



**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ADANA ALPARSLAN TÜRKER BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FRP DONATILI ÇELİK LİFLİ BETONARME KİRİŞLERİN
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**BOĞAÇHAN İSKENDER GÜRLER
YÜKSEK LİSANS TEZİ**



**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ADANA ALPARSLAN TÜRKEŞ BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FRP DONATILI ÇELİK LİFLİ BETONARME KİRİŞLERİN
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**BOĞAÇHAN İSKENDER GÜRLER
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DANIŞMAN
PROF. DR. SERKAN TOKGÖZ**

ADANA, 2023

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak, bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın hazırladığım bu tez çalışmasında;

Bu tezin özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin akademik kurallara ve etik davranışa uygun olarak elde edilerek sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, tez kapsamında bu kuralların ve davranışların gerektirdiği şekilde bu çalışmaya özgün olmayan tüm veri ve bilgiler için bilimsel etik ve gelenek çerçevesinde kaynak gösterdiğimi; bu kaynakları da kaynakçada belirttiğimi beyan ederim. Çalışmam ile ilgili yaptığım beyana aykırı bir durum saptanması halinde tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

17/08/2023

Boğaçhan İskender GÜRLER

ÖZET

FRP DONATILI ÇELİK LİFLİ BETONARME KİRİŞLERİN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Boğaçhan İskender GÜRLER

Yüksek Lisans, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Serkan TOKGÖZ

Ağustos 2023, 68 sayfa

Sunulan tezde, GFRP donatılı çelik lifli beton kirişlerin davranışı incelenmiştir. Çalışmada toplam beş adet kiriş numunesi üretilmiştir. Kiriş numuneleri 150×200 mm boyutlarında ve 2000 mm uzunluğundadır. Kirişlerden biri kontrol numunesi olarak normal beton ile üretilirken, diğer dört numune ise GFRP donatılı çelik lifli beton ile üretilmiştir. Hazırlanan kiriş numuneleri, yapısal davranışın belirlenmesi için dört nokta eğilme altında test edilmiştir. Deneysel çalışmada, çatlak yayılımları, yük-açıklık ortası deplasman ve yük-gerinim ilişkileri gözlemlenmiş ve kaydedilmiştir. Test edilen kirişlerin deneysel yük-deplasman diyagramları, kaydedilen deneysel yük ve karşılık gelen deplasman değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca, GFRP donatılı lifsiz ve çelik lifli beton kirişlerin yük-deplasman eğrilerini belirlemek için analitik bir yöntem sunulmuştur. Teorik çalışmada, lifsiz ve çelik lifli beton malzemenin doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışı dikkate alınmıştır. Kiriş numuneleri teorik yöntemle göre analiz edilmiş ve sonuçlar test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada deneysel ve teorik sonuçların iyi derecede uyum içinde oldukları belirlenmiştir. Çelik liflerin, GFRP donatılı lifsiz ve çelik lif beton kirişlerin yük-deplasman davranışını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çelik Lif, Fiber Takviyeli Polimer, Betonarme Kiriş, Eğilme Davranışı

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF FRP REINFORCED STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE BEAMS

Boğaçhan İskender GÜRLER

M.Sc., Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Serkan TOKGÖZ

August 2023, 68 pages

In the presented thesis, the behavior of steel fiber reinforced concrete beams with GFRP bars has been examined. In the study, a total of five beam specimens were manufactured. The cross section sizes of beams were 150×200 mm and the beam specimens were 2000 mm in length. One beam was control specimen constructed with plain concrete, while the other four specimens were steel fiber reinforced concrete beams with GFRP bars. The prepared beam specimens were tested under four-point bending for the determination of the structural behavior. In the experimental study, the crack propagations, load versus mid-span deflections and load-strain relations were observed and recorded. The experimental load-deflection diagrams of the tested beams have been attained using recorded experimental load and corresponding deflection values. In addition, an analytical procedure has been presented to determine the load-deflection curves of plain and steel fiber reinforced concrete beams with GFRP bars. In the theoretical study, nonlinear stress-strain behavior of plain and steel fiber concrete material has been taken into account. The beam specimens were analysed based on the theoretical method and the results were compared with test results. A good degree of accuracy has been obtained between test and analysis results in the study. It is concluded that steel fibers considerably effect on the load-deflection behavior of plain and steel fiber reinforced concrete beams with GFRP bars.

Keywords: Steel Fiber, Fiber Reinforced Polymer, Reinforced Concrete Beam, Flexural Behaviour



Aileme

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans programımın yürütülmesi sürecinde tez konumun seçiminde bulunan, deneysel çalışmaları yaparken bana her türlü desteği sağlayan, çalışmalarına yön veren, engin tecrübelerini her zaman sağlayan, daimi hoşgörüsüyle ve pozitif enerjisiyle destek olan ve tezimin başlangıcından sonuna kadar gelinen süreçte mevcut halini almasını sağlayan değerli hocam tez danışmanım Prof. Dr. Serkan TOKGÖZ'e şükranlarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı yaptığım süre içinde gerek bilgileriyle gerek desteğiyle gerekse laboratuvar çalışmalarında bana yardımcı olan Arş. Gör. Dr. Sedat KARAAHMETLİ'ye teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca laboratuvar çalışmalarında bana yardımcı olan laboratuvar görevlilerine teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışma konumda bana ihtiyaç duyduğum malzemeleri sunan Robusbar firmasına ve Sinan Murat CANSUNAR'a teşekkür ederim.

Lisans ve yüksek lisansta derslerime giren, bana engin bilgilerini katan, benim bu günlere gelmemi sağlayan bütün değerli hocalarıma şükranlarımı sunarım.

Hayatımda bana her zaman maddi ve manevi desteğini bir kere bile eksik etmeyen canım annem Sevgi GÜRLER'e, canım babam Mustafa Kaya GÜRLER'e ve 6 Şubat depreminde kaybettiğim canım abim Bekir Tolga GÜRLER'e teşekkürü borç bilirim.

Bu tez 21303024 projesi numarası ile Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANNAMESİ	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xii
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
3. MALZEME VE YÖNTEM	12
3.1. Deneysel Çalışma	12
3.1.1. Malzemeler	12
3.1.1.1. Çimento	12
3.1.1.2. Agregat	13
3.1.1.3. Çelik Lif	14
3.1.1.4. Donatı	14
3.1.1.5. Kimyasal Katkı	15
3.1.1.6. Su	15
3.1.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması	15
3.1.2.1. Donatının Hazırlanması	17
3.1.2.2. Donatı Gerinim Ölçerlerin Yapıştırılması	18
3.1.2.3. Kalıpların Hazırlanması	21
3.1.2.4. Beton Dökümü	22
3.1.3. Deneyin Uygulanışı	27
3.1.3.1. Beton Basınç Dayanımı	27
3.1.3.2. Beton Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi	28
3.1.3.3. Kiriş Eğilme Deneyi	29
3.2. Analitik Çalışma	30
3.2.1. Yöntemde Kabul Edilen Varsayımlar	31

3.2.2.	Beton ve FRP Donatı İçin Kabul Edilen Gerilme-Birim Deformasyon Modeli	31
3.2.3.	Yöntemin Formülasyonu	32
3.2.4.	Analiz denge denklemleri	33
3.2.5.	Kiriş deplasmanı hesabı	33
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	36
4.1.	Deneysel Bulgular	36
4.1.1.	Silindir Numune Deneyleri	36
4.1.2.	Prizma Numune Deneyleri	39
4.1.3.	Kiriş Deneyleri	42
4.1.3.1.	B1 Kirişi	42
4.1.3.2.	B2 Kirişi	45
4.1.3.3.	B3 Kirişi	48
4.1.3.4.	B4 Kirişi	52
4.1.3.5.	B5 Kirişi	55
4.2.	Analitik Bulgular	58
4.2.1.	Test Edilen Kirişlerin Analizi	58
5.	SONUÇLAR	63
6.	ÖNERİLER	64
	KAYNAKÇA	65

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. FRP donatı çeşitleri.....	1
Şekil 1.2. Çelik lifle yapılan Valencia'daki Avrupa Oşinografi Park Binası (Blaszczynski ve Przybylska-Falek, 2015).....	2
Şekil 3.1. CEM I 42.5R sınıfı çimento.....	13
Şekil 3.2. Agregaların otomatik elek yardımıyla gradasyonlarına ayrılması.....	13
Şekil 3.3. Betonarme kirişlerin karışımlarında kullanılan malzemeler.....	13
Şekil 3.4. Betonarme kiriş karışımında kullanılan 3D 65/60 çelik lif.....	14
Şekil 3.5. Betonarme kiriş karışımında kullanılan akışkanlaştırıcı.....	15
Şekil 3.7. Donatıların hazırlanması.....	18
Şekil 3.8. Donatı hazırlığı	18
Şekil 3.9. FLAB-5-11-3LJC-F tipi birim deformasyon ölçerler (Strain Gauge)	19
Şekil 3.10. Birim deformasyon ölçerler üzerine yapılan kaplama	19
Şekil 3.11. Birim deformasyon üzerine yapılan yapıştırma ve kaplama işlemi detayı	21
Şekil 3.12. Kiriş kalıplarının kurulması	21
Şekil 3.13. Silindir ve prizma kalıpların kurulması	22
Şekil 3.14. Donatıların kalıba yerleştirilmesi.....	22
Şekil 3.15. Beton dökümü aşamaları.....	26
Şekil 3.16. Silindir numunelere uygulanan kükürt başlık işlem aşamaları	28
Şekil 3.17. Silindir numunelere basınç deneyi uygulanması	28
Şekil 3.18. Prizma numunelere eğilmede çekme deneyi uygulanması	29
Şekil 3.19. Kiriş eğilme deneyi düzeneği.....	30
Şekil 3.20. Kiriş eğilme deneyi düzeneği şematik gösterimi	30
Şekil 3.21. Beton ve FRP donatı gerilme-birim deformasyon modelleri.....	31
Şekil 3.22. Kiriş birim deformasyon ve gerilme dağılımı.....	32
Şekil 4.1. Silindir numunelere ait gerilme (σ)-birim şekil değiştirme (ϵ) eğrileri	37
Şekil 4.2. Silindir numunelerinin tek eksenli basınç testine maruz kaldıktan sonraki durumları	39
Şekil 4.3. Prizma numunelerinin eğilmede çekme testine maruz kaldıktan sonraki durumları.....	41
Şekil 4.4. B1 kirişi dört nokta eğilme deneyi.....	43
Şekil 4.5. B1 kirişi yük-deplasman eğrisi	44
Şekil 4.6. B1 kirişi yük-şekil değiştirme eğrisi	44
Şekil 4.7. B2 kirişi dört nokta eğilme deneyi.....	47
Şekil 4.8. B2 kirişi yük-deplasman eğrisi	47
Şekil 4.9. B2 kirişi yük-şekil değiştirme eğrisi	48
Şekil 4.10. B3 kirişi dört nokta eğilme deneyi.....	50
Şekil 4.11. B3 kirişi yük-deplasman eğrisi	51
Şekil 4.12. B3 kirişi yük-şekil değiştirme eğrisi	51
Şekil 4.13. B4 kirişi dört nokta eğilme deneyi.....	53
Şekil 4.14. B4 kirişi yük-deplasman eğrisi	54
Şekil 4.15. B4 kirişi yük-şekil değiştirme eğrisi	54

Şekil 4.16. B5 kirişi dört nokta eğilme deneyi.....	56
Şekil 4.17. B5 kirişi yük-deplasman eğrisi	57
Şekil 4.18. B5 kirişi yük-şekil değiştirme eğrisi	57
Şekil 4.19. Test edilen kirişlerin yük-deplasman eğrileri	58
Şekil 4.20. B1 kirişinin deneysel ve teorik yük-deplasman eğrileri	59
Şekil 4.21. B2 kirişinin deneysel ve teorik yük-deplasman eğrileri	60
Şekil 4.22. B3 kirişinin deneysel ve teorik yük-deplasman eğrileri	60
Şekil 4.23. B4 kirişinin deneysel ve teorik yük-deplasman eğrilerinin kıyaslanması	61
Şekil 4.24. B5 kirişinin deneysel ve teorik yük-deplasman eğrileri	62



TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1. Çelik lifin mekanik ve fiziksel özellikleri	14
Tablo 3.2. GFRP ve çelik donatıların mekanik özellikleri	15
Tablo 3.3. Betonarme kirişlerin karışım ağırlıkça değerleri (kg/m ³)	16
Tablo 3.4. Kiriş numunelerinin isimleri ve içerikleri	16
Tablo 3.5. Kiriş numunelerinin çekme ve basınç donatıları	17
Tablo 4.1. Silindir numunelerin basınç dayanımı değerleri	36
Tablo 4.2. Prizma numunelerin çekme dayanımı değerleri	39
Tablo 4.3. Test edilen betonarme kirişlerin teorik ve deneysel değerlerinin karşılaştırılması	59



KISALTMALAR

ACI	: American Concrete Institute
AFRP	: Aramid lif takviyeli polimer (Aramid fiber reinforced polymer)
BFRP	: Bazalt lif takviyeli polimer (Basalt fiber reinforced polymer)
CEM	: Çimento sınıfı
CFRP	: Karbon lif takviyeli polimer (Carbon fiber reinforced polymer)
cm	: Santimetre
EN	: Avrupa normu
FRP	: Lif takviyeli polimer (Fiber reinforced polymer)
GFRP	: Cam lif takviyeli polimer (Glass fiber reinforced polymer)
GPa	: Gigapaskal
HSC	: Yüksek dayanımlı beton
kg	: Kilogram
kN	: KiloNewton
LVDT	: Deplasman ölçer (Linear Variable Differential Transformer)
m	: Metre
m³	: Metreküp
mm	: Milimetre
MPa	: Megapaskal
N	: Newton
NSC	: Normal dayanımlı beton
R	: Rapid
SG1	: Donatı birim deformasyon ölçümü
SG2	: Beton birim deformasyon ölçümü
TD1	: Kiriş sol kesme açıklığı ortası deplasman ölçümü
TD2	: Kiriş açıklık ortası deplasman ölçümü
TD3	: Kiriş sağ kesme açıklığı ortası deplasman ölçümü
TS	: Türk Standardı

SEMBOLLER

λ	: Betonun modifikasyon faktörü
Δ_{cr}	: Çatlama yüküne karşılık gelen deplasman
I_{cr}	: Çatlamış kesit atalet momenti
I_e	: Etkin atalet momenti
I_g	: Brüt atalet momenti
M_a	: Kritik kesitte uygulanan servis yükü momenti
M_{cr}	: Çatlama momenti
P_{cr}	: Çatlama yükü
d_1	: Prizma numune genişliği
d_2	: Prizma numune yüksekliği
f'_c	: Beton basınç dayanımı
f_{ctf}	: Beton eğilmede çekme dayanımı
f_{ctk}	: Beton çekme dayanımı
n_f	: FRP donatı elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranı
y_t	: Kesit merkezinden çekme bölgesi dış yüzeyine olan mesafe
ϵ_{ci}	: Her bir şeritin ağırlık merkezindeki birim deformasyon değeri
ϵ_{cu}	: Betonun kabul edilen maksimum birim şekil değiştirmesi
ϵ_{fu}	: FRP donatının maksimum birim şekil değiştirmesi
ρ_f	: Çekme donatısı oranı
ρ_{fb}	: Dengeli donatı oranı
Δ	: Kiriş deplasmanı
A	: Silindir numunenin enkesit alanı
A_{ci}	: Şeritlerin alanı
A_f	: FRP donatı alanı
b	: Kesit genişliği
c	: Tarafsız eksen derinliği
d	: Faydalı yükseklik
d'	: Paspayı
E_c	: Beton elastisite modülü

E_f	: FRP donatı elastisite modülü
E_s	: Çeliğin elastisite modülü
ϵ_s	: Çeliğin birim deformasyonu
f_{fu}	: FRP donatı kopma dayanımı
f_y	: Çeliğin akma dayanımı
h	: Kesit yüksekliği
k	: Tarafsız eksen derinliğinin donatı derinliğine oranı
M	: Moment
N	: Kuvvet denge denklemi eşiti
$\emptyset$	: Donatı çapı
P	: Yük
P_{test}	: Kiriş deneysel yükü
P_u	: Kiriş teorik yükü
x_{ci}	: Basınç bölgesindeki beton şeritin ağırlık merkezinin basınç bölgesi en dış life olan dik uzaklığı
σ_c	: Betondaki basınç gerilmesi
σ_{ci}	: Betondaki her bir şeritin ağırlık merkezindeki gerilme değeri
σ_f	: FRP donatı gerilmesi
σ_s	: Çeliğin gerilmesi
F	: Eğilmede çekme anında ulaşılan maksimum yük
L	: Mesnetler arası açıklık
a	: Kesme açıklığı
γ	: Kiriş uzunluğu boyunca rijitlikteki değişimi hesaba katan parametre
ϵ	: Birim deformasyon
σ	: Basınç gerilmesi

1. GİRİŞ

Çelik donatıda korozyon oluşumu betonarme yapıların güvenliğini olumsuz olarak etkileyen önemli faktörlerden birisidir. Çünkü korozyona maruz kalan betonarme elemanların yük taşıma kapasiteleri ve dayanıklılıkları önemli derecede azalır. Betonarme yapıların onarımı ve güçlendirilmesi, proje maliyetlerini ciddi şekilde arttırmaktadır. Bu durum ciddi bir ekonomik, sosyal ve çevresel sorun haline gelmektedir. Korozyon problemini ortadan kaldırmak için betona pas önleyici eklemek ve epoksi kaplı çelik donatılar kullanmak gibi bazı yöntemler geliştirilse de bu yöntemlerin hiçbiri uzun zaman sürecinde garanti vermemektedir (Cheng, 2022).

