRP çubukları ile takviye edilmiş eğilme elemanlarının tasarımı, çubukların düşük elastisite modülüne bağlı olarak kullanılabilirlik gereksinimleri ile kontrol edilebilir. Betonarme elemanda bazalt liflerin kullanılması, uçucu kül ve diğer katkı maddeleri içeren, düşük su/ çimento oranına sahip betonun 28 günlük basınç dayanımını arttırmıştır. Bazalt liflerin kullanılması, ayrıca erken yaşlardaki beton basınç dayanımını da arttırmıştır. Bazalt liflerin kullanımı, betonun kopma modülünün artmasına neden olmuştur. Ancak, uçucu kül ve diğer katkı maddeleri içeren düşük su/ çimento oranına sahip beton

karışımı için eğilme mukavemetindeki artış daha belirgindir. Bazalt liflerinin kullanımı, beton basınç dayanımı üzerinde çok az etkili olmuştur; Bununla birlikte, eğilme modülünü önemli ölçüde artırmıştır.

Elgabbas ve arkadaşları [19], yeni geliştirilen BFRP'lerin beton kirişlerdeki yapısal performansının araştırılması ve bağ katsayısının belirlenmesi için deneysel çalışma sunmuşlardır. Fiber takviyeli polimer (FRP) teknolojisindeki ilerlemeler, yaygın olarak kullanılan cam, karbon ve aramit'e ilaveten bazalt gibi yeni liflerin kullanımına ilgi uyandırmıştır. Son zamanlarda, yeni (BFRP) çubukları geliştirilmiştir. Ancak BFRP çubuklarının beton elemanlarda nasıl davrandığını tanımlamak ve anlamak için araştırma yapılması gerekmiştir. Bu bağlamda, BFRP çubukları ile takviye edilmiş toplam 6 beton kiriş inşa edilmiş ve kırılana kadar test edilmiştir. Test kirişleri 200 mm genişliğinde, 300 mm yüksekliğinde ve 3100 mm uzunluğundadır. Sarmal olarak kumla kaplanmış yüzeyleri olan 10, 12 ve 16 mm çaplarında BFRP çubukları kullanılmıştır. Kiriş numuneleri, CSA S806-12'nin Ek S'sine uygun olarak tasarlanmış ve kırılana kadar 2700 mm'lik net açıklık olacak şekilde, dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Kiriş test sonuçları, çatlama davranışı, eğilme ve kırılma modları açısından tanıtılmış ve tartışılmıştır. Test edilen BFRP-RC kirişleri, ACI ve CSA denklemleri kullanılarak tahmin edilen değerlerden daha düşük çatlama momentleri göstermiştir. ACI ve CSA, test edilen kirişin çatlama momentini sırasıyla % 27 ve % 24 oranında fazla tahmin etmiştir. GFRP çubuklarıyla takviye edilmiş kirişler için benzer bulgular bildirilmiştir. Her bir kirişteki ilk üç çatlaktan belirlenen ortalama bağ katsayısı, BFRP çubukları için 0.76 ± 0.03 olmuştur. Bu, kum kaplı FRP çubukları için bağ katsayısının 0.8'e eşit olma şartını tavsiye eden Kanada Karayolu Köprüsü Dizayn Kodu (CSA S6-14) ile uyumludur.

Ge ve arkadaşları [5], çalışmalarında BFRP (Bazalt Fiber Takviyeli Polimer) çubuk ve çelik çubuklar ile takviye edilmiş hibrit betonarme kirişlerin eğilme davranışları incelenmiştir. BFRP çubuklarının standart çekme testi ve beş farklı hibrit betonarme kirişin statik eğilme deneyleri yapılmıştır. Testler, BFRP çubuklarının çelik çubuklara kıyasla yüksek çekme mukavemetine, düşük elastik modüle sahip olduğunu ve çekme kırılmasının ani olduğunu göstermiştir. Nervürlü BFRP çubukları ve beton arasındaki bağ kuvvetinin, aynı çaptaki nervürlü çelik

çubuklarınkine benzer ve iyi olduğu görülmektedir. BFRP çubuklarının bağ kuvveti nispi katsayısı 1.0 olarak düşünülebilir. Çatlak açıklığı ve çatlak genişliği analiz edilmiş ve hesaplama için uygun formüller önerilmiştir. Betonarmenin ortalama çatlak aralığı hesaplama teorisi hala FRP çubuk ve çelik çubuk takviyeli hibrit betonarme kirişler için uygundur. Verilen formülle hesaplanan maksimum çatlak genişliğinin teorik değerinin, deneysel değere uygun olduğu belirlenmiştir. Aynı yükteki, BFRPRC kirişlerinin sehim maksimum, RC kirişlerin sehim minimum ve hibrit RC kirişlerinin sehim bunların arasında bulunmuştur. Hibrit RC kirişlerinin sehim A_f / A_s oranının azalması ile azalmıştır. Hibrit RC kirişlerinin rijitlik azaltma faktörü K_d , A_f / A_s artışıyla azalmıştır. Aynı yüklemde, RC kirişin ortalama çatlak aralığı minimum, FRPRC kirişinin ortalama çatlak aralığı maksimum ve hibrit RC kirişlerin ortalama çatlak aralığı ortada olmuştur. Benzer olarak nihai taşıma kapasitesi, aynı yükleme altında ortalama çatlak aralığı, A_f / A_s oranının düşüşüyle azalmıştır. Uygun hibrit takviyeli kirişlerin eğilme kapasitesi analiz edilmiş ve değerinin hesaplanması için basitleştirilmiş bir formül önerilmiştir. Sonuçlar, önerilen basitleştirilmiş formül ile hesaplanan eğilme kapasitesin değerinin, deneysel değere yakın olduğunu göstermiştir. Bu, formülün başarıyla uygulanabileceğini ortaya koymuştur. Malzemelerin tam anlamıyla kullanılmasını sağlamak için, hibrit RC kirişlerinin; yüksek eğilme kapasitesine, ancak düşük sehim gereksinimlerine sahip yapılarda kullanılması önerilmiştir. Takviye oranı ve A_f / A_s oranı uygun bir şekilde kontrol edilerek; hibrit takviyeli kirişlerin sünekliği, normal servis koşullarında gereksinimleri karşılayabilmekte olduğu belirlenmiştir.

FRP donatılar için dünyada sıklıkla kullanılan üç tane standart vardır. Bunlar;

- 1- Japon Standardı (JSCE) [20]
- 2- Kanada Standardı (CSA S806-12) [21]
- 3- Amerikan Standardı (ACI 440.1R-15) [22] 'tir.

1- Japon Standardı (Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials) [20]: Bu yönetmelik; malzemeler, yapım ve kalite kontrol kısımlarından oluşur. Karbon, aramit, cam, vinil lif ve kompozit malzemelerden bahsetmektedir.

2- Kanada Standardı (Design and Costruction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers) [21]: FRP bileşenlerinin ve takviye malzemelerinin özelliklerinden bahsetmektedir.

3- Amerikan Standardı (Guide for Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars) [22] : En yaygın kullanılan standarttır. Malzeme özellikleri, durabilite, tasarımda göz önünde bulundurulacak hususlar, eğilme, kesme, büzülme ve ısı etkisi, donatılardaki ekler, tasarım örnekleri kısımlarından oluşur. FRP donatılarda basınç kontrollü davranış, sınıra yakın olarak arzu edilir. FRP donatının çekme kopmasından önce beton ezilmesiyle eğilme elemanı bazı inelastik davranış sergiler.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Deney Programı

Yapılan çalışmada; 150 mm eninde, 300 mm yüksekliğinde dikdörtgen kesitli, 3000 mm uzunluğunda 6 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Betonarme kirişlerin 3 tanesinde normal dayanımlı beton, diğer 3 tanesinde yüksek dayanımlı beton kullanılmıştır. Tüm kirişlerde basınç donatısı olarak 2 adet 10 mm çapında (2Ø10) nervürlü çelik donatı, etriye olarak 5 mm çapındaki 75 mm aralıkta (Ø5/75) çelik donatı kullanılmıştır. Çekme donatısı olarak, çelik ve bazalt lif takviyeli polimer (BFRP) malzeme, farklı donatı oranlarında hibrit olarak kullanılmıştır. Kirişlerdeki değişken parametreler; beton dayanımı, çekme donatısı çeşit, adet ve oranıdır.

Kirişler isimlendirilirken sırasıyla, beton dayanımı (N: Normal Dayanımı, H: Yüksek Dayanım), çekme bölgesindeki bazalt donatı sayısı, çekme bölgesindeki çelik donatı sayısı, parantez içerisinde ise bazalt donatı çapı ve çelik donatı çapı gösterilmiştir.

Deneylerde kullanılan kiriş numunelerinin isimleri ve açıklamaları aşağıda verilmiştir.

HB2S3 (B10S10): Yüksek Dayanımlı, çekme bölgesinde 2 adet 10 mm çapında BFRP donatı, 3 adet 10 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

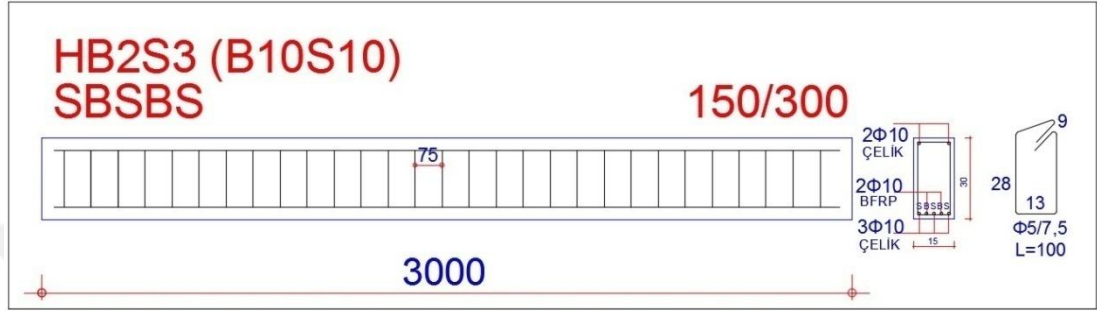
HB3S2 (B10S10): Yüksek Dayanımlı, çekme bölgesinde 3 adet 10 mm çapında BFRP donatı, 2 adet 10 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

HB3S2 (B10S12): Yüksek Dayanımlı, çekme bölgesinde 3 adet 10 mm çapında BFRP donatı, 2 adet 12 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

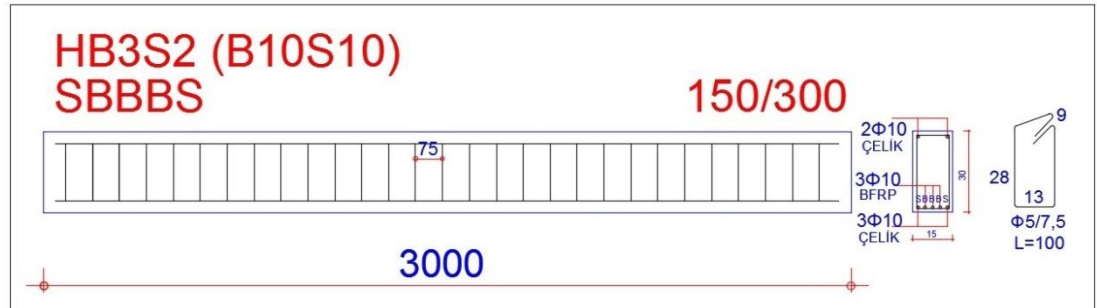
NB3S2 (B10S10): Normal Dayanımlı, çekme bölgesinde 2 adet 10 mm çapında BFRP donatı, 3 adet 10 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

NB2S3(B10S12): Normal Dayanımlı, çekme bölgesinde 2 adet 10 mm çapında BFRP donatı, 3 adet 12 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

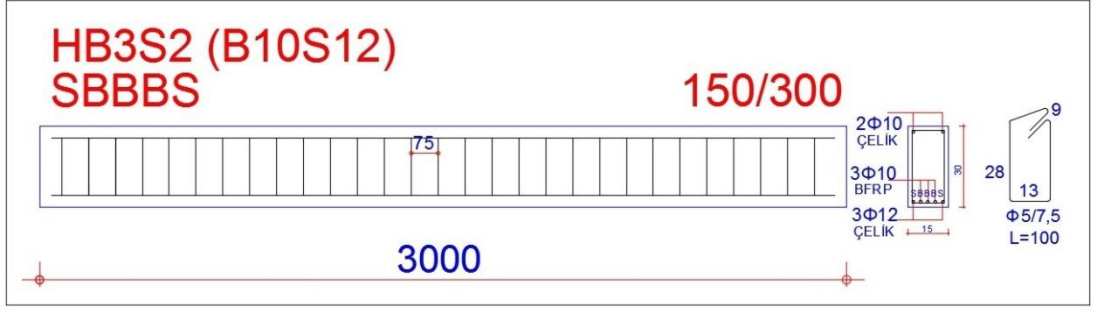
NB2S3(B10S10): Normal Dayanımlı, çekme bölgesinde 2 adet 10 mm çapında BFRP donatı, 3 adet 10 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş



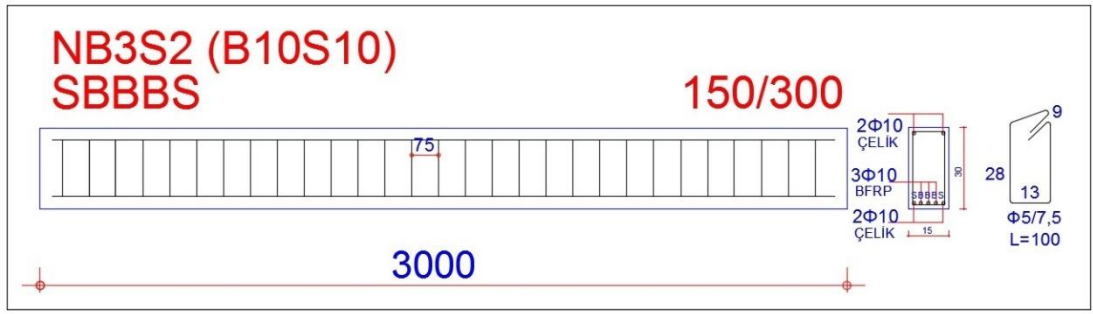
Şekil 2.1. HB2S3 (B10S10) Kiriş Donatı Detayı



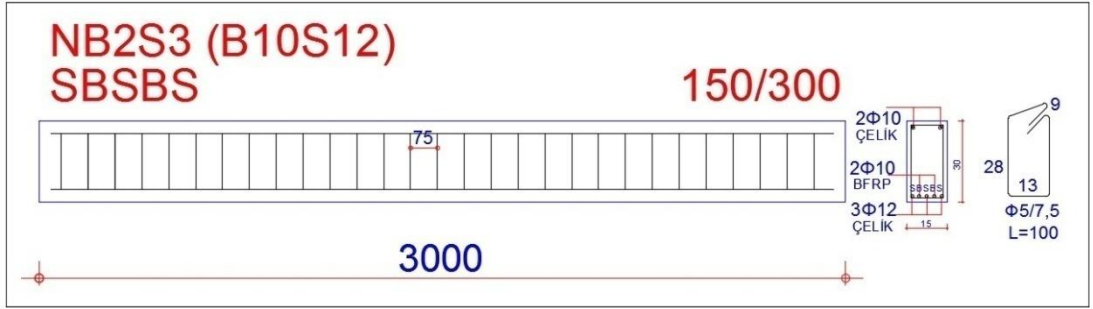
Şekil 2.2. HB3S2 (B10S10) Kiriş Donatı Detayı



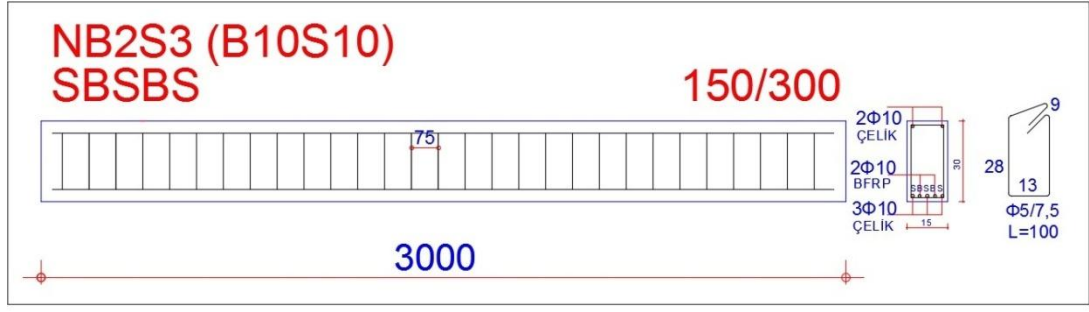
Şekil 2.3. HB3S2 (B10S12) Kiriş Donatı Detayı



Şekil 2.4. NB3S2 (B10S10) Kiriş Donatı Detayı



Şekil 2.5. NB2S3 (B10S12) Kiriş Donatı Detayı



Şekil 2.6. NB2S3 (B10S10) Kiriş Donatı Detayı

2.2. Malzeme Özellikleri

2.2.1. Beton Özellikleri

Deneyleerde, üç kirişte normal dayanımlı beton, üç kirişte yüksek dayanımlı beton kullanılmıştır. Kullanılan yüksek dayanımlı ve normal dayanımlı beton özellikleri aşağıdaki çizelgelerde belirtilmiştir.

Çizelge 2.1. Yüksek dayanımlı beton numune dayanımları

	Numune No	Numune Boyutu (mm x mm)	Küp Basınç Dayanımı (MPa)	Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Silindir Basınç Dayanımı (MPa)
7 günlük	1	150 X 150	68	57,80	57,46
	2	150 X 150	67,2	57,12	
28 günlük	3	150 X 150	74,6	63,41	62,64
	4	150 X 150	71,4	60,69	
	5	150 X 150	75,1	63,83	

Çizelge 2.2. Normal dayanımlı beton numune dayanımları

	Numune No	Numune Boyutu (mm x mm)	Küp Basınç Dayanımı (MPa)	Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Silindir Basınç Dayanımı (MPa)
7 günlük	1	150 X 150	33,15	28,18	28,80
	2	150 X 150	35,30	30,00	
	3	150 X 150	33,19	28,21	
28 günlük	4	150 X 150	44,47	37,80	37,89
	5	150 X 150	45,54	38,71	
	6	150 X 150	43,71	37,15	

2.2.2. Çelik Donatı Özellikleri

Kirişlerde kullanılan çelik donatılar S420 çeliğidir. S420 çeliği mekanik özellikleri aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Kirişte kullanılan çeliğin mekanik özellikleri

Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)
S420 Çeliği	420	500

2.2.3. BFRP Donatı Özellikleri

BFRP malzeme özellikleri, laboratuardaki imkanların yetersiz olmasından dolayı test edilememiş olup, katalogdan alınmıştır. Mekanik özellikler aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 2.4. Kirişte kullanılan bazalt lifli donatının mekanik özellikleri

Malzeme	Kopma Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Bazalt Lifli Donatı	1.100	70.000

2.3. Kirişlerin Tasarımı ve Hazırlanması

150x300x3000 mm ölçülerinde hazırlanan kalıplara, kiriş donatılar yerleştirilmiştir. Daha sonra beton dökümü gerçekleştirilmiştir. İlk olarak yüksek dayanımlı kirişler hazırlanıp, beton dökümü yapılmış, yüksek dayanımlı kirişlere ait eğilme deneyleri tamamlandıktan sonra, normal dayanımlı kirişler hazırlanmış ve deneyleri yapılmıştır.



Şekil 2.7. Yüksek Dayanımlı Kirişlerin Beton Dökümü Sonrası Görüntüleri



Şekil 2.8. Normal Dayanımlı Kirişlerin Beton Dökümü Sonrası Görünüşleri

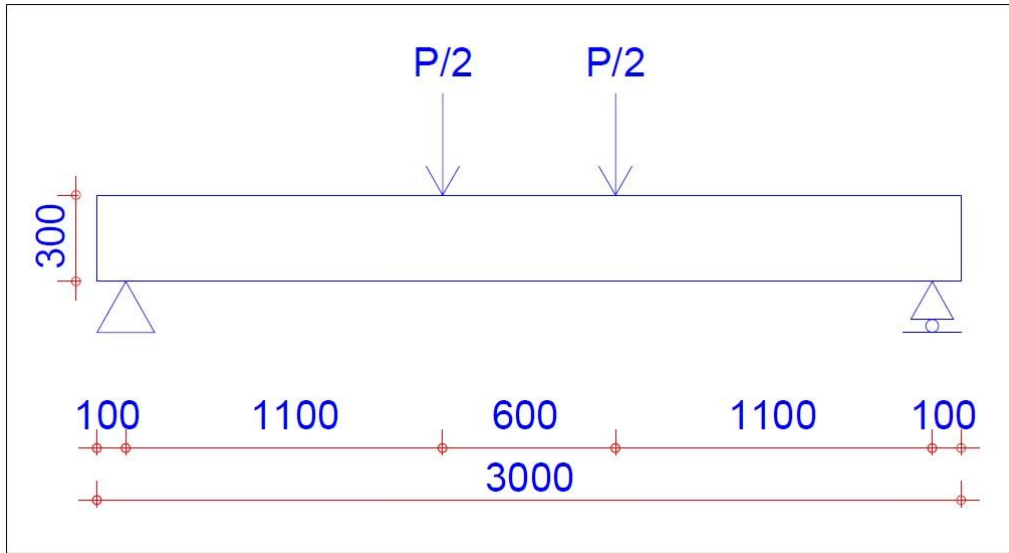
2.4. Yükleme ve Ölçüm Düzenegi

Üretilen kirişler dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Üretilen betonarme kiriş numunesi bir taraftan sabit mesnetli, diğer taraftan kayıcı mesnetli olmak üzere iki mesnet üzerine yerleştirilmiştir. Mesnetler, betonarme kirişin uç noktalarından 100 mm içeride olacak, 2800 mm açıklık kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra yerleştirilen betonarme kiriş üzerine, yine bir taraftan sabit mesnetli, diğer taraftan kayıcı mesnetli olacak şekilde, 13.50 x 13.50 kutu kesitli 80 cm uzunluğunda çelik yükleme kiriş yerleştirilmektedir. Çelik kiriş, yükleme kirişi veya yük dağıtma kirişi olarak kirişi üst taraftan iki noktadan yüklemek için kullanılır. Çelik kiriş üzerine, 2 cm çapında, 15 mm uzunluğunda, 6 adet çelik dolu kesitli silindirler yerleştirilir. Bu silindirler üzerine yükleme plakası, onun üzerine de yük hücresi yerleştirilir. Yük hücresi üzerinde, yüklemeyi sağlayabilmek için hidrolik krikolar bulunmaktadır.

Kiriş orta noktasına, elektronik deplasman ölçer (LVDT) takılmaktadır. Bu cihaz yatay yönde hareket etmeyecek şekilde sabitlenir ve bu cihaz yardımı ile kiriş orta noktasında meydana gelen düşey deplasman ölçülür.

Kiriş numunesi üzerindeki çatlakların daha iyi görünmesi amacıyla beyaza boyanmıştır ve 5'er santimetrelik karelaj ile işaretlenmiştir. Bu karelajın oluşturulmasının sebebi, kiriş eğilmesi esnasında meydana gelecek çatlak gelişimini hızlı bir şekilde incelemektir.

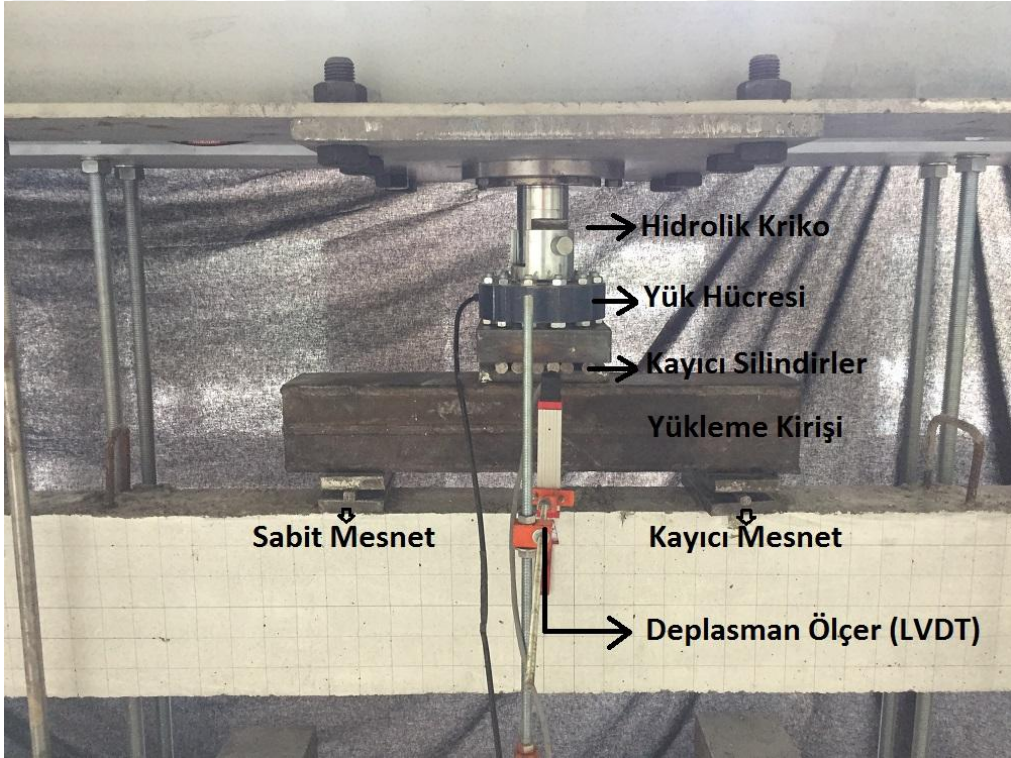
Yük hücresi ve LVDT'den alınan elektronik veriler bilgisayar ortamında, sayısal hale dönüştürülür. Elde edilen veriler kullanılarak yük- deplasman ilişkisi irdelenecektir.