Bu olumsuzluklar nedeniyle günümüzde fiber takviyeli polimer (FRP) donatılar, betonarme yapılarda çelik donatıların yerine kullanım alanı bulmaktadır. İnşaat mühendisliği uygulamalarında kullanılan elyaf takviyeli polimer (FRP) donatıların üretiminde cam, karbon, aramid ve bazalt olmak üzere 4 ana malzeme kullanılmaktadır (Gudonis ve ark., 2013; Adaklı, 2022). Bu malzemelerin kullanımından cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) donatı, karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) donatı, bazalt elyaf takviyeli polimer (BFRP) donatı ve aramid elyaf takviyeli polimer (AFRP) donatı elde edilmektedir (Adaklı, 2022). Şekil 1.1’de GFRP, CFRP, AFRP ve BFRP donatılar gösterilmiştir.



(a) GFRP



(b) CFRP



(c) AFRP



(d) BFRP

Şekil 1.1. FRP donatı çeşitleri

FRP donatılar mükemmel korozyon direnci ve uzun zaman içinde özelliklerini kaybetmemeleri nedeniyle özellikle klorlu ortamlar gibi ağır çevresel koşullarda yapılarda kullanılmaktadır. Bunlara ek olarak, FRP donatıların yüksek mukavemet / ağırlık oranına, yüksek yorulma direncine, ısı yalıtımına ve elektrik yalıtımına sahip olmaları yapısal davranış bakımından çok ciddi avantaj sağlamaktadır (Abbood ark., 2020; Cheng, 2022). Ancak, düşük elastisite modülü ve doğrusal elastik gerilme-birim deformasyon davranışı da dezavantajları olarak söylenebilir. Bu nedenle FRP donatıların yapılarda nihai kopma mukavemetine ulaşmayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Aksi durumda betonarme yapılarda bazı hallerde geniş çatlakların oluşumuna ve gevrek kırılmaya yol açabilir (Cheng, 2022).

Bunlara ilave olarak, betonarme yapılarda yük etkisi altında çatlakların genişlemesini engellemek, betonun çekme mukavemetini ve kesme mukavemetini arttırmak ve betonun sünekliliğini iyileştirmek için çelik lifler kullanılabilir. FRP donatılarla güçlendirilen betonarme yapılarda çelik liflerin kullanımı, betonarme elemanların mekanik özelliklerini önemli derecede iyileştirmektedir (Cheng, 2022). Çelik lifler yaygın olarak yüksek dayanıma sahip betonarme yapılarda, endüstri yapılarında, havaalanlarında, depreme karşı dirençli yapılarda ve çok katlı yapılarda kullanılmaktadır (Şimşek, 2023). Şekil 1.2’de çelik lifle yapılan Valencia’daki Avrupa Oşinografi Park binası gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Çelik lifle yapılan Valencia’daki Avrupa Oşinografi Park Binası (Blaszczynski ve Przybylska-Falek, 2015)

Çelik liflerin ısıya karşı dirençli olması, çekme dayanımının betona göre daha yüksek olması, betonla aderansı iyi sağlaması, çatlakların genişlemesini engellemesi gibi avantajları bulunmaktadır. Fakat çelik liflerin literatürde tavsiye edilen optimum oranlarda kullanılması

büyük bir önem arz etmektedir. Çünkü çelik lifler optimum oranları aştığında homojen bir çimento hamuru oluşmaz ve betonun işlenebilirliği azalabilir (Tahenni, 2016; Şimşek, 2023). Çelik lifler, lifin narinliğine (boy / çap oranı) ve uç geometrik şekillerine göre sınıflandırılmaktadır. Çelik lifin narinliği, tipi ve geometrisi gibi parametreler betonarme yapıların yapısal performansını ciddi oranda etkilemektedir. Ayrıca çelik lifin hacimsel oranı ve çelik lifin beton içerisinde homojen olarak dağılması betonun davranışına etki eden parametrelerdir (Tokgöz ve ark., 2012).

Çelik liflerin korozyona uğrayacağına dair endişeler olsa da bu korozyon çatlamamış betonun yüzey kabuğuyla sınırlıdır. Çelik lifler, beton yüzeyine yakın yerleştirildiklerinde veya çatlakları engellediklerinde ciddi korozyona maruz kalsalar da yüksek klorür içeriğine rağmen gömülü lifler korozyondan çok etkilenmemektedir (Cheng, 2022).

Buna ilave olarak, betonarme kiriş derinliğinin bir kısmına çelik lifler eklendiğinde eğilme performansını arttırmakla beraber mühendislik uygulamalarında kritik bir parametre olan maliyeti de düşürmektedir. Buradaki açıklamalar sadece geleneksel olarak güçlendirilen betonarme kirişlerle sınırlı olmaktadır. Kısmi ya da tam derinlikte FRP çubuklarla güçlendirilen çelik lifli betonarme kirişlerle ilgili çalışmalar talep görmektedir (Cheng, 2022).

Literatürde, ACI 440-1R.15 rehberinde FRP donatılı beton kirişlerin nihai eğilme mukavemeti için önerilen analitik yöntemin, çelik lifle güçlendirilen FRP donatı takviyeli kirişlerin eğilme mukavemetini tanımlamada yeterli olmadığı belirlenmiştir. FRP donatılarla güçlendirilen bir betonarme elemanın nihai eğilme dayanımı, betonun maksimum birim kısalma ve basınç gerilme parametresine bağlı olduğundan, ACI 440-1R.15’de yer alan analitik modelin çelik lifli FRP donatılı kirişlerin davranışını tanımlamada çelik liflere ait yeterli parametrenin dikkate alınmadığı görülmektedir (Cheng, 2022).

Sunulan tez çalışmasında, çelik lifli ve lifsiz GFRP donatılı betonarme kirişler üretilerek eğilme davranışının belirlenmesi amacıyla dört nokta yüklemesi altında test edilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen kirişlerde yüksek mukavemete sahip, suya ve kimyasallara karşı yüksek dirençli olan ve düşük maliyetli olan GFRP donatı tercih edilmiştir. Çalışmada, çelik lifli FRP donatılı kirişlerin tasarımı için literatüre katkı sağlayabilecek nihai eğilme mukavemetini ve

yük-deplasman davranışını tanımlamaya yönelik analitik bir yöntem sunulmuştur. Yapılan çalışmada çelik lifsiz ve farklı lif hacimsel oranlara sahip çelik lifli betonarme kirişlerin yük-deplasman davranışı, çatlama performansı, taşıma gücü kapasitesi hem deneysel hem de teorik olarak ele alınmıştır.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Günümüzde yapılarda fiber takviyeli polimer (FRP) donatı içeren betonarme elemanların kullanımı giderek yaygınlaşmaya başlamıştır. Klasik betonarme donatısı dış etkilere maruz kalması halinde korozyona uğramaktadır. Bu nedenle söz konusu klasik donatı yerine çelikten daha yüksek dayanıma sahip ve korozyona karşı daha dirençli olan FRP donatılar yapısal elemanlarda kullanılabilir. Bunların yanında klasik inşaat donatısı elektrik ve manyetik alanlardan olumsuz etkilenmekte FRP donatısı ise söz konusu etkilerde olumlu davranış göstermektedir.

Betonun basınç dayanımının yüksek çekme dayanımının ise düşük olduğu bilinmektedir. FRP donatılar yapısal elemanlarda çekme kuvvetlerini karşılamada kullanılmaktadır. FRP donatılar üretiminde kullanılan malzeme içeriği ile yüksek çekme dayanımına sahiptirler. Bu nedenle yaygın kullanım alanı bulabilmektedirler. Bunların yanında betonun sünekliğini arttırmak amacıyla çelik lifler kullanılarak yapısal elemanlar üretilebilmektedir. Uygun hacimsel miktarda kullanılan çelik lifler elemanın deformasyon kapasitesini arttırmakta ve yapısal elemanın sünekliğine olumlu katkı sağlamaktadır. Bu nedenle FRP donatılı betonarme kirişlerin çelik lifli olarak üretilmesi ile yük etkisi altında oldukça iyi davranış sergileyecekleri söylenebilir. Literatürde FRP donatılı ve çelik lifli kirişler üzerine birtakım çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmektedir.

Liu ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada CFRP veya GFRP donatıya ve çelik lifsiz ve %0.6 çelik lif hacimsel oranına sahip olan 14 adet kiriş numunesi üretilmiştir. Çalışmada kullanılan çelik lifin uzunluğu 13 mm, çapı ise 200 μm 'dir. Çalışmada üretilen kirişlerin genişliği (b) 20 cm, yüksekliği (h) 30 cm ve net açıklıkları (L) ise 3 m, 3.6 m ve 4.2 m'dir. Çalışmada üretilen kirişler dört noktalı eğilme deneyine tabi tutularak kirişlerin davranışı incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda FRP (CFRP ve GFRP) donatılı çelik lifli betonarme kirişlerin maksimum çatlak genişliğinin azaldığı, çatlak oluşumunun geciktirildiği, yüksek net açıklığa ve yüksek takviye oranına sahip FRP donatılı betonarme kirişlerde çatlak genişliğinin daha da azaldığı, FRP donatının betonarme kirişlerde eğilme ve kesme kapasitesini arttırdığı ve GFRP donatılı kirişlerdeki toplam çatlak sayısının (346 tane) CFRP donatılı kirişlerdeki toplam çatlak sayısından (277 tane) daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ideal bir FRP donatılı çelik lifli betonarme kiriş tasarımı önerilmiştir.

Jafarzadeh ve Nematzadeh (2020) tarafından sunulan çalışmada çelik lifsiz ve %1 çelik lif hacimsel oranına ve farklı takviye oranına sahip olan GFRP donatılı 11 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Üretilen kirişlerin boyutları 150 mm×150 mm×1260 mm'dir. Yapılan çalışmada kirişler 20°C, 250°C, 400°C ve 600°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra dört noktalı eğilme deneyine tabi tutularak betonarme kiriş numunelerin davranışı incelenmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda GFRP donatıya ve çelik life sahip olan betonarme kirişlerde yük taşıma kapasitesinin arttığı, oluşan deplasmanın azaldığı, çatlak genişliğinin azaldığı ve çatlak oluşumunun sınırlı düzeyde olduğu görülmüştür. Ayrıca yük taşıma kapasitesi 250°C'de ihmal edilebilecek kadar azaldığı, 400°C'de ciddi oranda arttığı ve 600°C'de ise ciddi oranda azaldığı belirlenmiştir.

Cheng ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmada %0, %0.5, %1, %1.5 ve %2 çelik lif hacimsel oranlarına, farklı yükseklik seviyesindeki çelik life, farklı donatı konfigürasyonlarına ve farklı donatı oranlarına sahip olan BFRP donatılı 11 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Çalışmada üretilen kirişlerin boyutları 150 × 300 × 2100 mm, net açıklığı L=1800 mm, kesme açıklığı 600 mm ve paspayı 15 mm'dir. Söz konusu üretilen kirişler dört nokta eğilme deneyine tabi tutularak eğilme davranışları incelenmiştir. Ayrıca ACI 440.1R-15'e göre teorik hesaplar da yapılarak deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda kirişlerin çelik lif hacimsel oranı arttırıldığında kirişlerdeki sehimin ve çatlak genişliğinin azaldığı, bunun yanında nihai yükün ve servis yükünün arttığı görülmüştür. Bunlara ek olarak %1.5 ve %2 çelik lif hacimsel oranına sahip olan kirişlerin benzer sehim ve çatlak davranışları sergilediği gözlemlenmiştir. Bu nedenle kirişlerde kullanılabilecek maksimum çelik lif hacimsel oranının %1.5 olması gerektiği önerilmiştir. Çalışmada, kirişin tüm yüksekliği yerine 3/4'ünün çelik lifli olması halinde iyi sonuç elde edilebildiği görülmüştür. Ayrıca BFRP donatı oranı arttıkça betonarme kirişlerdeki sehim ve çatlak genişliğinin azaldığı belirlenmiştir. Bunlara ilave olarak, deneysel ve teorik sonuçların uyum gösterdiği belirlenmiş, beton basınç birim deformasyon değerinin geleneksel betonarme kiriş için 0.0035 ve çelik lifli betonarme kiriş için 0.0045 olması gerektiği önerilmiştir.

Cheng ve ark. (2020) tarafından yapılan çalışmada çelik lifsiz ve %1.5 çelik lif hacimsel oranına sahip FRP donatılı 14 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Üretilen betonarme kirişlerin boyutları

150 mm×300 mm×2100 mm olup net açıklığı ise 1800 mm'dir. Yapılan çalışmada üretilen kirişler dört nokta eğilme deneyine tabi tutularak betonarme kirişlerin davranışı incelenmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda FRP donatıya ve çelik life sahip olan betonarme kirişlerin eğilme dayanımının daha yüksek olduğu ve sehimin azaldığı, çatlak oluşumunun bir miktar önlenerek geciktiği gözlemlenmiştir.

Kandasamy ve ark. (2021) tarafından sunulan çalışmada çelik lifsiz ve %0.5, %1 ve %1.5 çelik lif hacimsel oranlarına sahip GFRP donatılı 5 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Üretilen betonarme kirişlerin boyutları 150 mm×250 mm×3000 mm olup net açıklığı ise 2800 mm'dir. Yapılan çalışmada üretilen kirişler dört nokta eğilme deneyine tabi tutularak betonarme kirişlerin davranışı deneysel ve analitik olarak (ANSYS programında) incelenmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda FRP donatısı kullanıldığında ve çelik lif oranı arttığında betonarme kirişin yük taşıma kapasitesinin arttığı, bu artışın %0.5 çelik lif hacimsel oranına sahip FRP donatılı betonarme kirişte %65, %1 çelik lif hacimsel oranına sahip FRP donatılı betonarme kirişte %85, %1.5 çelik lif hacimsel oranına sahip FRP donatılı betonarme kirişte ise %110 olarak meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca çalışmada FRP donatının ve çelik lifin kullanıldığı betonarme kirişlerde deformasyon azalarak çatlak oluşumunun ve çatlak genişliğinin sınırlı düzeyde meydana geldiği ve çelik lifin kullanıldığı betonarme kirişlerin daha sünek bir özellik gösterdiği görülmüştür.