Şekil 2.9. Yükleme Sistemi



Şekil 2.10. Deney Düzenegi



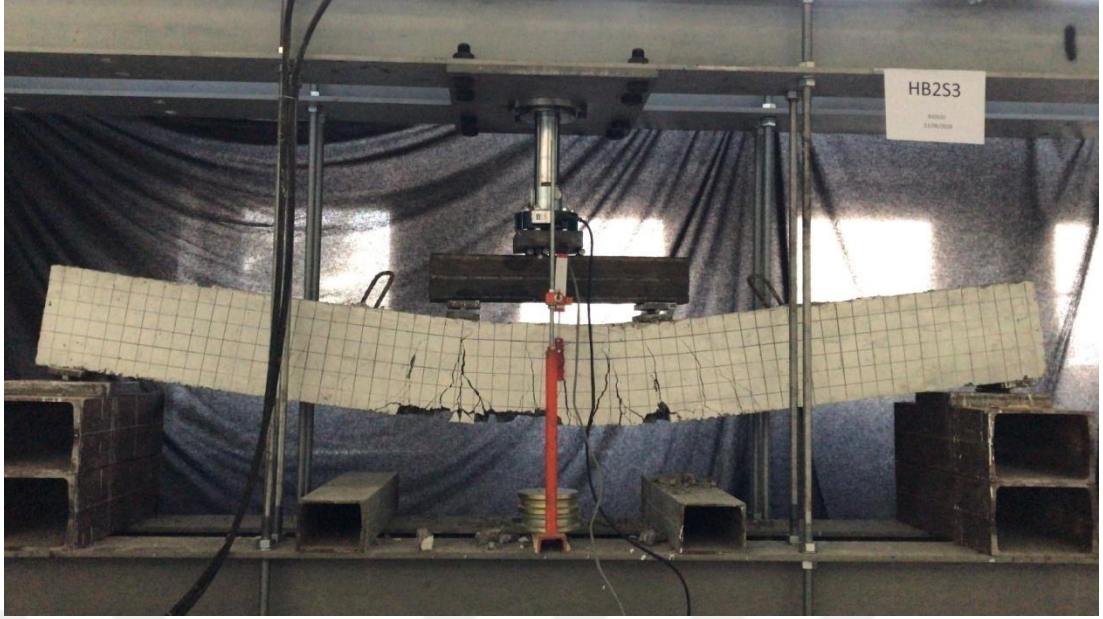
Şekil 2.11. Yükleme Düzenegi

2.5. Deneyler

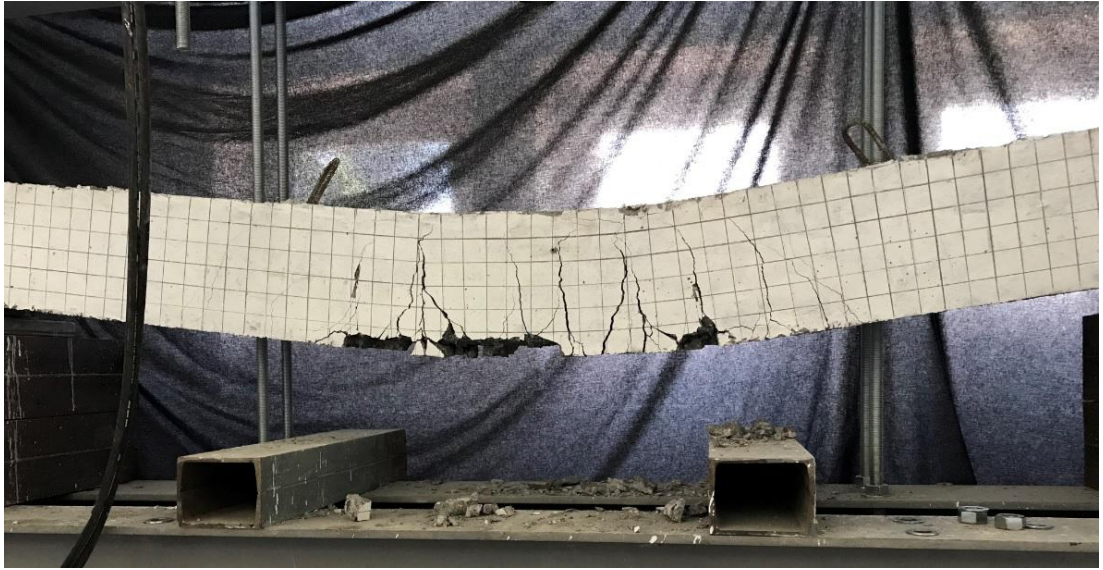
2.5.1. HB2S3 (B10S10) Numunesi Deneyi

Basınç bölgesinde 2 adet 10 mm çapında çelik donatı, çekme bölgesinde 2 adet 10 mm çapında BFRP donatı ve 3 adet 10 mm çapında çelik donatı bulunan, 5 mm çapındaki çelik etriyelerin kiriş boyunca 7.5 cm ara ile yerleştirildiği, yüksek dayanımlı betonun kullanıldığı kiriş elemanı; dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur.

Kiriş hidrolik kriko ile yüklenmeye başlanmış, yük ve deplasman verileri kaydedilmiş olup, deney esnasındaki değişimler gözlemlenmiştir. Yük değeri 41.73 kN, deplasman değeri 6,4 mm' yi gösterdiğinde, 3 adet eğilme çatlak meydana gelmiş olup, çatlaklardan basınç yüzüne en yakın olanı 8 cm mesafededir. Yük değeri 89.51 kN, deplasman değeri 57.3 mm' yi gösterdiğinde, basınç yüzüne en yakın eğilme çatlak 3 cm mesafededir. Yük değeri 107.44 kN, deplasman değeri 85.5 mm' yi gösterdiğinde, LVDT'nin kapasitesi bitmiştir. LVDT reset yapılırken donatı kopup, yük değeri 45.65 kN'a düşmüş olup, deplasman değeri 85.5 mm'yi göstermiştir. Donatı kopmadan önce, kabuk betonunda ezilmenin olduğu görülmüştür. Yük değeri 50.71 kN, deplasman değeri deplasman değeri 156.8 mm'yi gösterdiği anda deney güvenliği için deneye son verilmiştir.



Şekil 2.12. HB2S3 (B10S10) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu

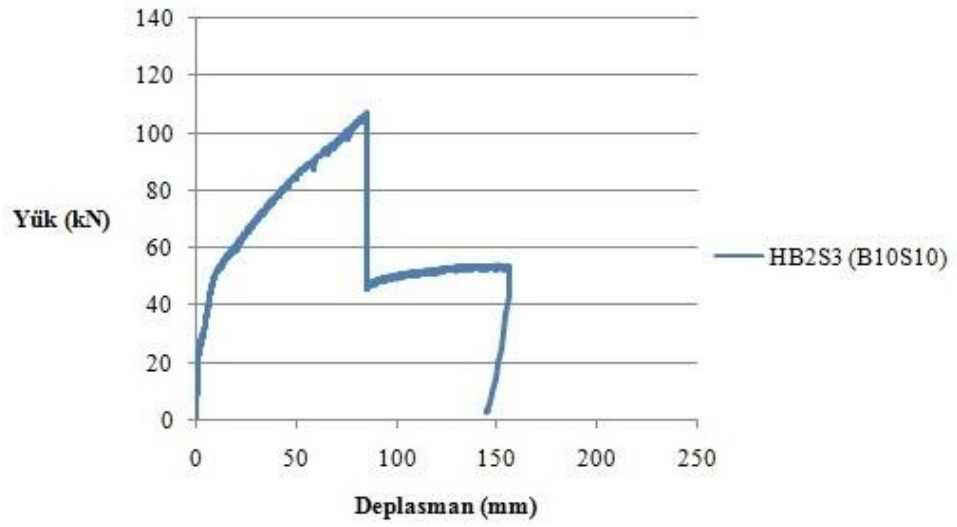


Şekil 2.13. HB2S3 (B10S10) Kirişi Çatlak Gelişimi

2.5.2. HB2S3 (B10S10) Numunesi Yük- Deplasman İlişkisi ve Grafiği

LVDT'nin kapasitesinin bitip, reset yapıldığı zamanlarda, bir önceki deplasman değeri üzerine yeni değerler eklenerek, deplasman değerleri güncellenmiştir. Deney yüklemeye başladıktan, deney sonuna kadar kaydedilen yük-deplasman değeri ile grafik oluşturulduğunda, aşağıdaki grafik ortaya çıkmıştır.

HB2S3 (B10S10) Yük- Deplasman



Şekil 2.14. HB3S2 (B10S10) Kirişi Yük- Deplasman Grafiği

2.5.3. HB3S2 (B10S10) Numunesi Deneyi

Basınç bölgesinde 2 adet 10 mm çapında çelik donatı, çekme bölgesinde 3 adet 10 mm çapında BFRP donatı ve 2 adet 10 mm çapında çelik donatı bulunan, 5 mm çapındaki çelik etriyelerin kiriş boyunca 7.5 cm ara ile yerleştirildiği, yüksek dayanımlı betonun kullanıldığı kiriş elemanı; dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur.

Kiriş hidrolik kriko ile yüklenmeye başlanmış, yük ve deplasman verileri kaydedilmiş olup, deney esnasındaki değişimler gözlemlenmiştir. Yük değeri 27 kN, deplasman değeri 6.3 mm' yi gösterdiğinde, 8 adet eğilme çatlak meydana gelmiş olup, çatlaklardan basınç yüzüne en yakın olanı 8 cm mesafededir. Yük değeri 61 kN, deplasman değeri 29.7 mm' yi gösterdiğinde, eğilme çatlaklarının genişliği artmış, basınç yüzüne en yakın çatlak 4.5 cm mesafededir. Yük değeri 79.30 kN, deplasman değeri 49.8 mm' yi gösterdiğinde, eğilme çatlakları en dış basınç yüzüne 3 cm yaklaşmış durumda, çatlak genişlikleri artmış olup, hala basınç yüzünde ezilme görülmemiştir. Yük değeri 90.00 kN, deplasman değeri 60 mm' yi gösterdiğinde, sağ yük noktasında yakın basınç yüzünde kabarmaların olduğu gözlenmiştir. Bu esnada, yük hücresi ve LVDT'den alınan elektronik verileri sayısal hale dönüştüren bilgisayar programı yanıt vermediğinden, deney verileri bilgisayar ortamında kaydedilememiştir. Deneyin başından beri, eli ile tutulan yük- deplasman verileri, 90 kN'dan sonra okunan yük- deplasman verileri ile birleştirilecektir. Yük değeri 98.34 kN, deplasman değeri 65.1 mm' yi gösterdiğinde, sağ yük noktasında yakın basınç yüzünde kabarmaların arttığı gözlenmiştir. Yük değeri 108.07 kN, deplasman değeri 78.1 mm' yi gösterdiğinde, sol yük noktasında yakın basınç yüzünde kabarmaların olduğu gözlenmiştir. Yük değeri 116.10 kN, deplasman değeri 90.1 mm' yi gösterdiğinde, sağ yük noktası hizasında, çekme donatılarına paralel, çatlak genişliği artmaya başlamıştır. Yük değeri 116.63 kN, deplasman değeri 112.5 mm' yi gösterdiğinde, sağ yük noktası hizasında, çekme bölgesinde pas payında sıyrılma olduğu, beton örtüsünün kirişten ayrıldığı görülmüştür.

Yüklemeye devam edildiğinde, yük değeri maksimum 117.26 kN'a kadar çıkmış olup; yük kademeli olarak 115.16 kN'a kadar düşmüştür. Yük değeri 115.16 kN, deplasman değeri 121.3 mm' yi gösterdiğinde, donatı kopmasıyla, yük değeri 20.24 kN'a düşmüş, deplasman değeri 125.9 mm olmuştur. Çekme bölgesindeki beton örtüsünün yaklaşık 1.5 metrelik kısmı kirişten ayrılmıştır. Deney güvenliği için deneye son verileceği sırada, donatı kopması gerçekleşmiştir. Yük değeri 37.01 kN'a düşmüş olup, deplasman değeri 153.1 mm olmuştur. Yük boşaltılarak deneye son verilmiştir.



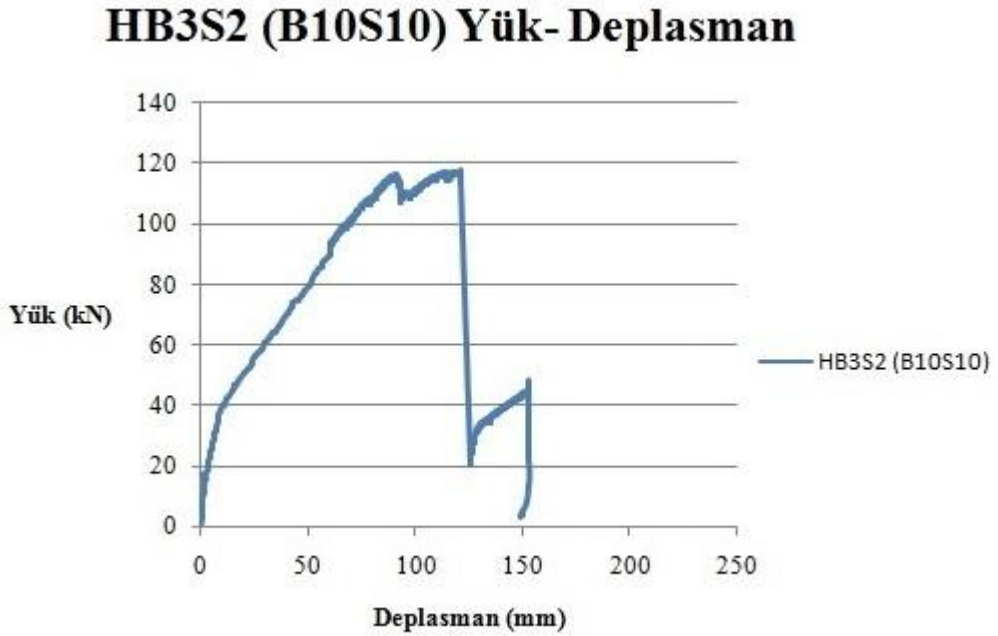
Şekil 2.15. HB3S2 (B10S10) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu



Şekil 2.16. HB3S2 (B10S10) Kirişi Çatlak Gelişimi

2.5.4. HB3S2 (B10S10) Numunesi Yük- Deplasman İlişkisi ve Grafiği

Yükleme başladıktan 90 kN'a kadar olan veriler bilgisayar ortamında kaydedilememiştir. 90 kN'a kadar olan yük-deplasman verileri eli ile kaydedilmiş olup, sonrasındaki bilgisayar ortamından alınan veriler ile birleştirilmiştir. LVDT'nin kapasitesinin bitip, reset yapıldığı zamanlarda, bir önceki deplasman değeri üzerine yeni değerler eklenerek, deplasman değerleri güncellenmiştir. Deney yüklemeye başladıktan, deney sonuna kadar kaydedilen yük-deplasman değeri ile grafik oluşturulduğunda, aşağıdaki grafik ortaya çıkmıştır.



Şekil 2.17. HB3S2 (B10S10) Kirişi Yük- Deplasman Grafiği

2.5.5. HB3S2 (B10S12) Numunesi Deneyi

Basınç bölgesinde 2 adet 10 mm çapında çelik donatı, çekme bölgesinde 3 adet 10 mm çapında BFRP donatı ve 2 adet 12 mm çapında çelik donatı bulunan, 5 mm çapındaki çelik etriyelerin kiriş boyunca 7.5 cm ara ile yerleştirildiği, yüksek

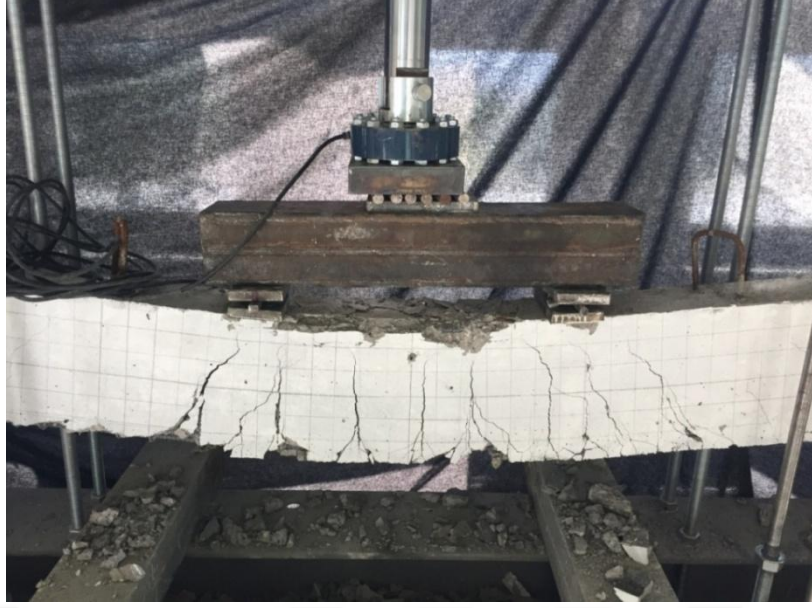
dayanımlı betonun kullanıldığı kiriş elemanı; dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur.

Kiriş hidrolik kriko ile yüklemeye başlanmış, yük ve deplasman verileri kaydedilmiş olup, deney esnasındaki değişimler gözlenmiştir. Yük değeri 45.41 kN, deplasman değeri 9.6 mm' yi gösterdiğinde, 10 adet ana eğilme çatladığı görülmüş olup, çatlaklar basınç yüzüne 12 cm mesafededir. Yük değeri 68.13 kN, deplasman değeri 29 mm' yi gösterdiğinde, basınç yüzünde kabarmaların olduğu görülmüştür. Yük değeri 84.65 kN, deplasman değeri 45.4 mm' yi gösterdiğinde, basınç yüzünde kabarmaların belirginleştiği görülmüştür. Yük değeri 104.39 kN, deplasman değeri 66 mm' yi gösterdiğinde, basınç yüzünde beton örtüsünde kırılmanın olduğu görülmüştür.

Yük değeri 127.79 kN, deplasman değeri 114.6 mm' yi gösterdiğinde, donatı kopmasıyla yük değeri 94.22 kN'a düşmüş, deplasman değeri 117.7 mm olmuştur. Yük değeri 98.37 kN, deplasman değeri 121.1 mm' yi gösterdiğinde, ikinci başka donatı kopmasıyla yük değeri 34.28 kN'a düşmüş, deplasman değeri 124.6 mm olmuştur. Daha sonra yük boşaltılarak deneye son verilmiştir.



Şekil 2.18. HB3S2 (B10S12) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu

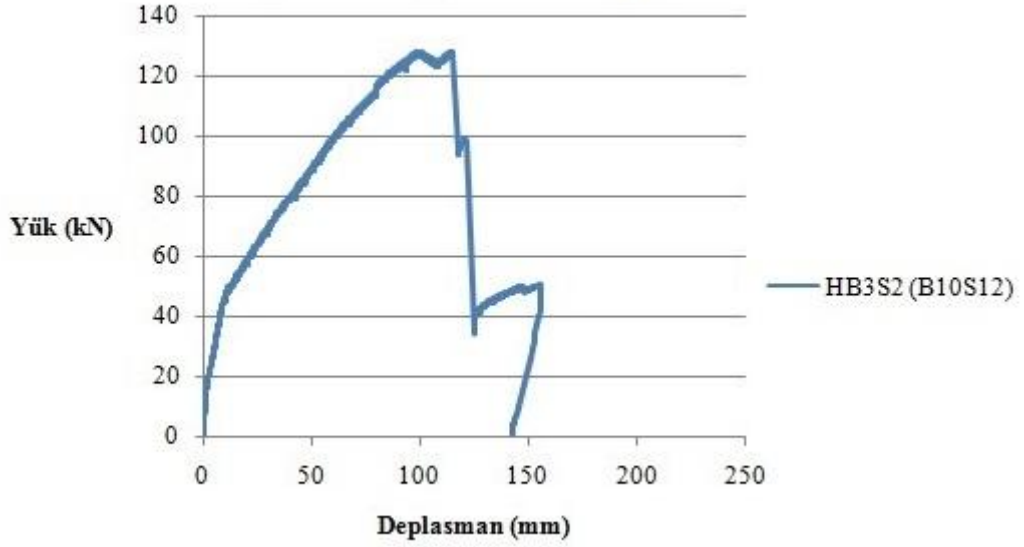


Şekil 2.19. HB3S2 (B10S12) Çatlak Gelişimi

2.5.6. HB3S2 (B10S12) Numunesi Yük- Deplasman İlişkisi ve Grafiği

LVDT'nin kapasitesinin bitip, reset yapıldığı zamanlarda, bir önceki deplasman değeri üzerine yeni değerler eklenerek, deplasman değerleri güncellenmiştir. Deney yüklemeye başladıktan, deney sonuna kadar kaydedilen yük-deplasman değeri ile grafik oluşturulduğunda, aşağıdaki grafik ortaya çıkmıştır.

HB3S2 (B10S12) Yük- Deplasman



Ŗekil 2.20. HB3S2 (B10S12) KiriŖi Yük- Deplasman Grafiği

2.5.7. NB3S2 (B10S10) Numunesi Deneyi

Basınç bölgesinde 2 adet 10 mm çapında elik donatı, çekme bölgesinde 3 adet 10 mm çapında BFRP donatı ve 2 adet 10 mm çapında elik donatı bulunan, 5 mm çapındaki elik etriyelerin kiriŖ boyunca 7.5 cm ara ile yerleŖtirildiđi, normal dayanımlı betonun kullanıldığı kiriŖ elemanı; dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuŖtur.

KiriŖ hidrolik kriko ile yüklenmeye baŖlanmıŖ, yk ve deplasman verileri kaydedilmiŖ olup, deney esnasındaki deđiŖimler gzlemlenmiŖtir. Yük değeri 30 kN, deplasman değeri 4.3 mm'yi gösterdiğinde, 5 adet eğilme çatlağı meydana gelmiŖ olup, çatlaklardan basınç yüzüne en yakın olanı 13 cm mesafededir. Yük değeri 61 kN, deplasman değer 19.8 mm' yi gösterdiğinde, 11 adet eğilme çatlağı meydana gelmiŖ olup, çatlaklardan basınç yüzüne en yakın olanı 5 cm mesafededir. Yük değer 114 kN, deplasman değer 78 mm' yi gösterdiğinde, sağ mesnet bölgesinden itibaren kiriŖ ortasına doğru, kabuk betonunda kabarma belirginleŖmiŖtir. Yüklemeye

devam edildiğinde, yük değeri maksimum 120.96 kN'a kadar çıkmış olup; yük kademeli olarak 114.93 kN'a kadar düşmüştür. Yük değeri 114.93 kN, deplasman değeri 116.9 mm'yi gösterdiğinde donatı kopması gerçekleşmiş, yük değeri 90.72 kN'a düşmüş olup, deplasman değeri 118.4 mm olmuştur. Çok geçmeden yük değeri 88.15 kN, deplasman değeri 118.6 mm'yi gösterdiğinde ikinci donatı kopması gerçekleşmiş, yük değeri 62.85 kN'a düşmüş olup, deplasman değeri 120 mm olmuştur. Yük değeri 67.65 kN, deplasman değeri 125.8 mm'yi gösterdiğinde üçüncü donatı kopması gerçekleşmiş olup, yük değeri 37.41 kN'a düşmüş, deplasman değeri 128.5 mm olmuştur. Daha sonra yüklemeye devam edildiğinde, kiriş çekme bölgesinde sadece çelik donatı kaldığından, sabit yük korunarak artan sehim değerlerinin olduğu görülmüştür. Yük değeri 40.85 kN, deplasman değeri 161.1 mm'yi gösterdiğinde deneye son verilmiştir.