Du ve ark. (2021) tarafından sunulan çalışmada çelik lifsiz ve %0.5, %1 ve %1.5 çelik lif hacimsel oranlarına sahip BFRP donatılı 10 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Üretilen betonarme kirişlerin boyutları 150 mm×250 mm×2100 mm olup net açıklığı ise 1800 mm'dir. Yapılan çalışmada üretilen kirişler dört nokta eğilme deneyine tabi tutularak betonarme kirişlerin davranışı deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda BFRP donatıya ve çelik life sahip olan betonarme kirişlerin eğilme dayanımının ve yük taşıma kapasitesinin arttığı, çatlak aralığının ve çatlak genişliğinin azaldığı ve çatlak oluşumunun geciktiği belirlenmiştir.

Min ve ark. (2012) tarafından yapılan çalışmada 3'ü CFRP donatıyla diğer 3'ü ise GFRP donatıyla güçlendirilen 6 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Kirişlerin 2'sinde sentetik lif, 2'sinde %1 çelik lif hacimsel oranına sahip çelik lif, geriye kalan 2'si ise lifsiz olacak şekilde

Üretimleri yapılmıştır. Sunulan çalışmada lif takviyesinin kirişlerin yük taşıma kapasitesi, çatlak oluşumu ve süneklilik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Buna ilaveten, test sonuçları nihai eğilme momenti tahminleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda, liflerin eklenmesiyle birlikte ilk eğilme atlaklağı düzeyinin ötelendiği ve çatlak genişliğinin sınırlı düzeyde kaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca liferin eklenmesiyle kirişlerin snekliliğinin %70-%80 oranında arttığı tespit edilmiştir.

Elzeiny ve ark. (2011) tarafından sunulan çalışmada GFRP donatılı 7 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Kirişler üretilirken lifsiz, polipropilen lifli, cam lifli ve elik lifli olmak üzere 4 ayrı gruba ayrılmıştır. Yapılan çalışmada betonarme kirişlerin eğilme davranışı ve süneklilik performansı incelenmiştir. Ayrıca alışma kapsamında teorik analiz de ele alınmıştır. Çalışma sonucunda deneysel ve teorik sonuçların birbirleriyle uyum içerdiği gözlemlenmiştir. Buna ilaveten, tüm lif türlerinin betonarme kirişlerin sünekliliğini ve taşıma gücü kapasitesini arttırdığı tespit edilmiştir.

Cheng ark. (2018) tarafından sunulan çalışmada %0 ile %2 arasında değişen elik lif hacimsel oranlarına, farklı donatı oranlarına ve farklı donatı konfigürasyonlarına sahip 12 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Çalışmada üretilen kirişlerin boyutları 150 × 300 × 2100 mm, net açıklığı L=1800 mm ve paspayı 25 mm'dir. Çalışmada 75 mm'lik eşit aralıklarla Φ10 etriye kullanılmıştır. Ayrıca elastisite modülünün tayin edilmesi amacıyla 150 × 150 × 300 mm'lik prizma numuneler üretilmiştir. Yapılan alışma kapsamında üretilen kirişler dört nokta eğilme deneyine maruz bırakılarak eğilme davranışları incelenmiştir. ACI 440-1R.15'e göre teorik çalışmalar da yapılarak deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan alışma sonucunda FRP donatı oranı arttırıldığında eğilme dayanımında önemli derecede bir artış gözlendiği, sehimin ve çatlak genişliğinin ise ciddi derecede azaldığı tespit edilmiştir. Fakat elik lif hacimsel oranı arttırıldığında eğilme dayanımında çok bir artış gözlenmese de sehimde ve çatlak genişliğinde ciddi bir azalış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca elik lif hacimsel oranı arttırıldığında kirişlerin snekliliğinin arttığı görülmüştür. Ek olarak deneysel sonuçlarla teorik sonuçların birbiriyle uyum gösterdiği tespit edilerek betonarme kirişlerin etkin atalet momentinin hesaplanması için yeni bir hesap yöntemi geliştirilmiştir.

Banthia ve ark. (2016) tarafından sunulan çalışmada %2 çelik lif hacimsel oranına sahip GFRP donatılı 4 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Betonarme kiriş numuneleri üretilirken %0.53 ile %1.71 arasında değişen farklı donatı oranları dikkate alınmıştır. Kirişlerin boyutları 200 mm × 270 mm × 2900 mm olacak şekilde üretilmiştir. Yapılan çalışmada kirişlerin eğilme davranışı incelenmiştir. Ayrıca teorik analiz de yapılarak deneysel ve teorik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda teorik ve deneysel sonuçların birbiriyle uyum gösterdiği tespit edilmiştir. Daha yüksek donatı oranına sahip betonarme kirişlerin daha fazla çatlama sonrası sertliğe, daha yüksek moment kapasitesine, daha yüksek sünekliğe ve daha iyi eğilme performansına sahip olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada, kirişlerin çatlama momentinin ve atalet momentinin belirlenmesi üzerine bir yöntem önerilmiştir.

Şengün (2016) tarafından yapılan çalışmada şerit genişlikleri 5 ve 10 mm olan ve tek doğrultuda sarılan CFRP ile güçlendirilmiş çelik lifsiz ve %2 çelik lif hacimsel oranına sahip olan etriyesiz kirişler üretilmiştir. Üretilen kirişlerin kesme açıklığının etkili yüksekliği oranı (a/d) 2.5 olacak şekilde tasarımı yapılmıştır. Yapılan çalışmada, çelik liflerin betonarme kirişlerin davranışı üzerine etkileri deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda çelik lifli kirişlerin çelik lifsiz kirişlere göre daha sünek davrandığı ve daha az deplasman yaptığı tespit edilmiştir.

Cullazoğlu (2014) tarafından yapılan çalışmada FRP donatıya sahip betonarme kirişler üretilerek test edilmiştir. Yapılan çalışmada FRP donatıların betonarme kirişler üzerindeki davranışları incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda FRP donatıların betonarme kirişlerde çatlak genişliğini azaltarak çatlak oluşumunu geciktirdiği, sünekliği ve rijitliği arttırdığı belirlenmiştir.

İbrahim ve ark. (2016) tarafından sunulan çalışmada farklı çaplarda bazalt elyaf takviyeli polimer (BFRP) donatı ile güçlendirilen 8 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Kirişlerin boyutları 200 mm × 300 mm × 3050 mm'dir. Donatı oranı (ρ_f), dengeli donatı oranının (ρ_b) 1.43 ile 10.70 katı olacak şekilde 3 ayrı kategoride kirişler tasarlanmıştır. Yapılan çalışmada test edilen kirişlerin davranışı incelenmiştir. Çalışma sonucunda, ρ_f / ρ_b oranı artımının kirişin taşıma gücünü arttırmak yerine çatlakları azaltmada daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Şimşek (2023) tarafından yapılan çalışmada biri çelik lifsiz, diğer 7 adeti farklı çelik lif hacimsel oranlarda (20, 40, 60 kg / m³) ve farklı uç kancalara (3D, 4D ve 5D) sahip olmak üzere toplam 8 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen kirişlerin boyutları 150 mm × 200 mm × 1750 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Üretilen betonarme kirişlerinin yapısal davranışlarının belirlenmesi amacıyla kiriş numunelerine dört nokta eğilme deneyi uygulanmış ve kirişlerin yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Çalışmada, üretilen betonarme kirişlerin taşıma gücünün ve yük-deplasman eğrilerinin elde edilmesine yönelik teorik bir yöntem ele alınmıştır. Kirişlerin analizi yapılarak elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada deneysel ve teorik sonuçlar arasında uyum gözlenmiş ve optimum çelik lif hacimsel oranı önerilmiştir. Ayrıca çalışma sonucunda çelik liflerin kirişlerin yük taşıma kapasitesini arttırdığı, çatlak oluşumunu ve çatlak genişliğini ise önemli derecede azalttığı belirlenmiştir.

Ünal (2022) tarafından sunulan çalışmada 2 tanesi kontrol numunesi olmak üzere 6 adet GFRP donatılı çimento esaslı kompozit (ECC) içeren betonarme kiriş üretilmiştir. Söz konusu üretilen kirişlerin boyutları 150 mm × 200 mm × 1750 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Yapılan çalışmada kullanılan GFRP donatı çapı Φ12 olarak seçilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen betonarme kirişlerin yapısal davranışlarının tespiti için dört nokta eğilme deneyi yapılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda kirişlerin yük-deplasman eğrileri ve GFRP donatıların yük-gerinim diyagramları elde edilmiştir. Ayrıca sunulan tez çalışmasında kirişlerin analizi yapılarak elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda deneysel ve teorik sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Ahmed ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada normal ve yüksek dayanımlı (NSC ve HSC) ve farklı donatı konfigürasyonlarına sahip olmak üzere GFRP donatılı 14 adet betonarme kiriş hazırlanmıştır. Kirişlerin boyutları 200 mm × 400 mm × 4250 mm olacak şekilde üretilmiştir. Kirişlerin hazırlığında elastisite modülü 48.7-69.0 GPa arasında değişen kum kaplı ve sarmal yivli 3 farklı GFRP donatı kullanılmıştır. Kirişler orta açıklık mesafesi 3750 mm olacak şekilde dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Yapılan çalışma kapsamında betonarme kirişlerin eğilme davranışı incelenmiştir. Çalışma sonucunda, kirişlerin çatlak genişliklerinin elastisite modülünden ve donatı konfigürasyonundan etkilendiği, sehimlerin ise elastisite modülünden ve donatı konfigürasyonundan çok etkilenmediği tespit edilmiştir.

Padmarajaiah ve Ramaswamy (2002) yaptıkları çalışmada %0 ile %1.5 arasında değişen çelik lif hacimsel oranlarına sahip FRP donatılı kirişler üretilmişlerdir. Kirişlerde kullanılan çelik lif narinlik oranı (en / boy oranı) 80 olarak belirtilmiştir. Yapılan çalışmada tam ve kısmi çelik lif derinliğinin betonarme kirişlerin yapısal davranışına etkisi deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda lif oranı arttırıldığında tokluk seviyesinin ve sünekliğin arttığı gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra kısmi çelik lif derinliğine sahip betonarme kirişlerin tamamen çelik lif derinliğine sahip betonarme kirişlere göre daha yüksek eğilme kapasitesine ulaştığı tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan çalışma kapsamında bir takım teorik bağıntılar önerilmiştir.



3. MALZEME VE YÖNTEM

Sunulan çalışmada, çelik lifsiz ve farklı çelik lif hacimsel oranlarına sahip GFRP donatılı betonarme kirişlerin dört nokta yüklemesi altında davranışı incelenmiştir. Kirişlerin davranışlarının araştırılması amacıyla deneysel ve teorik olmak üzere iki farklı çalışma yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada, biri çelik lifsiz, ikisi %0.50 (40 kg/m³) hacimsel oranında çelik lif içeren ve diğer ikisi de %0.75 (60 kg/m³) hacimsel oranında çelik lif içeren olmak üzere toplam beş adet betonarme kiriş üretilmiştir. Üretilen çelik lifli betonarme kirişlerde 3D kanca ucuna sahip çelik lifler kullanılmıştır. Betonarme kirişlerin boyutları 150 mm×200 mm×2000 mm'dir. Hazırlanan betonarme kirişler dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuş ve deneysel davranış gözlenmiştir. Deneyler sonucunda betonarme kiriş numunelerinin yük taşıma kapasiteleri ve yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen verilerin ışığında, FRP donatıların ve çelik lif hacimsel oranının betonarme kirişlerin davranışı üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmada aşağıda belirtilen deney parametreleri dikkate alınmıştır.

3.1. Deneysel Çalışma

3.1.1. Malzemeler

Yapılan deneysel çalışma kapsamında, biri çelik lif içermeyen, diğer dört tanesi ise farklı çelik lif dozajlarına (40 kg/m³ ve 60 kg/m³) sahip toplam beş adet betonarme kiriş üretilmiştir. Üretilen betonarme kirişlerin boyutları 150 mm×200 mm×2000 mm olup mesnetten mesnete olan açıklık mesafesi 1700 mm'dir. Yapılan deneysel çalışmada, betonarme kirişlerin çekme donatıları Ø12 GFRP donatı ve basınç donatıları (montaj donatısı) Ø10 Çelik veya GFRP donatı olarak seçilmiştir.

3.1.1.1. Çimento

Tez çalışması kapsamında üretilen betonarme kirişlerin ve kirişlere ait silindir ve prizma numunelerin karışımında, Oyak Çimento firması tarafından TS EN 197-1 standardına uygun bir şekilde üretilen CEM I 42.5R sınıfı çimento kullanılmıştır (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. CEM I 42.5R sınıfı çimento

3.1.1.2. Agreg

Yapılan deneysel çalışmada üretilen kirişlerin beton karışımlarında elek cihazıyla elenerek farklı gradasyonlarda elde edilen ince ve kaba doğal agrega kullanılmıştır. (Şekil 3.2 ve Şekil 3.3.).



Şekil 3.2. Agregaların otomatik elek yardımıyla gradasyonlarına ayrılması



Şekil 3.3. Betonarme kirişlerin karışımlarında kullanılan malzemeler

3.1.1.3. Çelik Lif

Yapılan deneysel çalışmada, çelik lifli beton hazırlığında Bekaert firması tarafından üretilen Dramix RC 65/60 BN 3D kanca uçlu çelik lifler kullanılmıştır (Şekil 3.4.). Çelik lifli üretilen kirişlerde kullanılan çelik lifin mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 3.1.'de belirtilmiştir.



Şekil 3.4. Betonarme kiriş karışımında kullanılan 3D 65/60 çelik lif

Tablo 3.1. Çelik lifin mekanik ve fiziksel özellikleri

Çelik lif tipi	Çelik lif geometrisi	Kanca tipi	Narinlik oranı	Boy (l) (mm)	Çap (d) (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
3D 65/60		3D	65	60	0.90	1160	200000

3.1.1.4. Donatı

Kirişlerde kullanılan GFRP donatılar, cam fiberlerin vinil ester reçinesi içinde emprenye edilmesiyle hazırlanmıştır. Kirişlerin tamamında çekme donatısı olarak 2Ø12 GFRP donatı kullanılmıştır. B1, B2 ve B4 kirişlerinin basınç donatısı olarak 2Ø10 GFRP donatı kullanılırken, B3 ve B5 kirişlerinde ise basınç donatısı olarak 2Ø10 standart çelik donatı kullanılmıştır. Standart çelik donatı ve GFRP donatılarına ait mekanik özellikleri Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. GFRP ve elik donatıların mekanik zellikleri

Donatı	Donatı apı (mm)	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
GFRP-1	12	-	1100	50
GFRP-2	10	-	1100	50
elik	10	500	610	200

3.1.1.5. Kimyasal Katkı

Betonun işlenebilirliğini sağlamak amacıyla Sika Yapı Kimyasalları A.ř. firması tarafından üretilen Sika Viscocrete PC 15 süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.



şekil 3.5. Betonarme kiriş karışımında kullanılan akışkanlaştırıcı

3.1.1.6. Su

Betonarme kirişlerin ve numunelerin üretiminde, numunelere kr uygulanmasında, betonarme kirişlerin sulanmasında Adana ili şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Yapılan tez çalışması kapsamında, elik lif içermeyen ve farklı elik lif hacimsel oranlarına sahip GFRP donatılı beş adet betonarme kiriş üretilmiştir. Bu kirişlerden biri elik lif içermeyen, ikisi %0.50 elik lif hacimsel oranına sahip, diğer ikisi ise %0.75 elik lif hacimsel oranına sahip olarak üretilmiştir. Betonarme kirişlerin karışımında kullanılan malzemelerin karışım oranları Tablo 3.3.'te sunulmuştur.