Ani düşen yük değerinin, donatı kopmasından mı yoksa aynı donatıdaki liflerin kademeli kopmasından mı kaynaklandığının tespiti için, kiriş kırıldıktan sonra çekme bölgesindeki donatılar incelenmiştir. Yapılan incelemede 3 adet BFRP donatının üçünün de koptuğu görülmüştür. Ani düşen yük değerinin donatı kopmasından meydana geldiği anlaşılmıştır.



Şekil 2.21. NB352 (B10S10) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu

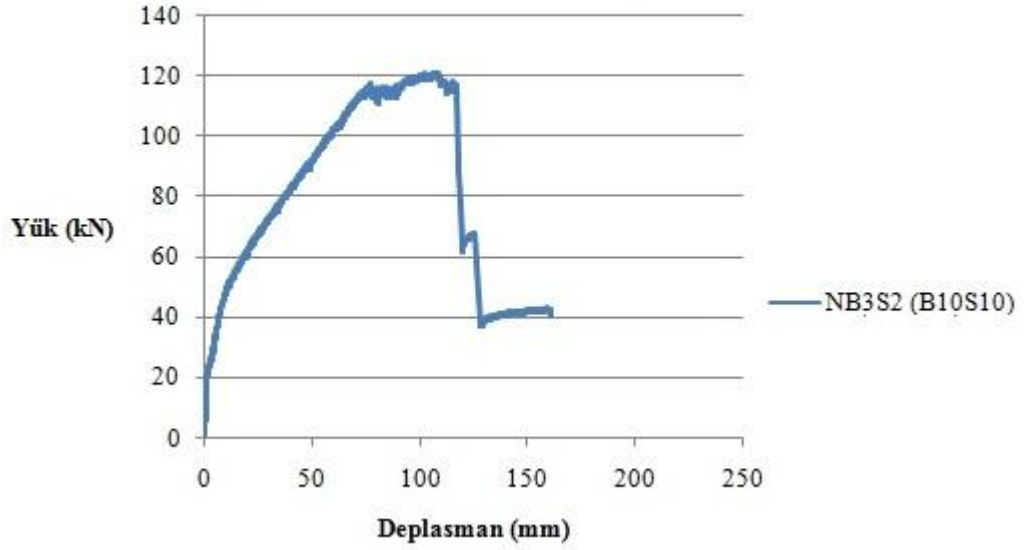


Şekil 2.22. NB3S2 (B10S10) Çatlak Gelişimi

2.5.8. NB3S2 (B10S10) Numunesi Yük- Deplasman İlişkisi ve Grafiği

LVDT'nin kapasitesinin bitip, reset yapıldığı zamanlarda, bir önceki deplasman değeri üzerine yeni değerler eklenerek, deplasman değerleri güncellenmiştir. Deney yüklemeye başladıktan, deney sonuna kadar kaydedilen yük-deplasman değeri ile grafik oluşturulduğunda, aşağıdaki grafik elde edilmiştir. Deneye son verildikten sonra yük boşaltılmadan veri kaydetme işlemi sonlandırıldığından, yükün boşaltılma verileri grafite görülmemektedir.

NB3S2 (B10S10) Yük- Deplasman



Şekil 2.23. NB3S2 (B10S10) Kirişi Yük- Deplasman Grafiği

2.5.9. NB2S3 (B10S12) Numunesi Deneyi

Basınç bölgesinde 2 adet 10 mm çapında çelik donatı, çekme bölgesinde 2 adet 10 mm çapında BFRP donatı ve 3 adet 12 mm çapında çelik donatı bulunan, 5 mm çapındaki çelik etriyelerin kiriş boyunca 7.5 cm ara ile yerleştirildiği, normal dayanımlı betonun kullanıldığı kiriş elemanı; dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur.

Kiriş hidrolik kriko ile yüklenmeye başlanmış, yük ve deplasman verileri kaydedilmiş olup, deney esnasındaki değişimler gözlemlenmiştir. Yük değeri 30.48 kN, deplasman değeri 2.3 mm'yi gösterdiğinde, yükleme noktaları arasında 2 adet eğilme çatlakı meydana gelmiştir. Yük değeri 62.30 kN, deplasman değeri 9.2 mm'yi gösterdiğinde, 10 adet eğilme çatlakı meydana gelmiş olup, en yakını basınç yüzüne 8 cm mesafededir. Yük değeri 80.60 kN, deplasman değeri 25.7 mm'yi gösterdiğinde, sağ ve sol yükleme noktaları civarında kabuk betonunda kabarma görülmüş olup, sağ yük noktasındaki kabarmanın daha belirgin olduğu görülmüştür.

Yük değeri 100.95 kN, deplasman değeri 51.7 mm'yi gösterdiğinde kabuk betonunda ezilme belirginleşmiştir. Yük değeri 105.19 kN, deplasman değeri 59.3 mm'yi gösterdiğinde, iki yük arasında kabuk betonunda basınç donatılarına paralel çatlak belirginleşmiştir. Yüklemeye devam edildiğinde, yük değeri maksimum 108.34 kN'a kadar çıkmış olup; yük kademeli olarak 104.97 kN'a kadar düşmüştür. Yük değeri 103.97 kN, deplasman değeri 79.7 mm'yi gösterdiğinde donatı kopması gerçekleşmiş olup, yük değeri 85.57 kN'a düşmüş, deplasman değeri 81.8 mm olmuştur. Yük değeri 85.15 kN, deplasman değeri 83.6 mm'yi gösterdiğinde ikinci donatı kopması gerçekleşmiş olup, yük değeri 57.44 kN'a düşmüş, deplasman değeri 86.1 mm olmuştur.

Daha sonra yüklemeye devam edildiğinde, kiriş çekme bölgesinde sadece çelik donatı kaldığından, yük değeri neredeyse sabit devam etmekte olup, deplasman değerinin arttığı görülmüştür. Yük değeri 66.04 kN, deplasman değeri 218.7 mm'yi gösterdiğinde deneye son verilmiş olup yük boşaltılmıştır.

Kiriş kırıldıktan sonra çekme bölgesindeki donatılar incelenmiştir. Yapılan incelemede 2 adet BFRP donatının ikisinin de koptuğu görülmüştür.



Şekil 2.24. NB2S3 (B10S12) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu

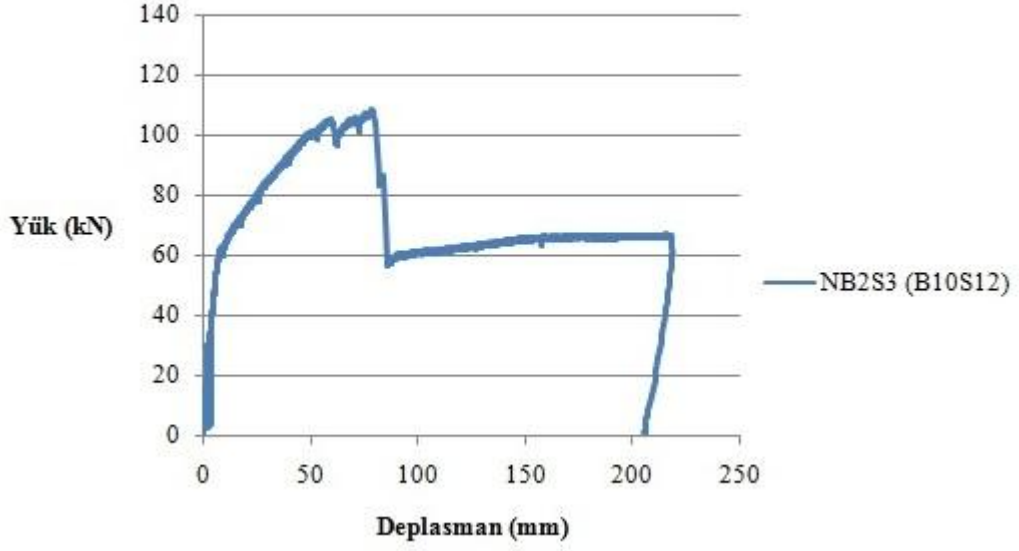


Şekil 2.25. NB2S3 (B10S12) Çatlak Gelişimi

2.5.10. NB2S3 (B10S12) Numunesi Yük- Deplasman İlişkisi ve Grafiği

LVDT'nin kapasitesinin bitip, reset yapıldığı zamanlarda, bir önceki deplasman değeri üzerine yeni değerler eklenerek, deplasman değerleri güncellenmiştir. Deney yüklemeye başladıktan, deney sonuna kadar kaydedilen yük-deplasman değeri ile grafik oluşturulduğunda, aşağıdaki grafik ortaya çıkmıştır.

NB2S3 (B10S12) Yük- Deplasman



Şekil 2.26. NB2S3 (B10S12) Kirişi Yük- Deplasman Grafiği

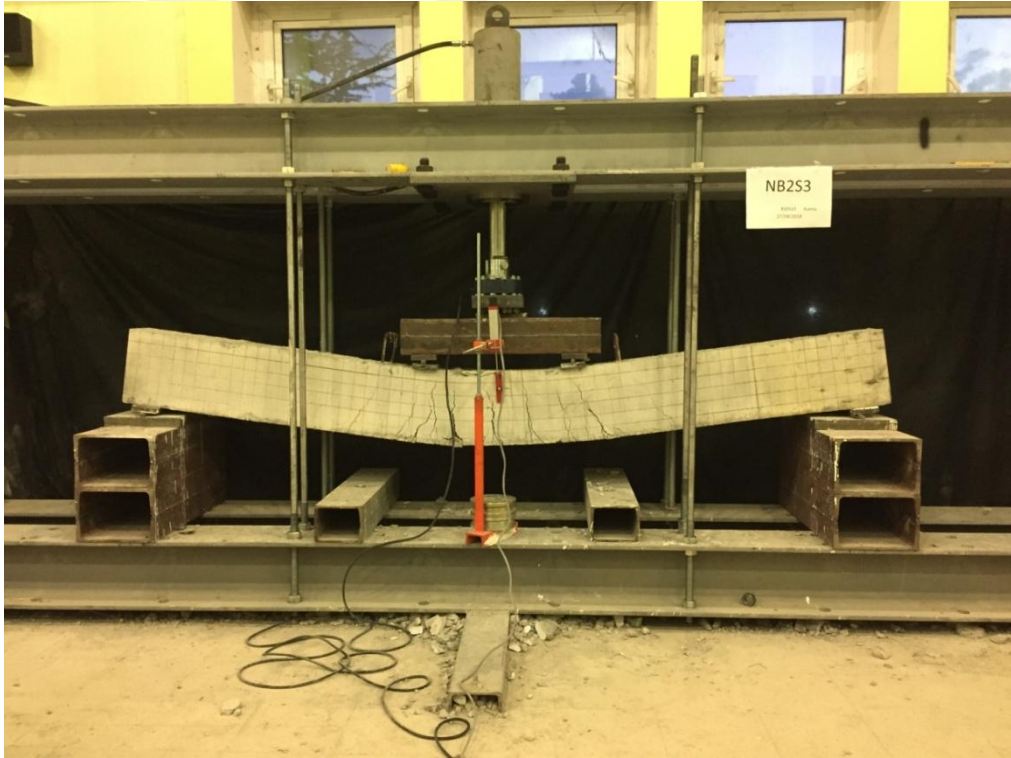
2.5.11. NB2S3 (B10S10) Numunesi Deneyi

Basınç bölgesinde 2 adet 10 mm çapında çelik donatı, çekme bölgesinde 2 adet 10 mm çapında BFRP donatı ve 3 adet 10 mm çapında çelik donatı bulunan, 5 mm çapındaki çelik etriyelerin kiriş boyunca 7.5 cm ara ile yerleştirildiği, normal dayanımlı betonun kullanıldığı kiriş elemanı; dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur.