Tablo 3.3. Betonarme kirişlerin karışım ağırlıkça değerleri (kg/m³)

Numune	Çakıl	Kum	Çimento	Su	Akışkanlaştırıcı	Çelik lif
B1	1050	820	400	150	5	0
B2	1050	810	400	150	5	40
B3	1050	810	400	150	5	40
B4	1050	800	400	150	5	60
B5	1050	800	400	150	5	60

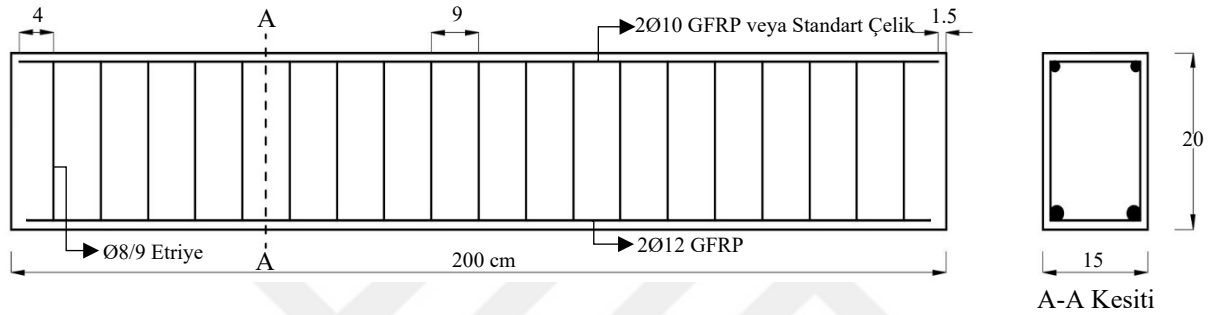
Üretilen kirişlerin boyutları 150mm x 200mm x 2000 mm olup, orta açıklık mesafesi 1700 mm'dir. Kirişlerin kesme açıklığı 65 cm olarak seçilmiştir. Bu durumda kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranı (a/d) 3.7 olarak belirlenmiştir. Üretilen kiriş numunelerinin isimleri ve içerikleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4. Kiriş numunelerinin isimleri ve içerikleri

Numune	Numune İçerikleri
B1	1.karışım, çelik lifsiz ve basınç bölgesi GFRP donatı
B2	2.karışım, 40 kg/m ³ dozajlı çelik lif ve basınç bölgesi GFRP donatı
B3	2.karışım, 40 kg/m ³ dozajlı çelik lif ve basınç bölgesi çelik donatı
B4	3.karışım, 60 kg/m ³ dozajlı çelik lif ve basınç bölgesi GFRP donatı
B5	3.karışım, 60 kg/m ³ dozajlı çelik lif ve basınç bölgesi çelik donatı

3.1.2.1. Donatının Hazırlanması

Yapılan tez çalışması kapsamında üretilen kirişler için çekme donatısı olarak 2Ø12 GFRP donatı ve basınç donatısı (montaj donatısı) olarak ise 2Ø10 GFRP donatı ya da 2Ø10 standart çelik donatı kullanılmıştır. Üretilen kirişler ACI 440-1R.15 rehberinde belirtilen durumlar dikkate alınarak denge üstü davranış sergileyecek şekilde tasarlanmıştır. Kirişlerin donatı konfigürasyonu Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Her bir kiriş için kullanılan çekme ve basınç donatılar ise Tablo 3.5'te yer almaktadır.



Şekil 3.6. Kirişlerin donatı konfigürasyonu (boyutlar cm cinsinden)

Tablo 3.5. Kiriş numunelerinin çekme ve basınç donatıları

Numune	Çekme Donatısı	Basınç Donatısı
B1	2Ø12 GFRP donatı	2Ø10 standart çelik donatı
B2	2Ø12 GFRP donatı	2Ø10 GFRP donatı
B3	2Ø12 GFRP donatı	2Ø10 standart çelik donatı
B4	2Ø12 GFRP donatı	2Ø10 GFRP donatı
B5	2Ø12 GFRP donatı	2Ø10 standart çelik donatı

Kirişlerde Ø8 çelik donatı ile hazırlanan etriyeler kullanılmış ve etriye boyutları 12×17cm olarak düzenlenmiştir. Etriye aralıkları ise standart ve yönetmeliklere uygun olarak 9 cm olarak tasarlanmıştır. Kirişin çekme bölgesinde GFRP donatı çubuğundaki birim deformasyonları ölçmek amacıyla donatı orta noktası üzerine gerinim ölçer yapıştırılmıştır. Kiriş donatıları paspayı ayarlanarak kalıp içerisine yerleştirilmiştir. Şekil 3.7. ve Şekil 3.8.'de donatı hazırlığı sunulmuştur.



Şekil 3.7. Donatıların hazırlanması



Şekil 3.8. Donatı hazırlığı

3.1.2.2. Donatı Gerinim Ölçerlerin Yapıştırılması

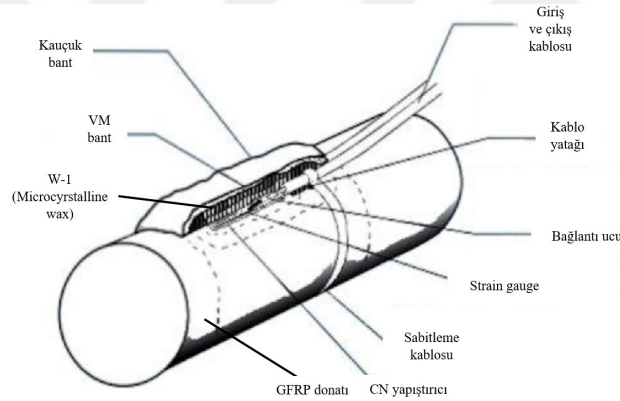
Çelik lifsiz ve çelik lifli betonarme kirişlerin üretimi yapılmadan önce GFRP çekme donatıları üzerine yapıştırılacak olan birim deformasyon ölçerler (Strain Gauge) ile ilgili bir uygulama yapılmıştır.

GFRP donatılarının üzerine Şekil 3.9’da gösterildiği gibi FLAB-5-11-3LJC-F tipi birim deformasyon ölçerler (Strain Gauge) yapıştırılmıştır. Birim deformasyon ölçerler yapıştırılırken su, nem ve yaş beton gibi dış etkenlerden zarar görmemesi için farklı kaplama malzemeleri kullanılarak çok katmanlı kaplama yöntemi uygulanmıştır. Bu katmanlar sırasıyla W-1 (Microcrystalline wax), VM bant (Buthyl bant) ve kendinden erime özelliğine sahip

kauçuk bant olacak şekilde uygulanmıştır. Şekil 3.10'da GFRP donatılara birim deformasyon ölçerler üzerine yapılan kaplama katmanları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.9. FLAB-5-11-3LJC-F tipi birim deformasyon ölçerler (Strain Gauge)



Şekil 3.10. Birim deformasyon ölçerler üzerine yapılan kaplama

Aşağıda her bir kiriş için GFRP çekme donatısı üzerine birim deformasyon ölçerler açıklık ortasına yerleştirilmiş olup birim deformasyon ölçerlerin yapıştırılması ve kaplanması işlemi maddeler halinde verilmiştir.

1. GFRP donatı yüzeyi su zımparası yardımıyla düzleştirilmiştir. (Şekil 3.11.(a))
2. GFRP donatı yüzeyi aseton kullanılarak temizlenmiştir. (Şekil 3.11.(b))
3. Düzleştirilen ve temizlenen GFRP donatı yüzeyine birim deformasyon ölçerler (Strain gauge) özel yapıştırıcısı ile yapıştırılmıştır. (Şekil 3.11.(c))
4. Kablo yatağı, VM bant kullanılarak hazırlanmıştır ve kablo sabitlenmiştir. (Şekil 3.11.(d))

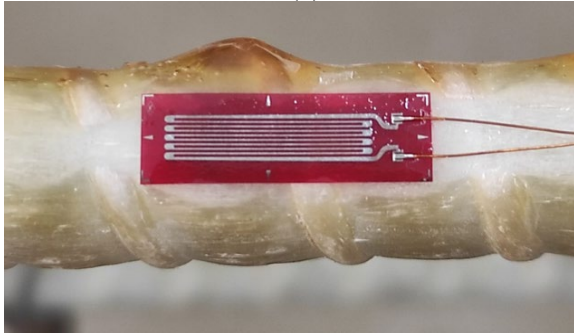
5. İlk kaplama katmanı olan W-1 (Microcrystalline wax) işlemi uygulanmıştır. (Şekil 3.11.(e))
6. Birim deformasyon ölçerlerin su, nem ve yağ beton gibi dış etkenlerden etkilenmemesi amacıyla VM bant (Buthyl bant) işlemi uygulanmıştır. (Şekil 3.11.(f))
7. Üçüncü kaplama katmanı olan kendinden eriyen kauçuk bant işlemi uygulanmıştır. (Şekil 3.11.(g))
8. Bu işlemlerin hepsi tamamlandıktan sonra devre kontrolü yapılmıştır. Devre kontrolü sonucunda birim deformasyon ölçerin üretildiği fabrikadaki değerle kaplama sonrasındaki değer (119-120 Ω) aynı olduğu için devre kontrolü sağlanmıştır. (Şekil 3.11.(h))



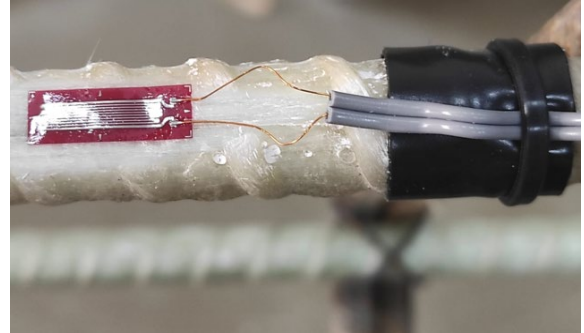
(a)



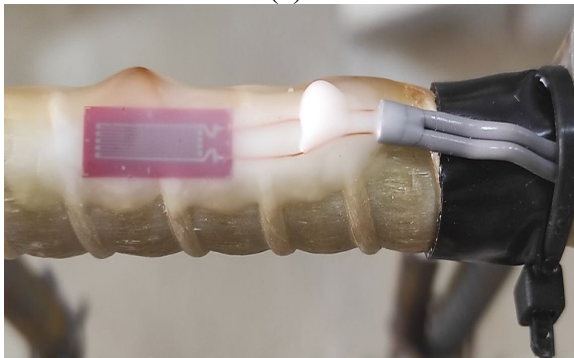
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Şekil 3.11. Birim deformasyon üzerine yapılan yapıştırma ve kaplama işlemi detayı

3.1.2.3. Kalıpların Hazırlanması

Beton dökümü işleminden önce betonarme kiriş kalıbı, silindir ve prizma kalıplar kurulmuştur. Her bir betonarme kiriş numunesi için üç adet silindir ve iki adet prizma kalıp hazırlanmıştır (Şekil 3.13.). Silindir kalıplar, 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğindedir. Prizma kalıpları ise 100×100 mm enkesitinde ve 500 mm uzunluğundadır. Donatı yerleştirilmesi öncesinde kalıplar temizlenmiş ve yağlanmıştır. Daha sonra donatılar kalıplara yerleştirilerek beton dökümüne hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.14.). Şekil 3.12.’de kiriş kalıpları gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Kiriş kalıplarının kurulması



(a) Silindir kalıp



(b) Prizma kalıp

Şekil 3.13. Silindir ve prizma kalıpların kurulması



Şekil 3.14. Donatıların kalıba yerleştirilmesi

3.1.2.4. Beton Dökümü

Betonarme kiriş numuneleri üretilmeden önce beton karışım hesapları yapılmıştır ve belirlenen miktarlarda kum, doğal agreg, çimento, çelik lif, akışkanlaştırıcı ve su hazırlanmıştır. Beton dökümü yapılmadan önce çelik lifler karışıma ait olan akışkanlaştırıcı ve bir miktar su ile bir kap içerisinde karıştırılarak çelik liflerin ayrışması sağlanmıştır. İlk olarak kum ve agreg beton mikserine eklenerek karıştırılmıştır (Şekil 3.15.(a)). Sonra su ve çimento azar azar eklenerek homojen bir karışım elde edilmiştir (Şekil 3.15.(b)). Daha sonra bu homojen karışımının içerisine çelik lifler ilave edilerek çelik liflerin homojen olarak dağılması sağlanana kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir (Şekil 3.15.(c-d)). Beton karışımı elde edildikten sonra karışım, kalıpların içerisine dökülmüştür (Şekil 3.15.(e)). Döküm esnasında her bir kiriş için karışımdan, betonun basınç dayanımı ve gerilme-birim deformasyon ilişkisinin belirlenmesi amacıyla üç adet silindir numune ve betonun çekme dayanımını belirlemek için iki adet prizma numunesi alınmıştır (Şekil 3.15.(f)). Beton karışımı, kalıpların içerisine döküldükten sonra donatıya zarar vermeyecek şekilde vibratör yardımıyla sıkıştırılmıştır (Şekil 3.15. (g)).

Kalıpların yanlarına çekiç yardımıyla hafif bir şekilde vurularak beton karışımının kalıp içerisine yerleşmesi sağlanmıştır (Şekil 3.15. (h)). Son olarak beton yüzeyi masterlanarak numunelerin üst kısmında düz yüzey elde edilmiştir (Şekil 3.15. (ı)). Beton iki gün prizini aldıktan sonra kalıplardan çıkarılmıştır (Şekil 3.15.(i)). Silindir ve prizma numuneleri, kalıplardan çıkarıldıktan sonra 45 gün kür havuzuna koyularak beton basınç testine, kiriş numuneleri ise günde 2 defa sulanarak 4 nokta eğilme deneyine hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.15.(j)).



(a) Kum ve çakılın eklenip karıştırılması



(b) Su ve çimentonun eklenip karıştırılması



(c) Çelik lifin eklenmesi



(d) Homojen karışımın elde edilmesi



(e) Betonun kalıba dökülmesi



(f) Silindir ve prizma numunelerinin alınması



(g) Betonun vibratörle sıkıştırılması



(h) Betonun yerleştirilmesi



(i) Beton yüzeyinin masterlanıp numunelerin isimlendirilmesi



(i) Silindir ve prizma numunelerin kür edilmesi görünümü



(j) Kiriş numunelerinin kalıptan çıkarılıp sulanması

Şekil 3.15. Beton dökümü aşamaları

3.1.3. Deneyin Uygulanışı

3.1.3.1. Beton Basınç Dayanımı

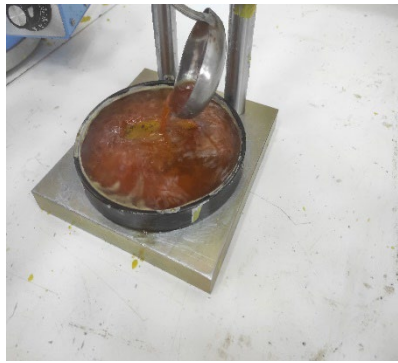
TS EN 12390-2 standardına uygun bir şekilde hazırlanan numuneler, TS EN 12390-3 standardına uygun olarak basınç dayanımları tespit edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada kür havuzunda tutulan silindir beton numuneler, kür havuzundan çıkarılarak kurutma işlemi yapılmıştır. Numuneler kurutulduktan sonra, yükün üniform bir şekilde yayılabilmesi amacıyla silindir numunelerin üst kısımlarına kükürt başlık yapılarak üst yüzeyleri düz ve pürüzsüz hale getirilmiştir. Kükürt başlık işleminde ilk olarak eritme potası içerisine kükürt ve parafin eklenerek bir karışım oluşturulmuş ve karışım eritilmiştir (Şekil 3.16.(a)). Daha sonra eritilen karışım başlıklama plakası içerisine dökülerek silindir numunelere uygulanmıştır (Şekil 3.16.(b-c)). Kükürt başlık yapılan silindir numuneler basınç deney cihazına yerleştirilerek numunelere tek eksenli olarak sabit yük uygulanmıştır. Aynı zamanda silindir numunelerde kısaltmaları belirlemek amacıyla dijital komparatör saati kullanılmıştır. Beton basınç dayanımı, uygulanan maksimum yükün silindir numunenin kesit alanına bölünmesiyle hesaplanmıştır (Denklem 3.1). Şekil 3.17’de tez çalışması kapsamında üretilen kirişlere uygulanan basınç deney testi gösterilmiştir.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

burada σ beton basınç dayanımını, P uygulanan maksimum yükü A ise silindir numunenin kesit alanını ifade etmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.16. Silindir numunelere uygulanan kükürt başlık işlem aşamaları



Şekil 3.17. Silindir numunelere basınç deneyi uygulanması

3.1.3.2. Beton Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi

Betonun çekme dayanımının tespit edilebilmesi amacıyla TS EN 12390-2 standardına uygun olarak üretilen 100×100×500 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler kür havuzunda bekletilmiştir. Numunelerin eğilmede çekme dayanımları TS EN 12390-5 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Eğilmede çekme dayanım testi öncesi prizma numuneler kür havuzundan çıkartılarak kurutma işlemi yapılmıştır. Daha sonra numuneler deney cihazına yerleştirilmiştir. Deney cihazına yerleştirilen numunelere sabit yük uygulanarak kırılma yükü ve kırılma biçimi tespit edilmiştir (Şekil 3.18.). Denklem 3.2. kullanılarak betonun eğilmede çekme dayanımı, Denklem 3.3. kullanılarak betonun çekme dayanımı hesaplanmıştır.

$$f_{ctf} = \frac{FL}{d_1 d_2^2} \quad (3.2)$$

$$f_{ctk} = \frac{f_{ctf}}{2} \quad (3.3)$$

denklemlerde f_{ctf} betonun eğilmede çekme dayanımını, F eğilmede ulaşılan maksimum yükü, L mesnetler arası açıklığı, d_1 prizma numune genişliğini, d_2 prizma numune yüksekliğini, f_{ctk} ise betonun çekme dayanımını ifade etmektedir.



(a)

(b)

Şekil 3.18. Prizma numunelere eğilmede çekme deneyi uygulanması

3.1.3.3. Kiriş Eğilme Deneyi

Tez çalışması kapsamında hazırlanan çelik lifsiz ve çelik lifli GFRP donatılı betonarme kiriş numunelerinin taşıma gücünün ve yük-deplasman davranışının tayin edilebilmesi için Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Yapı Laboratuvarı'nda bulunan test cihazı ile kirişlere dört nokta yükleme altında eğilme deneyi uygulanmıştır. Çelik lifli ve çelik lifsiz GFRP donatılı betonarme kiriş numunelerinin dört nokta yükleme eğilme testleri, Alşa Laboratuvar Cihazları Ltd. Şti. firması tarafından üretilen 500 kN kapasiteye sahip eğilme test cihazı ile yapılmıştır. Cihazdan uygulanan yük çelik kiriş ve çelik silindir aparatları ile test edilen kiriş numunesine iki noktada aktarılmıştır (Şekil 3.9 ve Şekil 3.20) Deneylerde uygulanan yükü ölçmek için Tokyo Measuring Instruments Lab. firması tarafından üretilen 500 kN kapasiteli bir adet yük ölçer (load cell) kullanılmıştır. Deney esnasında, uygulanan yüke karşılık gelen deplasmanların tayini için Tokyo Measuring Instruments Lab. firması tarafından üretilen 50 mm kapasiteli 5 adet deplasman ölçer (LVDT) kullanılmıştır. Ayrıca, beton basınç bölgesinde oluşan birim kısaltmaları ve GFRP donatıda oluşan birim uzamaların belirlenmesi amacıyla Tokyo Measuring Instruments Lab. firması tarafından üretilen FLAB-5-11-3LJC-F ve PL-60-11 tipinde gerinim ölçerler (strain gauge) kullanılmıştır. Deney esnasında uygulanan yük, karşılık gelen deplasman ve şekil değiştirmeleri kaydetmek için Tokyo Measuring Instruments Lab. firması tarafından üretilen TDS-540 model veri toplayıcı (data logger) kullanılmıştır. Deney sırasında oluşan yük ve karşılık gelen deplasmanlar ve şekil değiştirmeler kurulan elektronik data toplama sistemi ile zamana bağlı olarak bilgisayara kaydedilmiştir. Bunlara ek olarak, kirişlerde oluşan yapısal davranışın gözlenmesi amacıyla deneylerde bir adet kamera kullanılmıştır. Son olarak test edilen kirişlere ait yük ve uygulanan yüke karşılık gelen deplasman ve şekil değiştirme verileri elde edilmiş ve betonarme kiriş numunelerin yük-açıklık

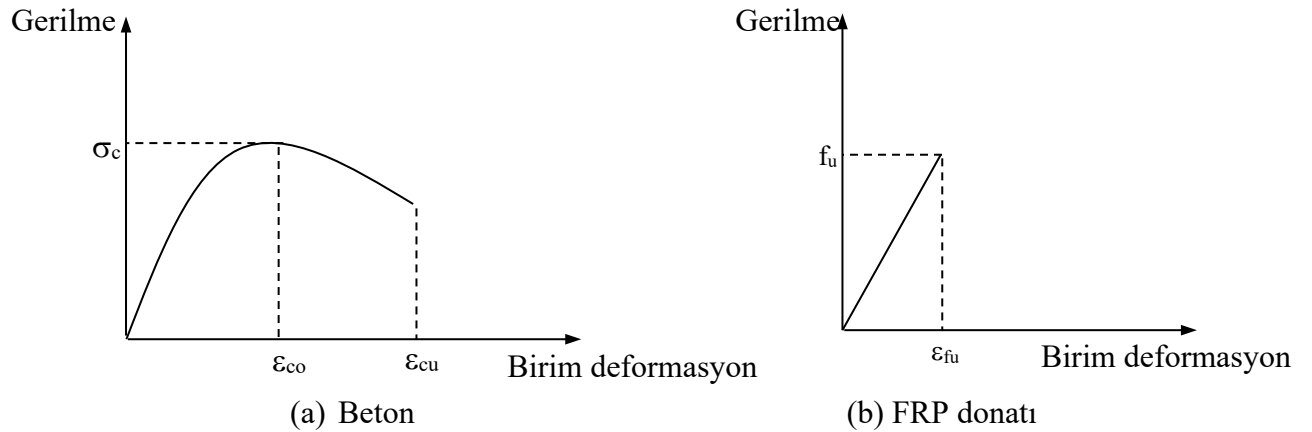
elik lifli kirişlerin analizi için literatürde farklı yöntemler önerilse de tez çalışması kapsamında ACI 440-1R.15 rehberinde belirtilen yaklaşımlar dikkate alınmıştır. Yapılan tez çalışmasında, elik lifsiz ve elik lifli FRP donatılı kirişlerin taşıma gücü ve yük-deplasman analizi için bir yöntem önerilmiştir. Yöntemde malzemeler için doğrusal olmayan gerilme-birim deformasyon özellikleri dikkate alınmıştır.

3.2.1. Yöntemde Kabul Edilen Varsayımlar

- 1) Eğilmeden önce düzlem olan kesitler eğilmeden sonra da düzlem kalır (Bernoulli-Navier hipotezi).
- 2) Beton için gerçek gerilme-birim deformasyon modeli kullanılmaktadır.
- 3) Betonun ekme dayanımına katkısı ihmal edilmiştir.
- 4) Beton ile FRP donatı arasında tam aderans olduğu kabul edilmiştir.

3.2.2. Beton ve FRP Donatı İçin Kabul Edilen Gerilme-Birim Deformasyon Modeli

Analizde, kirişlerin basınç bölgesi için betonun doğrusal olmayan davranış dikkate alınmaktadır. FRP donatısı için ise doğrusal elastik davranış kabul edilmiştir. Beton ve FRP donatı davranışını temsil eden gerilme-birim deformasyon eğrisi Şekil 3.21’de sunulmuştur.

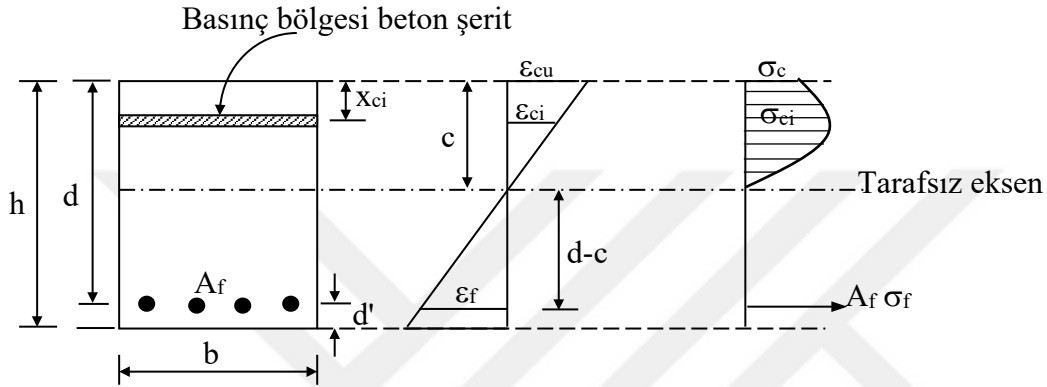


Şekil 3.21. Beton ve FRP donatı gerilme-birim deformasyon modelleri

Kirişlerin analizinde, betonun gerilme-birim deformasyon modeli kiriş beton basınç bölgesine yansıtılmaktadır. Böylece kiriş numune basınç bölgesi beton bileşke kuvveti gerçek gerilme-birim deformasyon modeli kullanılarak elde edilmektedir.

3.2.3. Yöntemin Formülasyonu

Dikdörtgen kiriş kesiti Şekil 3.22’de görülmektedir. Teorik yöntemde betonun doğrusal olmayan davranışı esas alındığından kiriş beton basınç bölgesi şeritlere bölünmektedir. Şeritler tarafsız eksen konumuna paralel olarak oluşturulmakta ve şeritlerin alan ve ağırlık merkezi hesaplanmaktadır. Eğilmeden önce düzlem olan kesitlerin eğilmeden sonra da düzlem kaldığı varsayımı ile her bir şeritin birim deformasyon değeri elde edilmektedir.



Şekil 3.22. Kiriş birim deformasyon ve gerilme dağılımı

Beton şerit ve FRP donatı için birim deformasyonlar tarafsız eksen konumuna (c) bağlı olarak aşağıda verilen Denklem 3.4 ile ifade edilmiştir.

$$\varepsilon_{ci} = \varepsilon_{cu} \frac{c - x_{ci}}{c}, \quad \varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{d - c}{c} \quad (3.4)$$

burada ε_{ci} her bir şeritin ağırlık merkezindeki birim deformasyon değerini, ε_{cu} betonun kabul edilen maksimum birim şekil değiştirmesini, c tarafsız eksen derinliğini, x_{ci} basınç bölgesindeki beton şeritin ağırlık merkezinin basınç bölgesi en dış life olan dik uzaklığını, d ise faydalı yüksekliği ifade etmektedir.

Denklem 3.4. yardımıyla her bir şeritin ağırlık merkezinde beton birim deformasyon değeri (ε_{ci}) belirlenmektedir. Böylece beton için seçilen gerilme-birim deformasyon modelinden her bir beton şeritin ağırlık merkezinde gerilme değeri (σ_{ci}) hesaplanmaktadır. FRP donatı için de Denklem 3.4 ile çelik birim deformasyon değeri (ε_f) bulunarak FRP donatı gerilme-birim deformasyon modelinden FRP donatı gerilmesi (σ_f) belirlenmektedir.

3.2.4. Analiz denge denklemleri

FRP donatılı çelik lifli ve lifsiz kiriş analizinde ilk olarak tarafsız eksenini tanımlayan parametre (c) için bir kabul yapılır. Betonun gerçek davranışını hesaplara yansıtmak için kiriş beton basınç bölgesi istenilen sayıda şerite bölünmektedir. Şeritlerin alanı (A_{ci}) ve ağırlık merkezi (x_{ci}) değerleri hesaplanmaktadır. Daha sonra beton şeritlerin ve FRP donatının birim deformasyon değeri belirlenerek her bir malzemenin gerilme-birim deformasyon modelinden şeritlerin ve FRP donatının gerilme değerleri hesaplanmaktadır. Kuvvet denge denklemi oluşturularak hesaplanan değerler yerine yazılır (Denklem 3.5). Kuvvet denge denkleminin belirli bir yakınsama değerini ($\chi < 0.01$) sağlaması beklenir. Kuvvet denge denkleminin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Denklem sağlanmıyorsa sağlanana kadar tarafsız eksen konumu (c) değiştirilir ve işlemler tekrarlanır. Yakınsama kriteri sağlanana kadar iterasyona devam edilir.

$$N = \sum_{i=1}^n A_{ci} \sigma_{ci} - A_f \sigma_f \quad (3.5)$$

denklemde N kuvvet denge denklemi eşitini, A_{ci} her bir şeritin alanını, σ_{ci} beton şeritin ağırlık merkezinde oluşan gerilme değerini, A_f FRP donatı alanını, σ_f ise FRP donatı gerilmesini ifade etmektedir.

Tarafsız eksen konumu belirlendikten sonra kesitin ağırlık merkezine göre moment alınarak kesitin taşıma gücü momenti Denklem 3.6'daki ifade ile bulunur.

$$M = \sum_{i=1}^n A_{ci} \sigma_{ci} \left(\frac{h}{2} - x_{ci} \right) - A_f \sigma_f \left(\frac{h}{2} - d' \right) \quad (3.6)$$

burada M momenti, h kesit yüksekliğini d' ise paspayını ifade etmektedir.

3.2.5. Kiriş deplasmanı hesabı

Çelik lifli FRP donatılı betonarme kirişlerin eğilme etkisi altında teorik davranışını inceleyen birtakım modeller literatürde bulunmaktadır. Literatürde bulunan bu modeller kullanılarak kirişlerin eğilme etkisi altında yük-deplasman eğrileri çizilebilmektedir.

Çelik lifli FRP donatılı betonarme kiriş elemanlarında oluşan deplasmanların teorik olarak elde edilebilmesi için ACI (2015) ve Bischoff (2005) tarafından önerilen yaklaşımlarda dikkate alınmıştır.

FRP donatılı kirişlerde meydana gelen çatlama momenti Denklem 3.7’de gösterilmiştir.

$$M_{cr} = \frac{0.62\lambda\sqrt{f'_c}I_g}{y_t} \quad (3.7)$$

denklemde M_{cr} çatlama momentini, λ betonun modifikasyon faktörünü, f'_c beton basınç dayanımını, I_g brüt kesit atalet momentini, y_t ise kesit merkezinden çekme bölgesi dış yüzeyine olan mesafeyi ifade etmektedir. Brüt atalet momenti (I_g) Denklem 3.8’de gösterilmiştir.

$$I_g = \frac{bh^3}{12} \quad (3.8)$$

burada b kesit genişliği, h ise kesit yüksekliğini ifade etmektedir. Dört nokta eğilme deneyinde çatlama momentine karşılık gelen kırılma yükü (P_{cr}) Denklem 3.9’da gösterilmiştir.

$$P_{cr} = \frac{M_{cr}}{a} \quad (3.9)$$

denklemde yer alan a kesme açıklığını ifade etmektedir. Burada kırılma yükü, betonarme elemandaki ilk çatlak yüküne karşılık gelmektedir. Dört nokta yüklemesi için ilk çatlak yüküne karşılık gelen deplasman ifadesi Denklem 3.10’da gösterilmiştir.

$$\Delta_{cr} = \frac{P_{cr}a(3L^2 - 4a^2)}{48E_cI_g} \quad (3.10)$$

burada Δ_{cr} çatlama yüküne karşılık gelen deplasmanı, E_c beton elastisite modülünü ifade etmektedir. FRP donatıların elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranı (n_f), Denklem 3,11’de gösterilmiştir.

$$\eta_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{E_f}{4700\sqrt{f'_c}} \quad (3.11)$$

denklemde η_f FRP donatıların elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranını, E_f FRP donatı elastisite modülünü ifade etmektedir. Tarafsız eksen derinliğinin donatı derinliğine olan oranı, Denklem 3.12’de gösterilmiştir.

$$k = \sqrt{2\rho_f\eta_f + (\rho_f\eta_f)^2} - \rho_f\eta_f \quad (3.12)$$

denklemde k tarafsız eksen derinliğinin donatı derinliğine olan oranını, ρ_f çekme donatısı oranını ifade etmektedir. Çatlamış kesite yönelik dönüştürülmüş atalet momenti, Denklem 3.13’te gösterilmiştir.