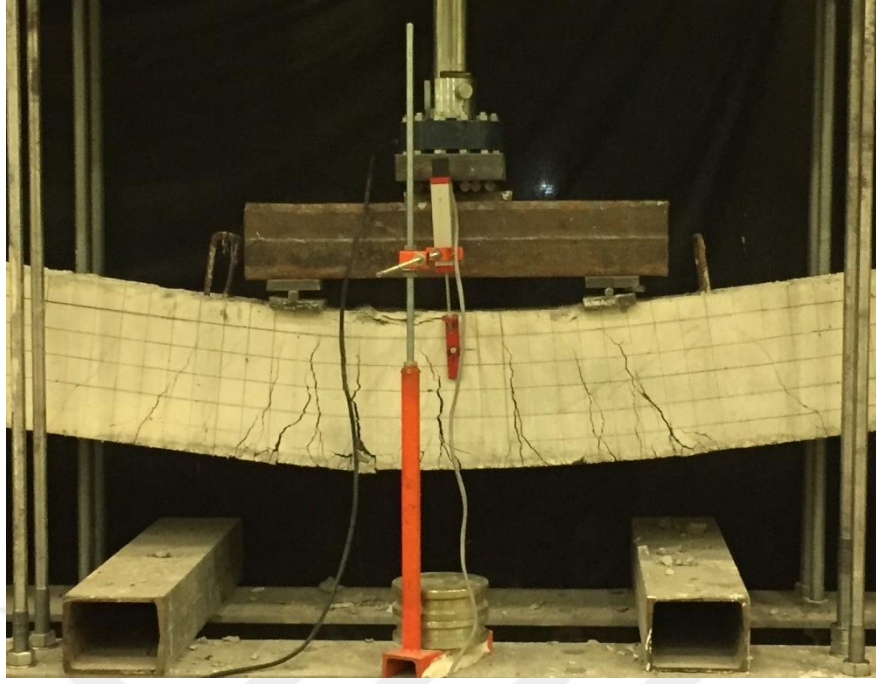
Kiriş hidrolik krika ile yüklenmeye başlanmış, yük ve deplasman verileri kaydedilmiş olup, deney esnasındaki değişimler gözlemlenmiştir. Yük değeri 50.44 kN, deplasman değeri 9.1 mm'yi gösterdiğinde, 6 adet ana eğilme çatlak meydana gelmiş olup, en yakını basınç yüzüne 12 cm mesafededir. Yük değeri 71.13 kN, deplasman değeri 33 mm'yi gösterdiğinde, en yakın eğilme çatlak basınç yüzüne 7 cm mesafededir. Yük değeri 84.33 kN, deplasman değeri 53 mm'yi gösterdiğinde, 8 adet ana eğilme çatlak, 2 adet kesme çatlak görülmüştür. Yük değeri 98.34 kN, deplasman değeri 80 mm'yi gösterdiğinde kabuk betonunda ezilme olduğu

görülmüştür. Yüklemeye devam edildiğinde, yük değeri maksimum 99.66 kN'a kadar çıkmış, bu esnada deplasman değeri 84.8 mm olmuştur. Daha sonra yük kademeli olarak 93.41 kN'a kadar düşmüştür. Yük değeri 93,41 kN, deplasman değeri 86.8 mm'yi gösterdiğinde donatı kopması meydana gelmiş olup, yük değeri 72.55 kN'a düşmüş, deplasman değeri 88,5 mm olmuştur. Yüklemeye devam edilip, yük değeri 77.11 kN, deplasman değeri 93.7 mm'yi gösterdiğinde ikinci donatı kopması gerçekleşmiş olup, yük değeri 44.88 kN, deplasman değeri 96.6 mm olmuştur. Kalan çelik donatılar ile birlikte, kiriş yaklaşık 51 kN sabit yük değerinde, artan sehim davranışı göstermiştir. Yük değeri 52.21 kN, deplasman değeri 149.6 mm olduğunda yük boşaltılmaya başlamış olup, deneye son verilmiştir.

Kiriş kırıldıktan sonra çekme bölgesindeki donatılar incelenmiştir. Yapılan incelemede 2 adet BFRP donatının ikisinin de koptuğu görülmüştür.



Şekil 2.27. NB2S3 (B10S10) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu

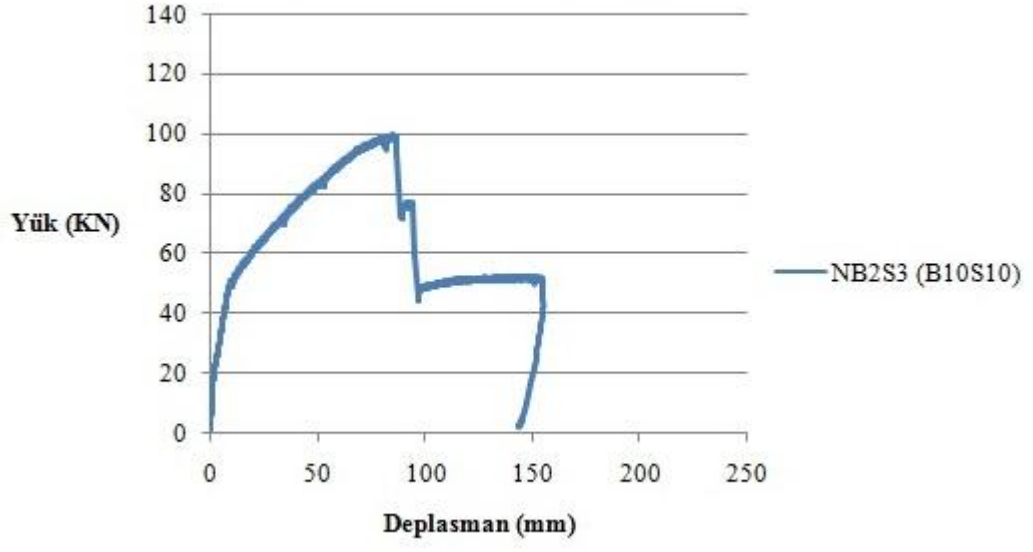


Şekil 2.28. NB2S3 (B10S10) Çatlak Gelişimi

2.5.12. NB2S3 (B10S10) Numunesi Yük- Deplasman İlişkisi ve Grafiği

LVDT'nin kapasitesinin bitip, reset yapıldığı zamanlarda, bir önceki deplasman değeri üzerine yeni değerler eklenerek, deplasman değerleri güncellenmiştir. Deney yüklemeye başladıktan, deney sonuna kadar kaydedilen yük-deplasman değeri ile grafik oluşturulduğunda, aşağıdaki grafik ortaya çıkmıştır.

NB2S3 (B10S10) Yük- Deplasman



Şekil 2.29. NB2S3 (B10S10) Kirişı Yük- Deplasman Grafiği

3. TEORİK HESAPLAMALAR

FRP donatılı hibrit kirişlerin eğilme davranışını, dengeli donatı oranı ve efektif donatı oranı belirlemektedir. Hibrit kirişlerin dengeli donatı oranı denklem 3.1. de efektif donatı oranı denklem 3.2. de verilmiştir.

Dengeli Donatı Oranı:

$$\rho_{f.b} = 0.85 \beta_1 \frac{f_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (3.1)$$

Efektif Donatı Oranı:

$$\rho_{eff} = \rho_s * \frac{f_y}{f_{fu}} + \rho_f \quad (3.2)$$

Efektif donatı oranı dengeli donatı oranından büyük olduğunda kiriş denge üstü donatılı, efektif donatı oranı dengeli donatı oranından küçük olduğunda kiriş denge altı donatılıdır. Geleneksel betonarme kirişlerden farklı olarak, FRP ve çelik donatılı hibrit kirişlerin denge üstü donatılı olması istenir.

Çizelge 2.5. Kirişlerin donatı alanları, dengeli donatı oranları, efektif donatı oranları

Eleman	n_s	n_f	\varnothing_s	\varnothing_f	A_s	A_f	ρ_s	ρ_f	ρ_{eff}	$\rho_{f.b}$	
HB2S3 (B10S10)	3	2	10	10	235.62	157.08	0.00561	0.00374	0.005882	0.004831	Denge Üstü
HB3S2 (B10S10)	2	3	10	10	157.08	235.62	0.00374	0.00561	0.007038	0.004831	Denge Üstü
HB3S2 (B10S12)	2	3	12	10	226.19	235.62	0.005386	0.00561	0.007666	0.004831	Denge Üstü
NB3S2 (B10S10)	2	3	10	10	157.08	235.62	0.00374	0.00561	0.007038	0.003106	Denge Üstü
NB2S3 (B10S12)	3	2	12	10	339.29	157.08	0.008078	0.00374	0.006824	0.003106	Denge Üstü
NB2S3 (B10S10)	3	2	10	10	235.62	157.08	0.00561	0.00374	0.005882	0.003106	Denge Üstü

Yukarıdaki tabloda görüldüğü gibi tüm kirişler denge üstü donatılıdır. Tüm kirişlerde önce basınç bölgesindeki beton ezilmiştir. Ardından FRP donatılarda kopma gerçekleşmiştir.

Kirişlerin akma momenti ve taşıma gücü momentini belirlemek amacıyla aşağıdaki denklemler kullanılmıştır.

$$F_c = F_s + F_f \quad (3.3)$$

$$F_c = 0.85 f_c b a \quad (3.4)$$

$$F_s = A_s f_y \quad (3.5)$$

$$F_f = A_f f_f \quad (3.6)$$

$$M_y = (F_s \cdot f_f + F_f \cdot f_f) \cdot (d - a/2) \quad (3.7)$$

$$M_u = 0.85 \cdot F_c \cdot \beta_1 \cdot b \cdot c^2 + (A_f \cdot E_f \cdot \epsilon_{cu} - A_s \cdot f_y) \cdot c - (A_f \cdot E_f \cdot \epsilon_{cu}) \cdot d = 0 \quad (3.8)$$

Süneklik katsayısı; akma momenti, taşıma gücü momentini, akma anındaki eğrilik ve en büyük momentteki eğrilik değerleri dikkate alınarak hesaplanan bir büyüklüktür. Denklem 3.9 de süneklik katsayısının formülü verilmiştir.

$$\text{Deformasyon Faktörü } DF = \frac{M_u \phi_u}{M_y \phi_y} \quad (3.9)$$

Çizelge 2.6. Kirişlerin teorik ve deneysel taşıma gücü momentleri, akma momentleri

Eleman	Af/As	My (kN.m) teorik	Mu (kN.m) teorik	My (kN.m) deneysel	Mu (kN.m) deneysel
HB2S3 (B10S10)	0.67	33.2	66	51.72	59.09
HB3S2 (B10S10)	1.5	27.5	71	90	64.49
HB3S2 (B10S12)	1.04	35.2	74.7	113.47	70.28
NB3S2 (B10S10)	1.5	26.8	55	49.82	66.53
NB2S3 (B10S12)	0.46	42.8	58.6	60.45	59.59
NB2S3 (B10S10)	0.67	32.2	52.6	50.28	54.83

Yüksek dayanımlı hibrit kirişler ve normal dayanımlı hibrit kirişler kendi içlerinde gruplandıklarında genel olarak (HB3S2 (B10S12) dışında) Af/As oranı arttıkça süneklik katsayısında artış görülmektedir.



Çizelge 2.7. Kirişlerin deformasyon faktörleri (DF)

Eleman	Taşıma Gücü Momenti				Akma Momenti				DF	Af/As
	Mu (kN m)	ϵ_{cu} (mm/mm)	c_u (mm)	ϕ_u 10_5 (1/mm)	My (kN m)	ϵ_{cu} (mm/mm)	C_y (mm)	ϕ_y 10_5 (1/mm)		
HB2S3 (B10S10)	66	0.003	50.2	5.96	33.2	0.000205	25	0.824	14.4	0.67
HB3S2 (B10S10)	71	0.003	54.5	5.5	27.5	0.000164	20	0.808	17.6	1.5
HB3S2 (B10S12)	74.7	0.003	57.6	5.21	35.2	0.000215	26	0.827	13.4	1.04
NB3S2 (B10S10)	55	0.003	68.5	4.38	26.8	0.000266	31.5	0.845	10.6	1.5
NB2S3 (B10S12)	58.6	0.003	73.5	4.08	42.8	0.000477	51.8	0.92	6.1	0.46
NB2S3 (B10S10)	52.6	0.003	65	4.62	32.2	0.000332	38.2	0.868	8.7	0.67

Deplasman hesapları Benmokrane, Toutanji and Saafi yaklaşımlarıyla yapılmıştır. Çatlama momenti denklem (3.10) ile betonun çekme dayanımı denklem (3.11) ile verilmiştir. Deplasman hesaplarında kullanılacak etkili atalet formülleri denklem (3.12) ve (3.13) ile verilmiştir. ACI 440.1R15 şartnamesinde önerilen etkili atalet momenti denklem (3.14) de verilmiştir.

$$M_{cr} = \frac{2f_{ctd} I_g}{h} \quad (3.10)$$

$$f_r = 0.62\sqrt{f_c} \quad (3.11)$$

Benmokrane et al

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \frac{I_g}{7} + 0.84 \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g \quad (3.12)$$

Toutanji and Saafi

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^m (I_g - I_{cr}) + I_{cr} \leq I_g \quad (3.13)$$

$$m = 3 \quad \text{if} \quad \frac{E_f}{E_s} \rho_f < 0.3$$

$$m = 6 - 10 \frac{E_f}{E_s} \rho_f \quad \text{eğer} \quad \frac{E_f}{E_s} \rho_f > 0.3$$

ACI 440.1R15

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g \quad (3.14)$$

$$\beta_d = \frac{1}{5} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right) \leq 1$$