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3}k^3 + \eta_f A_f d^2 (1-k)^2 \quad (3.13)$$

burada I_{cr} çatlamış kesit atalet momentini ifade etmektedir. Sunulan çalışma kapsamında, ilk çatlak yükünden sonra maksimum çatlak yüküne ulaşıncaya kadar oluşan deplasmanların hesaplanmasında kullanılacak olan etkili atalet momenti Bischoff tarafından önerilen model olarak ele alınmıştır. Söz konusu etkili atalet momenti ifadesi Denklem 3.14’te sunulmuştur.

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \eta \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2} \leq I_g, \eta = 1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \quad (3.14)$$

burada I_e etkin atalet momentini ifade etmektedir. Çatlama sonrasında kırılma yüküne kadar geçen süreçte meydana gelen deplasman değerlerini veren ifade, dört nokta eğilme deneyi için, Denklem 3.15’te sunulmuştur.

$$\Delta = \frac{Pa(3L^2 - 4a^2)}{48E_c I_e} \quad (3.15)$$

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında test edilen çelik lifli ve çelik lifsiz GFRP donatılı betonarme kirişlerin davranışları incelenmiştir. Test edilen kirişlerin analizi sonucu elde edilen taşıma gücü değerleri ve yük-deplasman eğrileri deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

4.1. Deneysel Bulgular

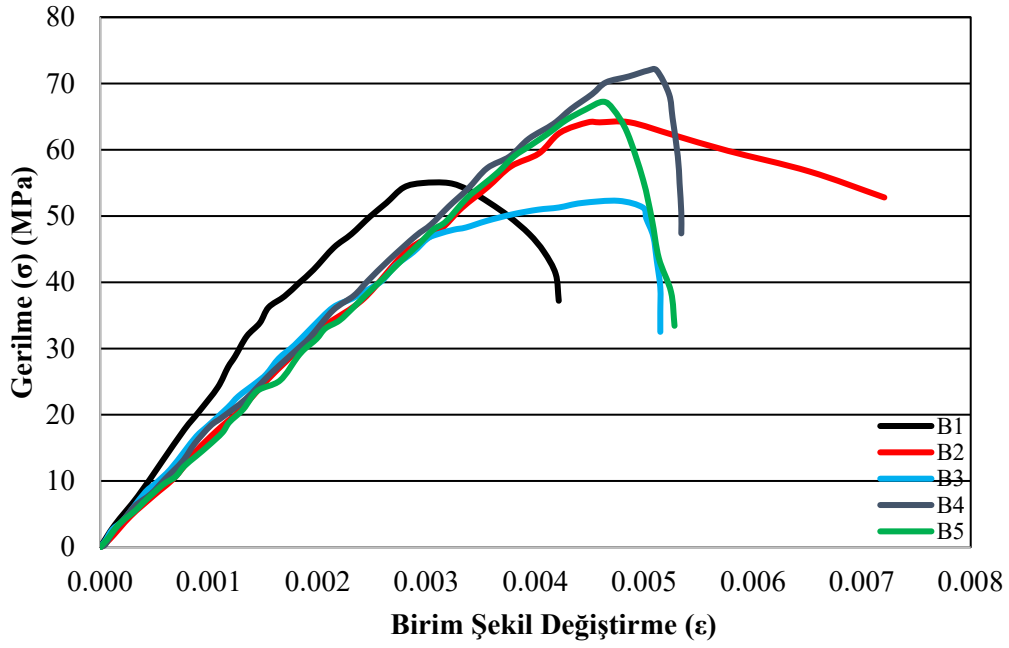
4.1.1. Silindir Numune Deneyleri

Hazırlanan çelik lifli ve çelik lifsiz GFRP donatılı betonarme kirişlerin beton basınç dayanımının ve gerilme-birim deformasyon eğrilerinin belirlenmesi amacıyla silindir beton numunelere tek eksenli basınç deneyi uygulanmıştır. Silindir numunelere basınç deneyi uygulanırken oluşan kısalmaların belirlenmesi için dijital komparatör kullanılmıştır. Yapılan deneylerde yük ve deplasman değerlerinin okunması ve çatlak oluşumlarının kayıt altına alınması için iki adet kamera kullanılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda silindir numunelerden alınan yük ve deplasman değerleri kullanılarak betonun gerilme-birim deformasyon eğrileri oluşturulmuştur. Silindir numunelerin basınç deneyi sonucunda elde edilen ortalama basınç dayanımları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Silindir numunelerin basınç dayanımı değerleri

Numune	Ortalama Basınç Dayanımı (f_c') (MPa)
B1	56.80
B2	66.98
B3	55.76
B4	72.12
B5	67.11

Kiriş numunelere ait silindir numunelerin basınç deneyi sonucunda elde edilen gerilme (σ)-birim deformasyon (ϵ) eğrileri Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Silindir numunelere ait gerilme (σ)-birim şekil değiştirme (ϵ) eğrileri

Şekil 4.1’de verilen σ - ϵ eğrileri incelendiğinde, beton numunelerinde çelik lif miktarının artmasıyla beton dayanımında bir miktar artışın meydana geldiği, betonun süneklik kapasitesinde ise önemli düzeyde artış sağlandığı sonucuna varılmıştır. Bunun yanı sıra çelik lifin çatlak genişliğini sınırladığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.2’de silindir beton numunelerinin tek eksenli basınç testine maruz kaldıktan sonraki durumu gösterilmiştir.



(a) B1 kirişine ait silindir numunelerin tek eksenli basınç testi sonrası durumu



(b) B2 kirişine ait silindir numunelerin tek eksenli basınç testi sonrası durumu



(c) B3 kirişine ait silindir numunelerin tek eksenli basınç testi sonrası durumu



(ç) B4 kirişine ait silindir numunelerin tek eksenli basınç testi sonrası durumu



(d) B5 kirişine ait silindir numunelerin tek eksenli basınç testi sonrası durumu

Şekil 4.2. Silindir numunelerinin tek eksenli basınç testine maruz kaldıktan sonraki durumları

4.1.2. Prizma Numune Deneyleri

Yapılan tez çalışması kapsamında üretilen çelik lifli ve çelik lifsiz GFRP donatılı betonarme kirişlerin beton çekme dayanımının belirlenmesi için kirişlere ait olan prizma beton numunelere dört nokta yükleme eğilme testi uygulanmıştır. Yapılan deneylerde yük değerlerinin okunması ve çatlak oluşumlarının kayıt altına alınması amacıyla iki adet kamera kullanılmıştır. Alınan yük değerlerinden Denklem (3.2) ve Denklem (3.3) yardımıyla eğilmede çekme dayanımları hesaplanmıştır. Prizma numunelerin ortalama eğilmede çekme dayanımları Tablo 4.2’de verilmiştir.

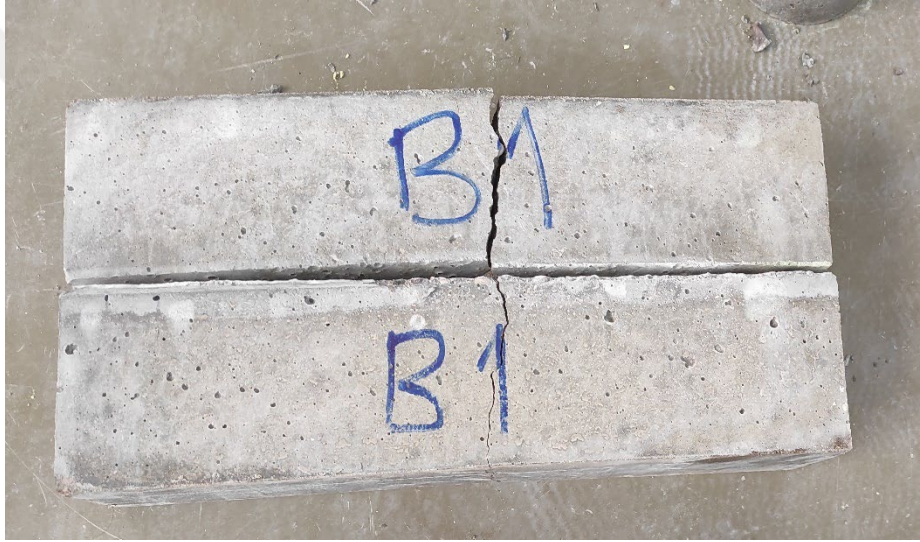
Tablo 4.2. Prizma numunelerin çekme dayanımı değerleri

Numune Adı	Ortalama Eğilmede Çekme Dayanımı (f_{ctf}) (MPa)	Ortalama Çekme Dayanımı (f_{ctk}) (MPa)
B1	6.15	3.08
B2	8.35	4.18
B3	8.33	4.17
B4	15.75	7.88
B5	10.54	5.27

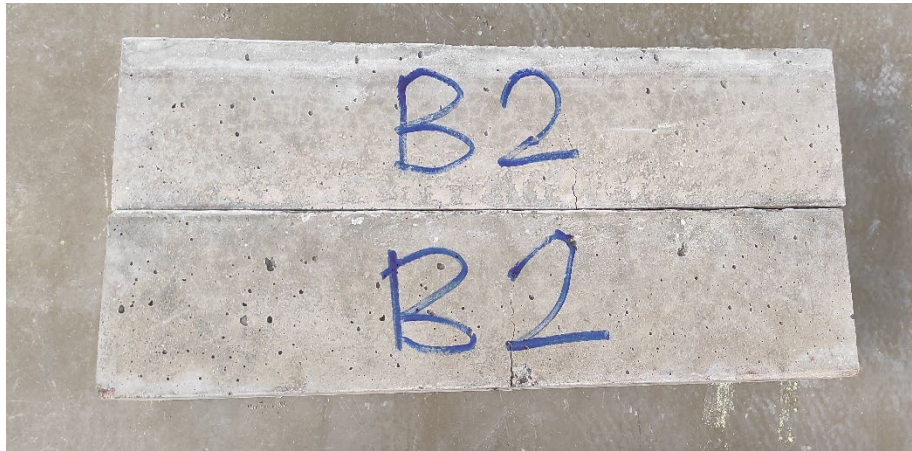
Betonun basınç dayanımının yüksek, çekme dayanımının ise çok düşük olduğu bilinmektedir. Yapılan çalışmada beton dayanımı için elde edilen ve Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de sunulan sonuçlar söz konusu bilgiyi doğrular nitelikte elde edilmiştir. Tablo 4.2 incelendiğinde, çelik lif

hacimsel oranının arttırılmasıyla birlikte betonun eğilmede çekme dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Böylece, çelik lifin beton çekme dayanımı üzerinde olumlu bir katkı sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Prizma numunelerin kırılma biçimleri incelendiğinde, sadece çelik lif bulundurulmayan B1 kirişine ait prizma numunelerinde ortadan ikiye kırılmanın meydana geldiği, çelik lif bulundurulmuş diğer numunelerde ise ana çatlağın bir miktar genişlediği ancak çelik liflerin etkisiyle ortadan ikiye kırılmanın oluşmadığı gözlemlenmiştir. Böylece, çelik lifin çatlak oluşumu ve çatlak genişliği üzerinde olumlu bir katkı sağladığı sonucuna varılmıştır. Şekil 4.3'te prizma numunelerinin kırılma biçimleri gösterilmiştir.



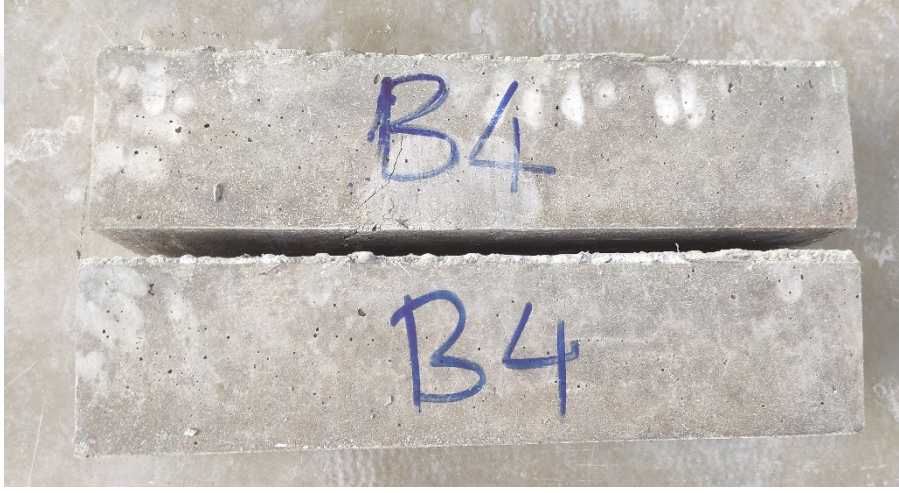
(a) B1 kirişine ait prizma numunelerin eğilmede çekme testi sonrası durumu



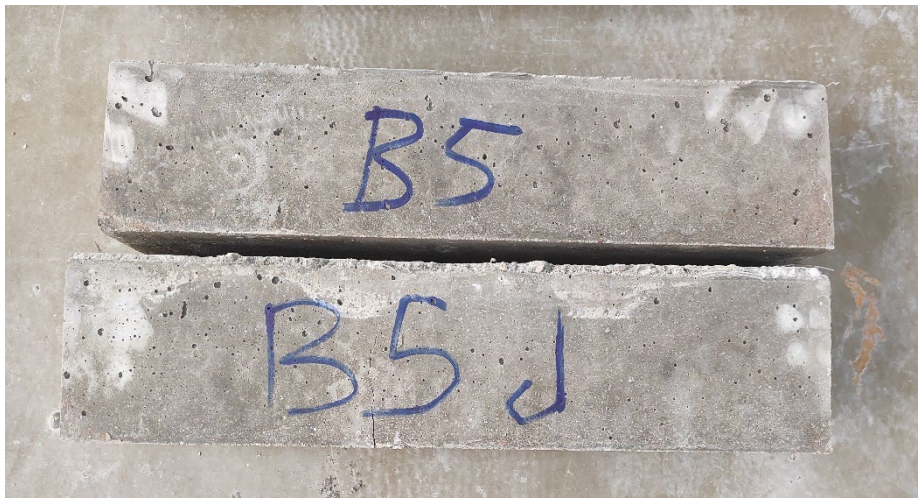
(b) B2 kirişine ait prizma numunelerin eğilmede çekme testi sonrası durumu



(c) B3 kirişine ait prizma numunelerin eğilmede çekme testi sonrası durumu



(ç) B4 kirişine ait prizma numunelerin eğilmede çekme testi sonrası durumu



(d) B5 kirişine ait prizma numunelerin eğilmede çekme testi sonrası durumu

Şekil 4.3. Prizma numunelerinin eğilmede çekme testine maruz kaldıktan sonraki durumları

4.1.3. Kiriş Deneyleri

Yapılan tez çalışması kapsamında; çelik lifsiz ve farklı çelik lif hacimsel oranlara sahip GFRP donatılı, 150×200×2000 mm boyutlarında üretilen beş adet kiriş numunesi dört nokta yüklemesi altında test edilmiştir. Yapılan deney sonucunda kirişlerde meydana gelen davranış aşağıda verilmiştir.