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1 - k)^2$$

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + (n_f A_f + n_s A_s) d^2 (1 - k)^2$$

$$k = \sqrt{2(\rho_f n_f + \rho_s n_s) + (\rho_f n_f + \rho_s n_s)^2} - (\rho_f n_f + \rho_s n_s)$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c}$$

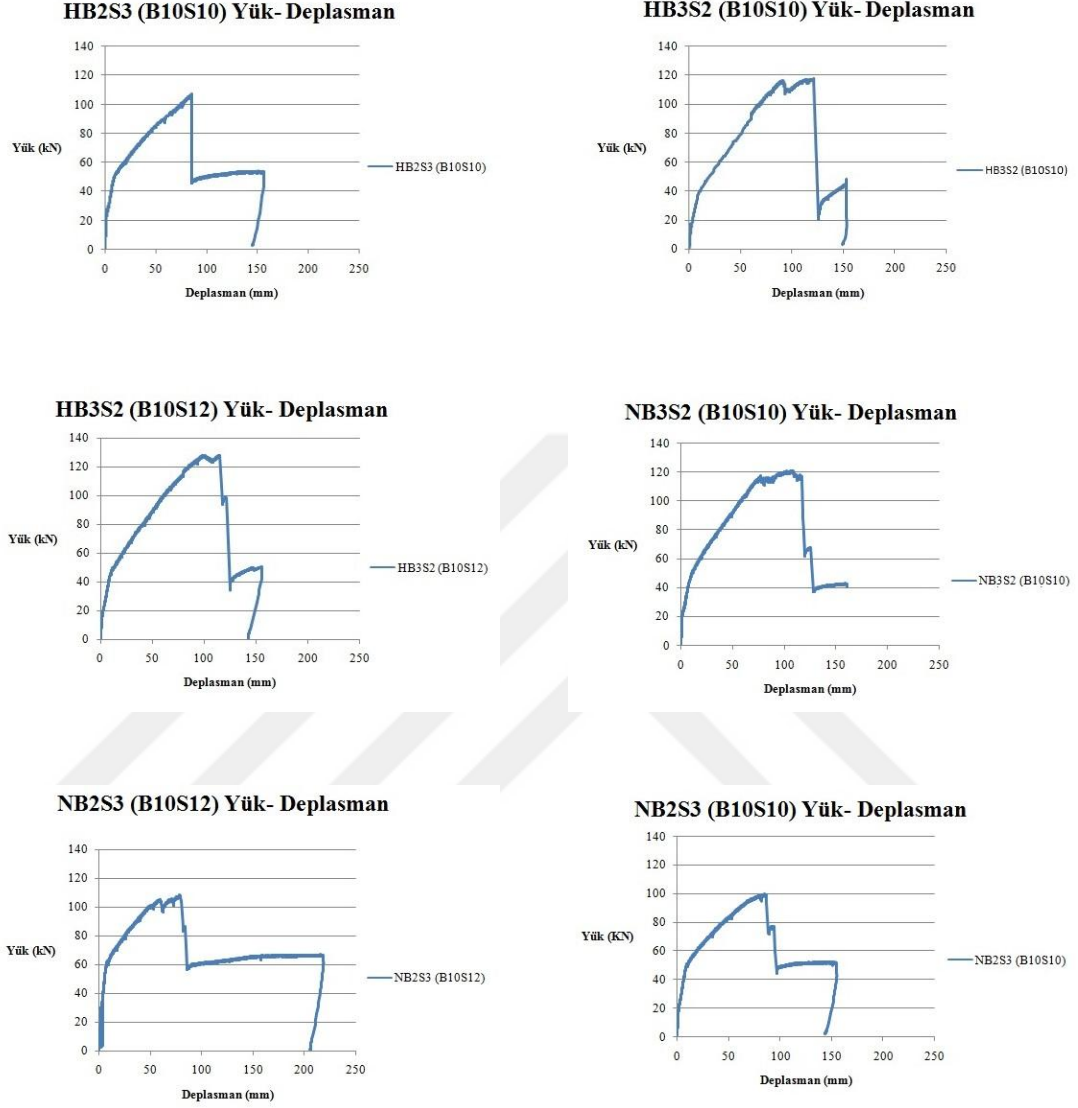
$$n_s = \frac{E_s}{E_c}$$

Aşağıdaki tabloda taşıma gücünün % 20'sine ve % 40'ına karşı gelen yük değerlerindeki deplasman değerleri deneysel ve teorik olarak (3 farklı yaklaşımla) hesaplanmıştır. Taşıma gücünün %20'sine karşılık gelen yük ilk çatlama yükü, %40'ına karşılık gelen yük ise servis yükü olarak kabul edilmiştir. Taşıma gücünün % 20 si alınan kısımdaki deplasman değerleri teorik hesaplarla bulunan deplasman değerlerine yakın olduğu görülmüştür. Taşıma gücünün %40'ı alınan kısmında; 3 elemanda, deneysel deplasmanlarla teorik deplasmanlar yakın değerler gösterirken, kalan 3 elemanda deneysel deplasmanların teorik deplasmanların en az 2 kat üzerinde olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 2.8. Kiriş deplasmanlarının Benmokrane ve diğerleri, Toutanji and Saafi, ACI 440.1R-15 yaklaşımları ve deneysel deplasmanlar ile karşılaştırılması

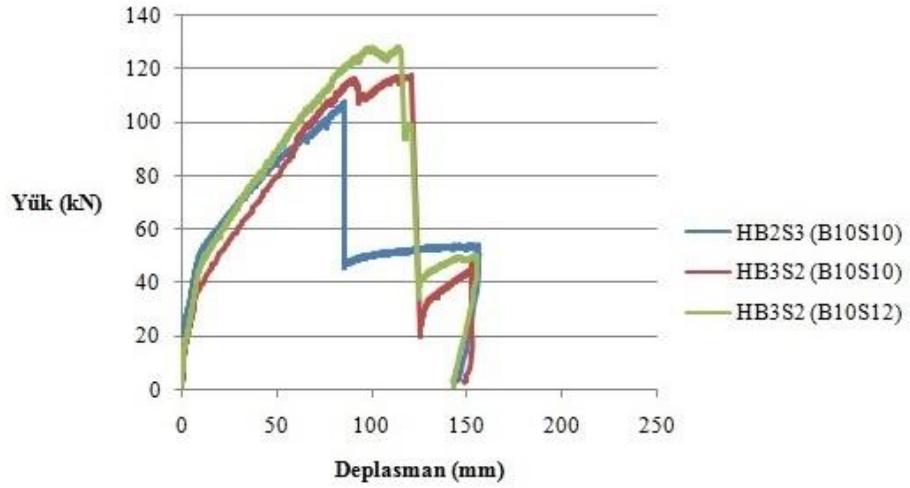
Eleman	Taşıma gücünün%20 si				Taşıma gücünün%40 i			
	Deney (mm)	Benmokrane et al (mm)	Toutanji and Saafi (mm)	ACI 440.1R15 (mm)	Deney (mm)	Benmokrane et al. (mm)	Toutanji and Saafi (mm)	ACI 440.1R15 (mm)
HB2S3 (B10S10)	1.25	3.53	0.94	3.09	6.80	5.87	4.03	4.95
HB3S2 (B10S10)	4.24	4.03	1.19	2.97	16	7.34	5.09	6.07
HB3S2 (B10S12)	4.18	3.60	1.29	2.75	13.60	6.29	4.60	5.22
NB3S2 (B10S10)	2.23	3.47	1.39	2.32	9.77	4.29	4.55	4.96
NB2S3 (B10S12)	1.26	2.58	1.32	2.05	4.17	3.09	3.44	3.65
NB2S3 (B10S10)	1.19	3.02	1.18	2.31	5.90	3.53	3.75	4.16

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ



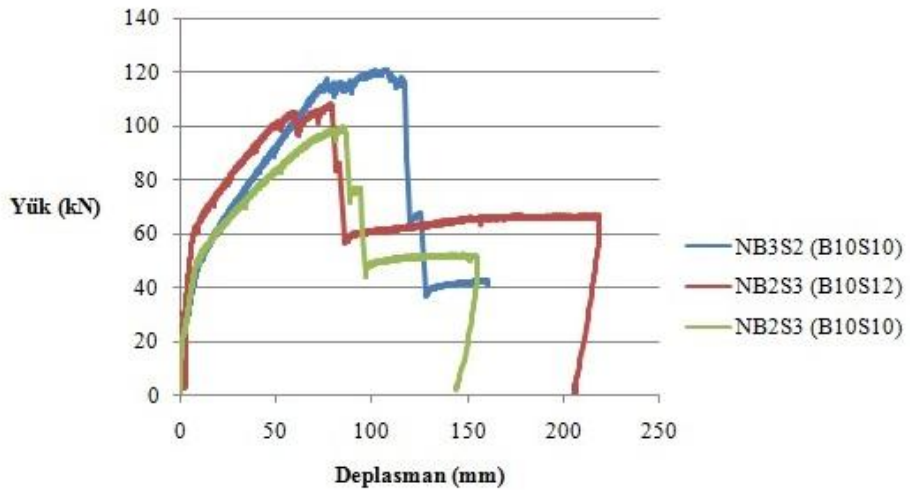
Şekil 2.30. Deneysel Elemanların Yük Deplasman Grafikleri

Deneysel elemanların yük- deplasman grafikleri ayrı ayrı incelendiğinde, bazalt donatıda kopmanın gerçekleşmesiyle yükte ani düşüş olduğu görülmüştür. Kirişler içindeki çelik donatılar yükün toparlanmasını sağlamakta ve yükün korunarak deplasman artışı sağlamaktadır.



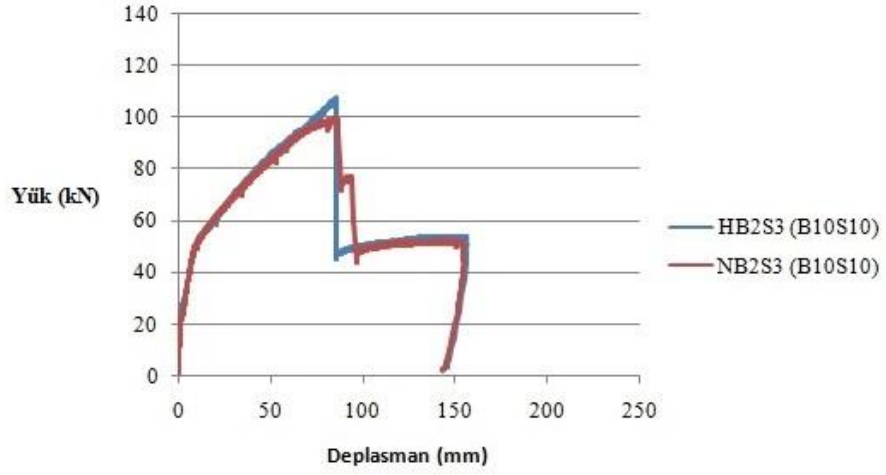
Şekil 2.31. Yüksek Dayanımlı Kirişlerin Yük- Deplasman Grafikleri

Yüksek dayanımlı kirişler kendi aralarında değerlendirildiğinde, aynı donatı çaplarına sahip elemanlarda bazalt donatı sayısı arttıkça yük taşıma kapasitesinin arttığı, bazalt donatı sayısı aynı olan elemanlarda çelik donatı çapı arttıkça da yük taşıma kapasitesinin arttığı tespit edilmiştir.

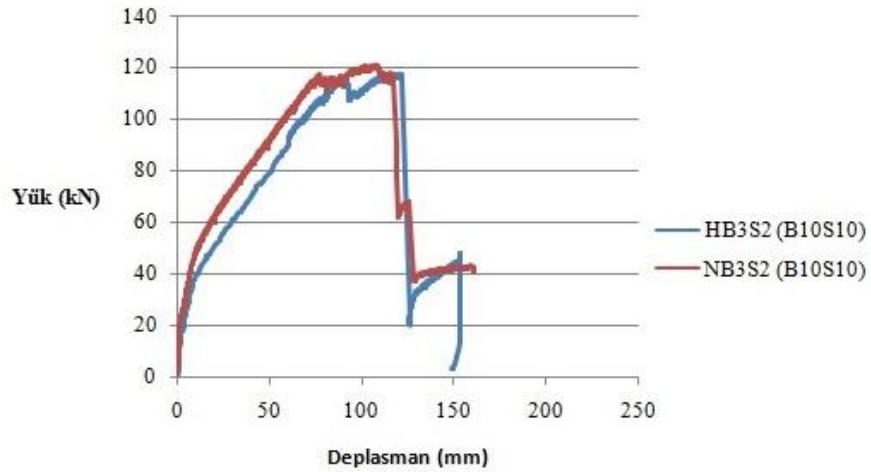


Şekil 2.32. Normal Dayanımlı Kirişlerin Yük- Deplasman Grafikleri

Normal dayanımlı elemanlar kendi içlerinde değerlendirildiğinde, bazalt donatı alanı diğerlerine göre fazla olan elemanda yük taşıma kapasitesinin diğerlerinin üzerinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, ilk donatı kopmasından sonra, ulaşılan en yüksek yük değeri çelik alanı fazla olan elemanda belirlenmiştir (NB2S3 (B10S12)).