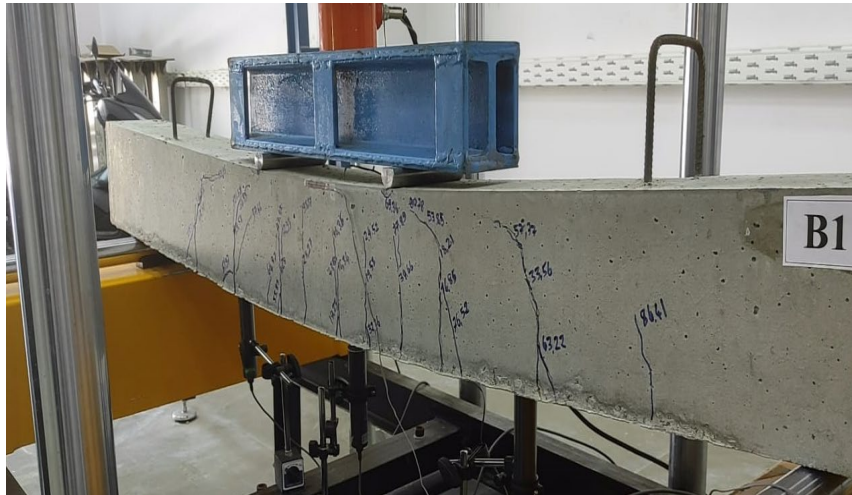
4.1.3.1. B1 Kirişi

Dört nokta eğilme deneyinde kullanılacak olan yükleme ve okuma cihazlarının deney düzeneğine uygun olarak yerleştirilecekleri konumlar belirlenmiştir. Yapılan ölçüm sonucunda belirlenen konumlara göre cihazlar (yük ölçer, deplasman ölçer, gerinim ölçer) yerleştirilerek deney düzeneği kurulmuş ve deneye başlanmıştır (Şekil 4.4(a)). Deney süresince B1 kirişine yüklemeler yapılarak gerekli yük değerleri, deplasman değerleri, çatlak oluşumları ve kırılma biçimleri izlenmiş ve video ile kaydedilmiştir. Bu yüklemeler sonucunda B1 kirişinde 6.28 kN yük değerinde ilk çatlağın kılcal düzeyde eğilme çatlağı olarak meydana geldiği görülmüştür. İlk çatlağın meydana geldiği aşamada kiriş açıklık ortasında 0.44 mm deplasman tespit edilmiştir. Kirişte 12.98 kN yük değerinde aynı eğilme çatlağının kılcal düzeyde ilerlediği, 16.34 kN yük değerinde ise ilk eğilme çatlağının simetrisinde kılcal düzeyde yeni bir eğilme çatlağı oluştuğu görülmüştür. Deneyin 16.85 kN yük değerinde eğilme çatlaklarının arttığı ve kılcal düzeyde yayıldığı, 19.23 kN yük değerinde çatlakların kollara ayrılmaya başladığı, 28.27 kN yük değerinde ise eğilme çatlaklarının genişlediği tespit edilmiştir. Kirişin 30.66 kN yük değerinde eğilme bölgesinde oluşan ilk çatlağın diğer mevcut eğilme çatlaklarına kıyasla daha fazla ilerlediği belirlenmiştir (Şekil 4.4(b)). Deneyde 33.56 kN yük değerinde mesnete yakın bölgede ilk kesme çatlağının oluştuğu ve kılcal düzeyde olduğu görülmüştür. Buna ek olarak, eğilme bölgesindeki çatlakların genişlediği ve çatlaklarda kollara ayrılmanın devam ettiği gözlemlenmiştir. Bu aşamadan sonra, 34.58 kN yük değerinde kirişte ilk oluşan kesme çatlağının simetrisinde kılcal düzeyde yeni bir kesme çatlağının oluştuğu görülmüştür. Yapılan deneyde, 40.55 kN yük değerinde mevcut çatlakların ilerlemeye devam ettiği ve simetrik olarak dağıldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.4(b)). Deneyin, 51.97 kN yük değerinde eğilme çatlaklarının belirginleşmeye başladığı ve 57.77 kN yük değerinde mevcut kesme çatlaklarının kılcal düzeyde ilerlediği tespit edilmiştir. Test edilen kirişin 63.22 kN yük değerinde kesme çatlaklarında ilk kollara ayrılmanın meydana geldiği, 66.97 kN yük değerinde ise yeni kılcal düzeyde eğilme çatlaklarının oluştuğu, ayrıca mevcut eğilme ve kesme çatlaklarının

genişleyerek yükleme bölgesine doğru ilerlediği tespit edilmiştir. B1 kiriş deneyinde, 69.36 kN yük değerine ulaşıldığında basınç bölgesinde betonda ezilmelerin başladığı, 86.41 kN yük düzeyinde kesme çatlaklarının kılcal biçimde oluşmaya devam ettiği, eğilme çatlaklarının daha fazla genişlediği görülmüştür. Yapılan deneyde, 97.66 kN yük değerinde kirişin basınç bölgesinde betonda daha fazla ezilmelerin meydana geldiği ve kirişin taşıma gücü kapasitesine ulaştığı tespit edilmiş ve bu aşamada deney sonlandırılmıştır. Deney sonucunda taşıma gücü anında 44.61 mm deplasman olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, beton basınç birim deformasyon değerinin (ϵ_{cu}) 0.003'ü aştığı belirlenmiştir. B1 kirişinin deney öncesi ve deney sonrası görünümü Şekil 4.4'te verilmiştir.



(a) B1 kirişinin kırılmadan önceki durumu

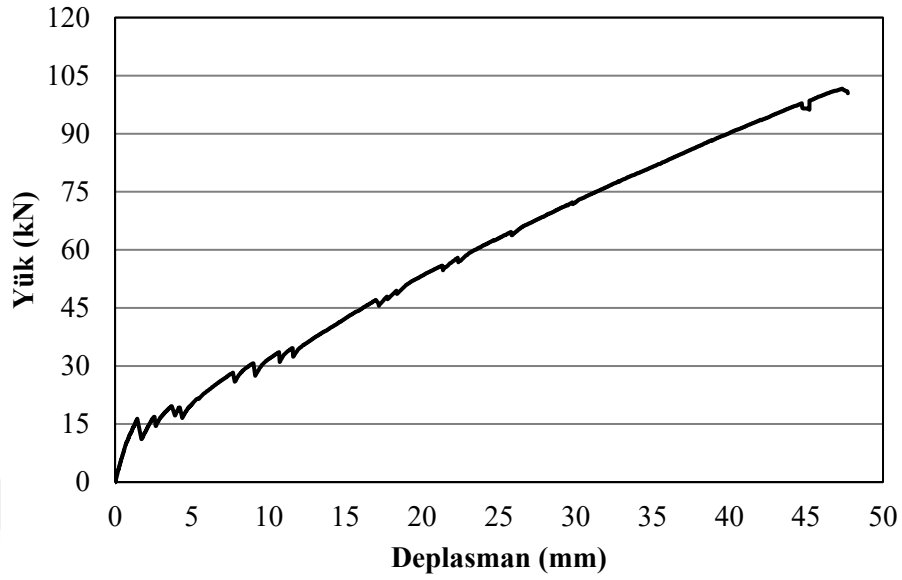


(b) B1 kirişinin kırıldıktan sonraki durumu

Şekil 4.4. B1 kirişi dört nokta eğilme deneyi

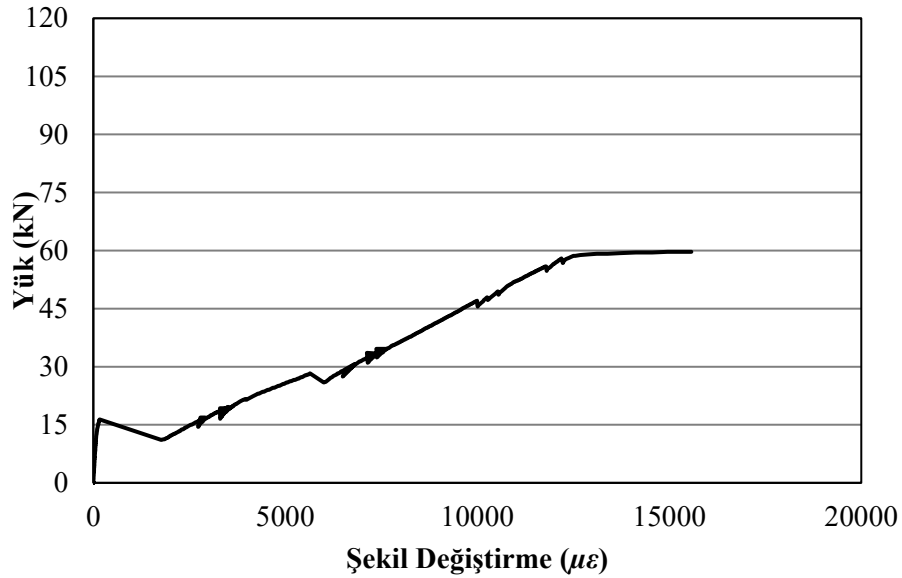
B1 kirişi testinde zamana bağlı olarak okunan yük ve karşılık gelen kiriş orta noktası deplasman

değerleri ile oluşturulan deneysel yük-deplasman eğrisi Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5. B1 kirişi yük-deplasman eğrisi

B1 kirişine uygulanan yük ve karşılık gelen GFRP donatı birim şekil değiştirme değerleri ile elde edilen deneysel yük-birim şekil değiştirme grafiği Şekil 4.6'da sunulmuştur.

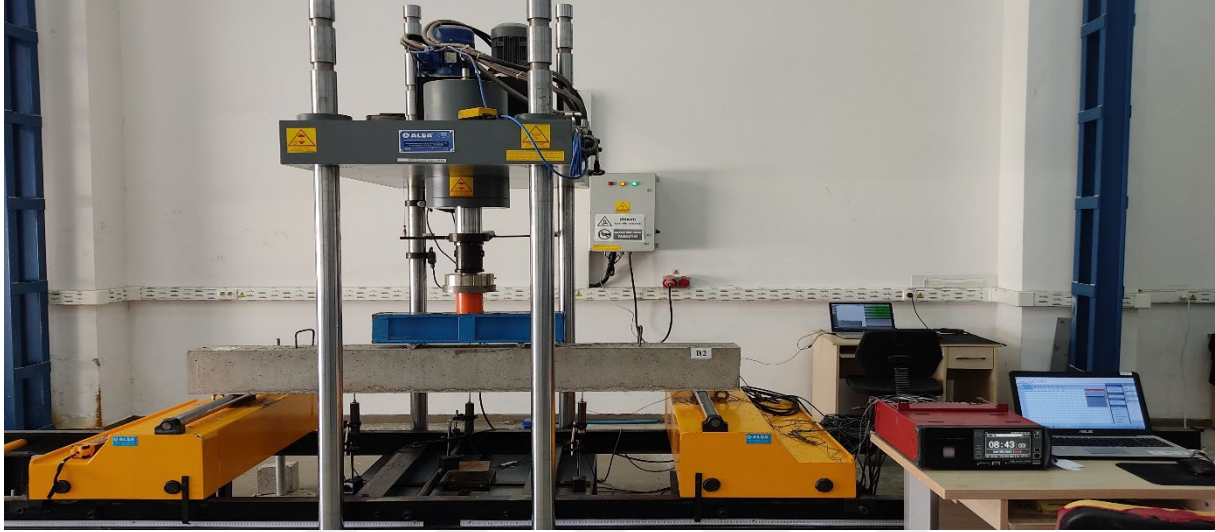


Şekil 4.6. B1 kirişi yük-şekil değiştirme eğrisi

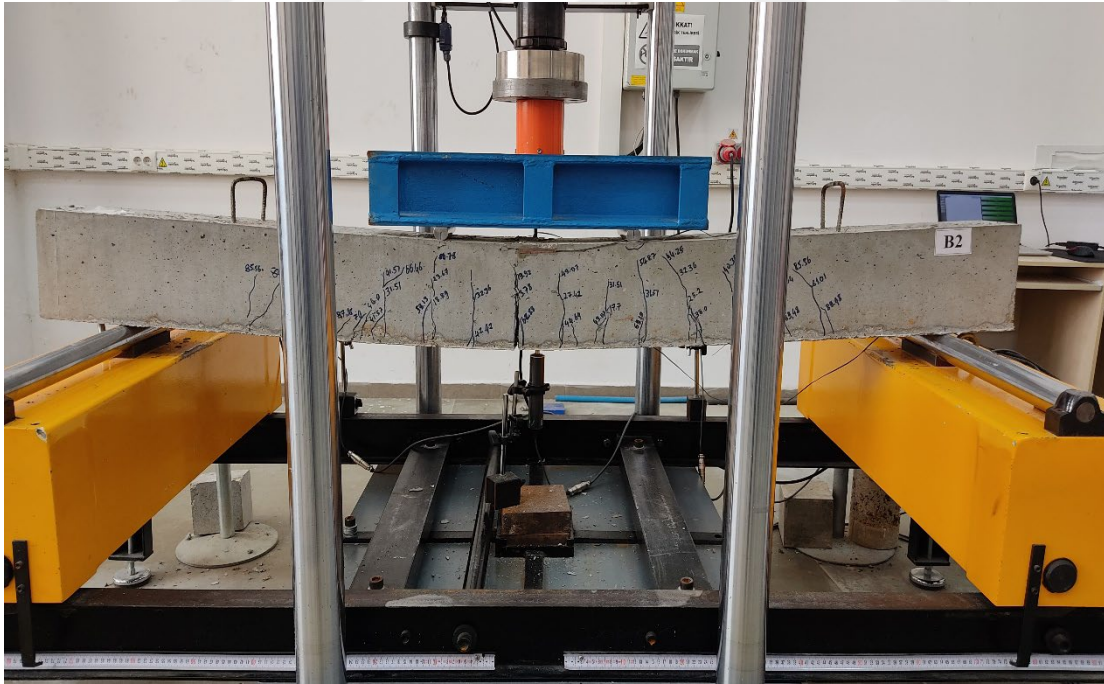
4.1.3.2. B2 Kirişi

Deney düzeneğine uygun olarak hazırlanan B2 kirişi dört nokta yüklemesi altında test edilmiştir (Şekil 4.7(a)). Deney süresince B2 kirişine yük uygulanarak gerekli yük değerleri, deplasman değerleri, birim deformasyonlar zamana bağlı olarak elektronik data toplam sistemi ile kaydedilmiş, kirişte oluşan çatlaklar ve kirişin kırılma biçimi gözlenmiş ve davranış video ile kaydedilmiştir. Yapılan deneyde, ilk çatlağın 13.78 kN yük değerinde, uygulanan iki yük arasında eğilme çatlağı olarak meydana geldiği ve kılcal düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Bu eğilme çatlağı oluştuğu anda kiriş açıklık ortasında 1.49 mm deplasman meydana geldiği tespit edilmiştir. Deneyin 18.89 kN yük değerinde ilk eğilme çatlağının simetrisinde kılcal düzeyde yeni eğilme çatlağı oluştuğu belirlenmiştir. Kirişte 19.92 kN yük değerinde eğilme çatlaklarının kılcal düzeyde arttığı ve ilk eğilme çatlağının kılcal düzeyde yukarı doğru ilerlediği gözlemlenmiştir. Deneyde 31.51 kN yük değerinde çok sayıda kılcal düzeyde eğilme çatlağının meydana geldiği tespit edilmiş, bazı çatlakların bir miktar genişlemeye başladığı görülmüştür (Şekil 4.7(b)). Deneyin 34 kN yük değerinde eğilme çatlaklarının kılcal düzeyde ilerleyerek devam ettiği, 38 kN yük değerinde ise eğilme çatlaklarının kollara ayrılmaya başladığı tespit edilmiştir. Kiriş deneyinde 46.34 kN yük değerinde mesnete yakın bölgede kılcal düzeyde ilk kesme çatlağının oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.7(b)). Kiriş deneyinin 47.71 kN yük değerinde mevcut kesme çatlağının kılcal düzeyde ilerlediği, 54.87 kN yük değerinde kılcal düzeyde yeni eğilme çatlaklarının oluştuğu, ayrıca mevcut kesme çatlaklarının az bir miktarda genişleyerek yükleme bölgesine doğru ilerlediği tespit edilmiştir. Deney sırasında yapılan gözlemlerde çelik liflerin etkisiyle kirişteki mevcut çatlaklarının fazla genişlemediği, çelik liflerin çatlak genişlemesini engellediği tespit edilmiştir. Kirişte 61 kN yük değerinde kılcal düzeyde yeni kesme çatlağının meydana geldiği görülmüştür. Uygulanan yüklemeler ile kirişin 65 kN yük düzeyinde eğilme çatlaklarının bir miktar genişlediği, 66.46 kN yük değerinde eğilme çatlaklarında kollara ayrılmaların oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.7(b)). B2 kirişi deneyinde, 80.78 kN yük değerinde mevcut kesme çatlaklarının ilerleyerek yükleme noktasına ulaştığı tespit edilmiş, 82.83 kN yük değerinde ilk kesme çatlağının simetrisinde yeni bir kesme çatlağının meydana geldiği görülmüştür. Deneyin 85.96 kN yük değerinde mevcut kesme çatlaklarının kılcal düzeyde ilerlediği, 87.95 kN yük değerinde ise yeni kılcal düzeyde kesme çatlaklarının meydana geldiği görülmüştür. Kiriş deneyinde 91 kN yük değerinde, basınç bölgesinde betonda ezilmelerin başladığı ve 95.11 kN yük değerinde kesme çatlaklarının çok az genişleyerek yükleme bölgesine doğru ilerlediği gözlemlenmiştir. Deneyde 99.54 kN yük

düzeyinde kirişin basınç bölgesinde betonun ezildiği ve kirişin taşıma gücü kapasitesine ulaştığı görülmüş ve deney bu aşamada sonlandırılmıştır. Deney sonucunda kirişin açıklık ortasında 39.74 mm deplasman olduğu tespit edilmiştir. B2 kirişinin deney öncesi ve deney sonrası görünümü Şekil 4.7’de verilmiştir.