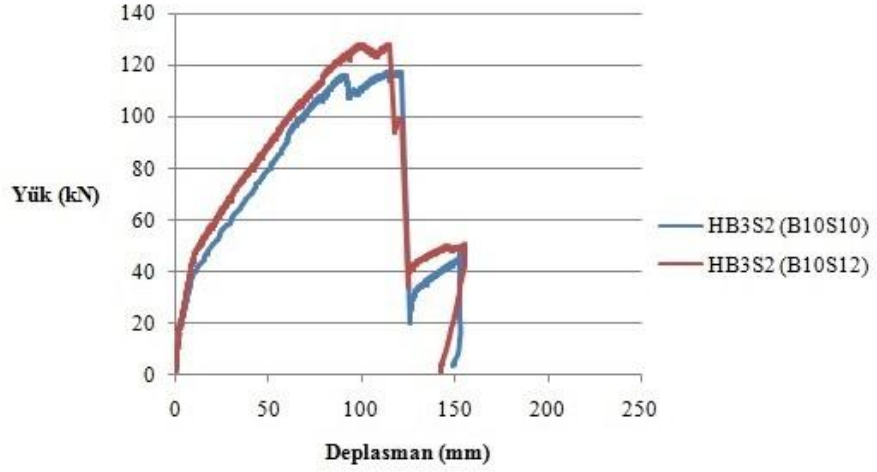


Şekil 2.33. HB2S3 (B10S10) ve NB2S3 (B10S10) Kirişlerinin Yük Deplasman Grafikleri

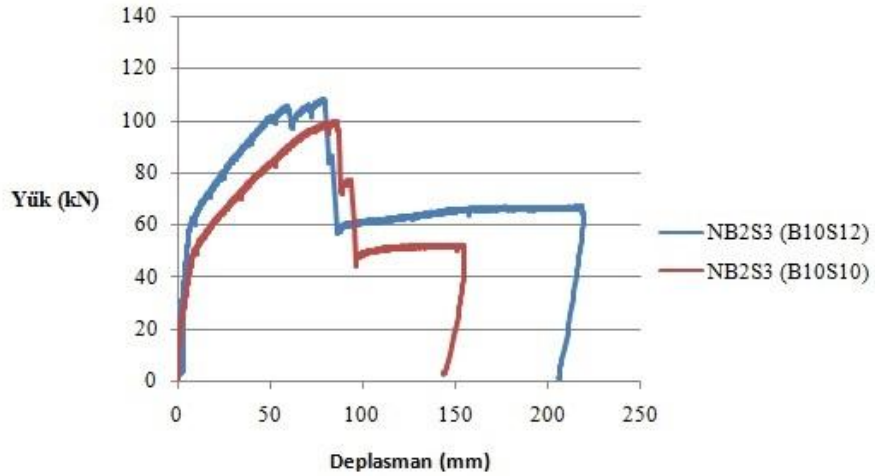


Şekil 2.34. HB3S2 (B10S10) ve NB3S2 (B10S10) Kirişlerinin Yük Deplasman Grafikleri

Aynı donatılara sahip yüksek dayanımlı ve normal dayanımlı kirişlerin yük deplasman grafikleri incelendiğinde, %8'lik bir dayanım farkı ile grafiklerinin benzer olduğu, beton dayanımının hibrit kirişlerin eğilme altında taşıma gücü üzerinde belirgin etkisi olmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 2.35. HB3S2 (B10S10) ve HB3S2 (B10S12) Kirişlerinin Yük Deplasman Grafikleri



Şekil 2.36. NB2S3 (B10S12) ve NB2S3 (B10S10) Kirişlerinin Yük Deplasman Grafikleri

Aynı bazalt donatı alanına sahip yüksek dayanımlı kirişlerde çelik donatıda %44'lük artış dayanımda % 9'luk artış sağlamaktadır. Buradan da beton basınç dayanımının hibrit kirişlerin eğilme dayanımı üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.



Çizelge 2.9. Kirişlerin en büyük yükleri, bu yüklere karşılık gelen deplasmanları, kopmadan sonraki yük ve deplasman değerleri

Numune	Ulaşılan Maksimum Yük (kN)	Ulaşılan Maksimum Yükteki Deplasman (mm)	1.Donatı Kopmasından Sonraki Yük (kN)	1.Donatı Kopmasından Sonraki Deplasman (mm)	2.Donatı Kopmasından Sonraki Yük (kN)	2.Donatı Kopmasından Sonraki Deplasman (mm)	3.Donatı Kopmasından Sonraki Yük (kN)	3.Donatı Kopmasından Sonraki Deplasman (mm)
HB2S3 (B10S10)	107.44	85.5	45.65	85.5	-	-	-	-
HB3S2 (B10S10)	117.26	39.80	20.24	44.5	37.01	153.1	-	-
HB3S2 (B10S12)	127.79	114.6	94.22	117.7	98.37	121.1	-	-
NB3S2 (B10S10)	120.96	107.4	90.72	118.4	62.85	120.0	37.41	128.5
NB2S3 (B10S10)	108.34	78.3	85.57	81.8	57.44	86.1	-	-
NB2S3 (B10S12)	99.66	84.8	72.55	88.5	44.88	96.6	-	-

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada normal ve yüksek dayanımlı BFRP (bazalt) ve çelik donatı kullanılan hibrit kirişlerin eğilme altında davranışları incelenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar şöyledir:

- Tüm deney elemanları denge üstü donatı oranına sahiptirler. Tüm kirişlerde önce basınç bölgesindeki beton ezilmiş, ardından bazalt donatının kopmasıyla taşıma gücüne ulaşılmıştır.
- Kopan bazalt donatıların ardından, yük değeri çelik donatılarla korunmakta, bazalt donatıda son kopma gerçekleştikten sonra yük-deplasman grafiği, çelik donatılı betonarme kirişlerin davranışı gibi, belirli bir yük değeri korunarak artan sehim altında devam etmiştir.
- Af/As oranları süneklik üzerinde etkili olmuş ve süneklik faktörünü etkilemiştir. Normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı kirişler kendi içlerinde değerlendirildiklerinde genel olarak Af/As oranı arttıkça, süneklik katsayısında doğrusal bir artış görülmektedir.
- Aynı FRP ve çelik donatı oranlarına sahip, normal dayanımlı kirişler ve yüksek dayanımlı kirişlerin taşıma güçleri karşılaştırıldığında, beton basınç dayanımının; bazalt- çelik donatılı hibrit kirişlerin eğilme davranışında kapasite üzerinde belirgin bir farklılık göstermediği tespit edilmiştir.
- Deplasman değerleri incelenirken, taşıma gücünün %20 ve %40' ına karşılık gelen deplasman değerleri ile Benmokrane et al, Toutanji ve Saafi, ACI 440.1R15 yaklaşımlarından bulunan deplasman değerleri kıyaslanmıştır. Taşıma gücünün %20' si alındığında elde edilen deneysel deplasman değerleri burada ele alınan teorik deplasman değerlerine yakın bulunmuştur. Taşıma gücünün %40' ı esas alındığında elde edilen deneysel deplasman değerlerinin 3 tanesi teorik deplasmanlara yakın iken, diğer 3 tanesi teorik deplasmanların en az 2 katı deplasman değerine ulaşmıştır.

- Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, deney elemanlarıyla sınırlıdır. Daha genel sonuçlara ulaşabilmek için, ilave deneysel çalışmalar gerekmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] ZY Sun, Y Yang, WH Qin, ST Ren, G Wu, Experimental study on flexural behavior of concrete beams reinforced by steel-fiber reinforced polymer composite bars. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 31 (24) (2012). 1737–1745
- [2] Mohammed S. Issa, Ibrahim M. Metwally, Sherif M. Elzeiny, Influence of fibers on flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars, *Engineering Structures* 33 (2011). 1754–1763
- [3] A. Lapko, M. Urbanski. Experimental and theoretical analysis of deflections of concrete beams reinforced with basalt rebar. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 15 (2015). 223- 230
- [4] Pu Zhang, Hong Zhu, Gang Wu, Shaoping Meng and Zhishen Wu. Flexural Performance of HFRP-RC Composite T-Beams with Different Interfaces. *Journal of Composites for Construction* 21 (3) (2017). 04016101
- [5] Wenjie Ge, Jiwen Zhang, Dafu Cao, Yongming Tu. Flexural Behaviors of Hybrid Concrete Beams Reinforced With Bfrp Bars and Steel Bars. *Construction and Building Materials* 87 (2015) 28–37
- [6] Zorislav Soric, Tomislav Kisicek, Josip Galic. Deflections of concrete beams reinforced with frp bars. *Materials and Structures* 43 (2010). 73-90
- [7] Renyuan Qin, Ao Zhou, Denvi Lau. Effect of reinforcement ratio on the flexural performance of hybrid FRP reinforced concrete beams. *Composites Part B* 108 (2017). 200-209

- [8] Aydın Ferhat, Cam Lifi Takviyeli Plastik (GFRP) Kompozit ve Beton ile Üretilen Hibrit Yapı Elemanlarının Mekanik Performansının Araştırılması. Doktora Tezi. Sakarya Üniversitesi, Sakarya (2011).
- [9] M.W. Goldston, A. Remennikov, M. Neaz Sheikh. Flexural behaviour of GFRP reinforced high strength and ultra high strength concrete beams. *Construction and Building Materials* 131 (2017). 606–617
- [10] Lianzhen Zhang, Yongming Sun, Wei Xiong. Experimental study on the flexural deflections of concrete beam reinforced with Basalt FRP bars. *Materials and Structures* 48 (2015). 3279– 3293
- [11] Denvid Lau, Hoat Joen Pamb. Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams. *Engineering Structures* 32 (2010). 3857–3865
- [12] Wenjun Qu, Xiaoliang Zhang, Haiqun Huang. Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Hybrid (GFRP and Steel) Bars. *Journal of Composites for Construction* 13 (5). (2009). 350-359
- [13] Hongseob Oh, Do Young Moon and Goangseup Zi. Flexural Characteristics of Concrete Beams Reinforced with a New Type of GFRP Bar. *Polymers & Polymer Composites*, Vol. 17, No. 4, (2009). 253-264
- [14] Mariamme Inman, Eythor Rafn Thorhallsson, Kamal Azrague. A Mechanical and Environmental Assessment and Comparison of Basalt Fibre Reinforced Polymer (BFRP) Rebar And Steel Rebar in Concrete Beams. *Energy Procedia* 111 (2017). 31– 40
- [15] Chakib Kassem, Ahmed Sabry Farghaly and Brahim Benmokrane. Evaluation of Flexural Behavior and Serviceability Performance of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars. *Journal of Composites for Construction* 15(5) (2011). 682-695

- [16] Douglas Tomlinson and Amir Fam, M.ASCE. Performance of Concrete Beams Reinforced with Basalt FRP for Flexure and Shear. *Journal of Composites for Construction* 19 (2) (2015): 04014036
- [17] Dawid Pawłowski, Maciej Szumigala. Flexural Behaviour of Full-Scale Basalt FRP PC Beams, Experimental and Numerical Studies. *Procedia Engineering* 108 (2015). 518 – 525
- [18] Cory High, Hatem M. Seliem, Adel El-Safty, Sami H. Rizkalla. Use of Basalt Fibers for Concrete Structures. *Construction and Building Materials* 96 (2015). 37–46
- [19] Fareed Elgabbas, Patrick Vincent, Ehab A. Ahmed, Brahim Benmokrane. Experimental Testing of Basalt-Fiber-Reinforced Polymer Bars in Concrete Beams. *Composites Part B* 91 (2016). 205-218
- [20] Japan Society of Civil Engineering. Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials. JSCE (1997).
- [21] CSA Canadian Standards Association, Design and Construction of Building Structures with Fibre-Reinforced Polymers, American Concrete Institute, Ontario, Canada, (2012), pp. S806–S812.
- [22] ACI Committee 440, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars, American Concrete Institute, Farmington Hills (MI), 2015.