(a) B2 kirişinin kırılmadan önceki durumu



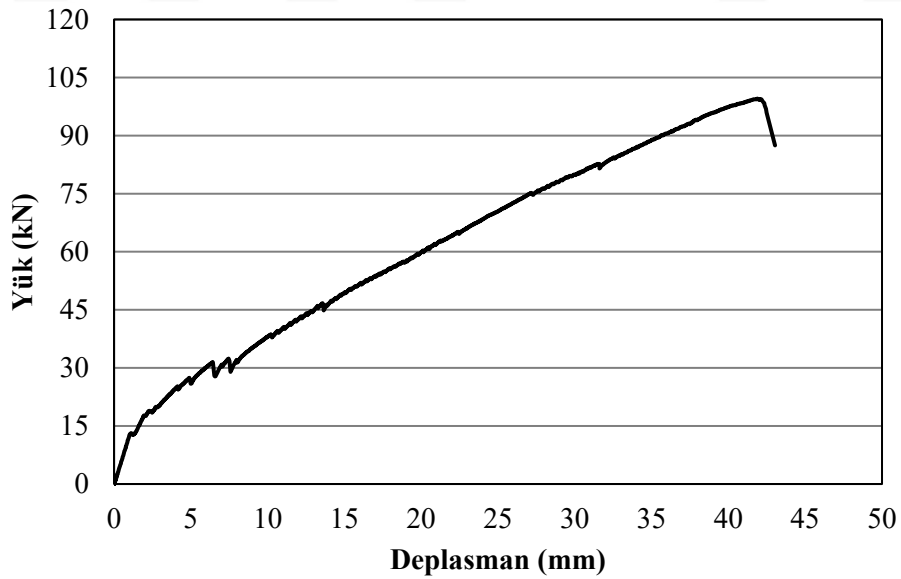
(b) B2 kirişinin kırıldıktan sonraki durumu (ön görünüş)



(c) B2 kirişinin kırıldıktan sonraki durumu (arka görünüş)

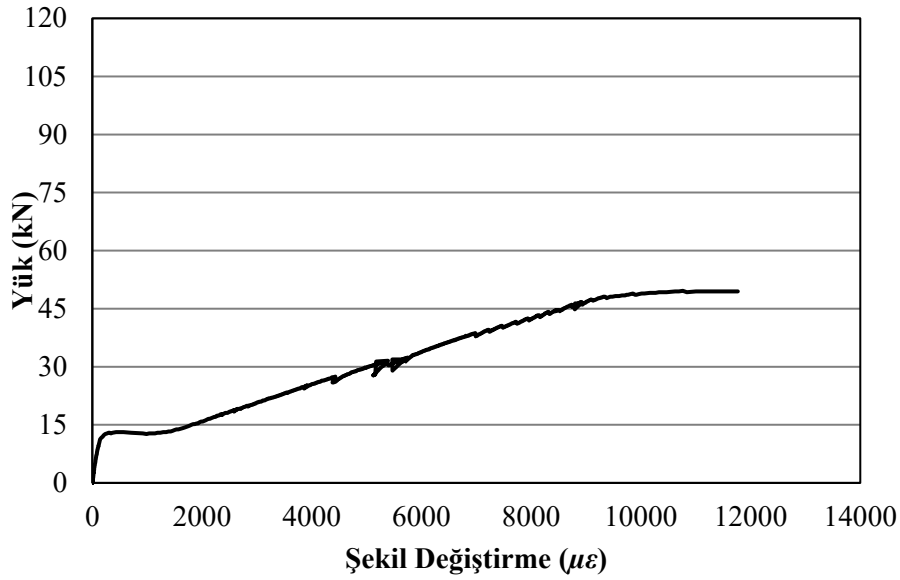
Şekil 4.7. B2 kirişi dört nokta eğilme deneyi

Yapılan test sonucunda B2 kirişi deneysel yük-deplasman (açıklık ortası) eğrisi Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. B2 kirişi yük-deplasman eğrisi

B2 kirişine uygulanan yükler sonucunda oluşan yük- GFRP donatı birim şekil değiştirme eğrisi Şekil 4.9’da verilmiştir.



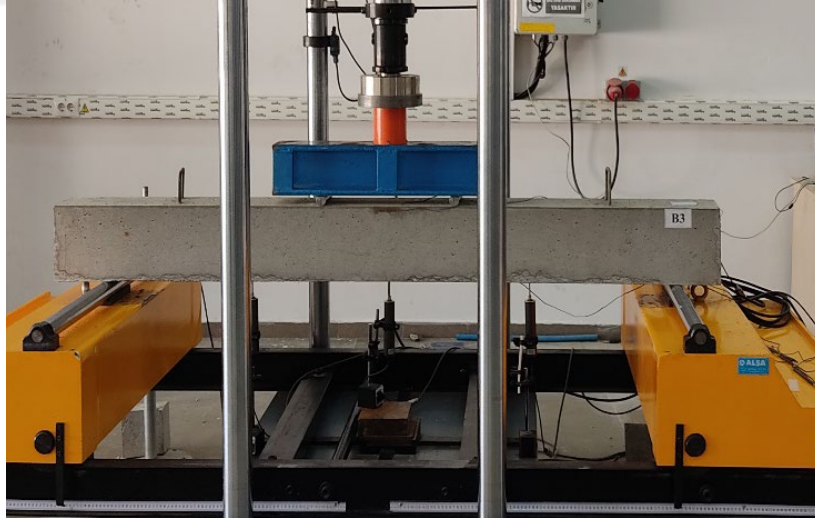
Şekil 4.9. B2 kirişi yük-şekil değiştirme eğrisi

B2 kirişi B1 kirişi ile karşılaştırıldığında, taşıma gücü kapasitesinde çok fazla değişim olmadığı, ancak çelik liflerin etkisiyle B2 kirişinde daha düşük deplasman olduğu belirlenmiştir. Böylece çelik liflerin kirişteki yapısal davranışa olumlu katkı sağladığı sonucuna varılmıştır.

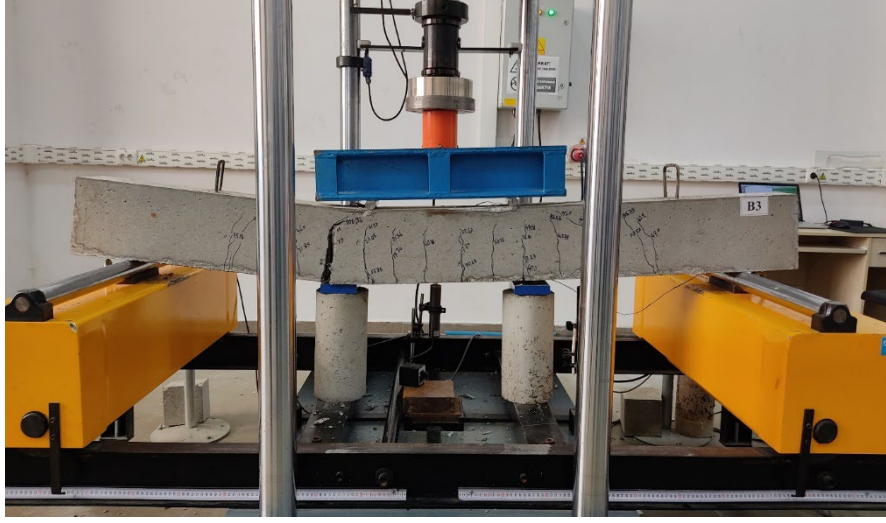
4.1.3.3. B3 Kirişi

DeneySEL çalışma kapsamında öngörülen deney düzeneğine uygun olarak hazırlanan B3 kiriş numunesi dört nokta yüklemesi altında test edilmiştir (Şekil 4.10 (a)). Deney süresince B3 kirişine uygulanan yük ve karşılık gelen okumalar kaydedilmiştir. Uygulanan yükleme sonucunda 17.36 kN yük değerinde ilk çatlağın kılcal düzeyde olduğu ve eğilme çatlağı olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu çatlak oluşum aşamasında kiriş açıklık ortasında 1.99 mm deplasman meydana geldiği tespit edilmiştir. Deneyin 19.23 kN yük değerinde ilk eğilme çatlağının simetrisinde kılcal düzeyde yeni bir eğilme çatlağı olduğu tespit edilmiştir. Deneyde 21.96 kN yük değerinde kılcal düzeyde eğilme çatlaklarının arttığı ve ilk eğilme çatlağının kılcal düzeyde yukarı doğru ilerlediği gözlemlenmiştir (Şekil 4.10(b)). Yapılan deneyde 31.85 kN yük değerinde çok sayıda kılcal düzeyde eğilme çatlağının meydana geldiği ve bazı çatlakların bir miktar genişlemeye başladığı görülmüştür. Kirişte 40.38 kN yük değerinde ana çatlakların çelik lifler sayesinde genişlemediği, söz konusu çatlakların yakınında kılcal düzeyde yeni eğilme çatlaklarının olduğu görülmüştür (Şekil 4.10(b)). Deneyin 43.10

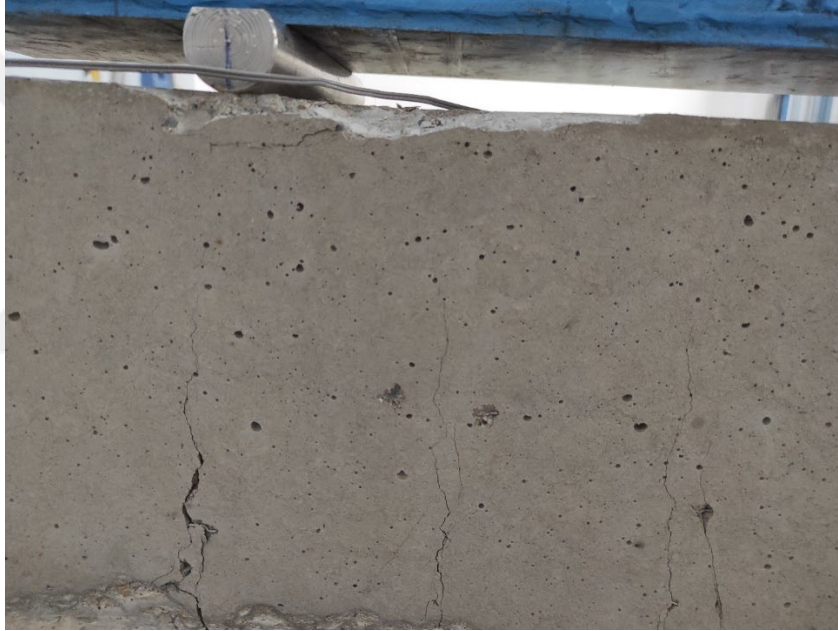
kN yük değerinde eğilme çatlaklarının kollara ayrılmaya başladığı, 47 kN yük düzeyinde mesnete yakın bölgede kılcal düzeyde ilk kesme çatlağının oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.10(b)). Deneyde yapılan gözlemlerde, çelik lifler sayesinde eğilme çatlaklarının çok genişlemediği ve kesme çatlaklarının kılcal düzeyde kaldığı tespit edilmiştir. Deneyin yaklaşık 68 kN yük düzeyinde mevcut çatlakların çok fazla genişlemediği söz konusu çatlakların yakınında yeni kılcal çatlakların meydana geldiği görülmüştür. B3 kirişi deneyinin 75.16 kN yük aşamasında mesnete yakın bölgede kılcal düzeyde yeni kesme çatlağının oluştuğu, 84.54 kN yük değerinde ise beton basınç bölgesinde ezilmelerin başladığı gözlemlenmiştir. Deneyin 92 kN yük değerinde çatlakların yükleme noktasına doğru ilerlediği, 93.23 kN yük değerinde basınç bölgesinde ezilmelerin görüldüğü ve 98.35 kN yük değerinde çatlakların biraz daha genişlediği ancak çelik liflerin çatlak ilerlemesini önlediği tespit edilmiştir. Kirişte 101.24 kN yük değerinde kirişin basınç bölgesinde betonda ezilmenin arttığı ve 109.60 kN yük değerinde betonda tamamen ezilme oluştuğu ve kirişin taşıma gücü kapasitesine ulaştığı görülmüş ve bu aşamada deney sonlandırılmıştır. Taşıma gücü anında kiriş orta noktasında 46.65 mm deplasman ölçülmüştür. B3 kirişinin deney öncesi ve deney sonrası görünümü Şekil 4.10'da verilmiştir.



(a) B3 kirişinin kırılmadan önceki durumu



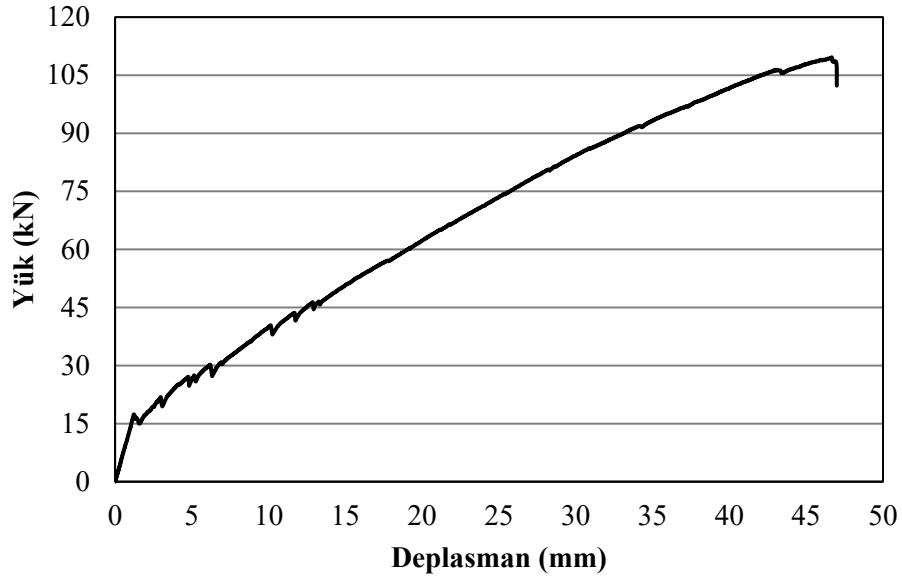
(b) B3 kirişinin kırıldıktan sonraki durumu (ön görünüş)



(c) B2 kirişinin kırıldıktan sonraki durumu (arka görünüş)

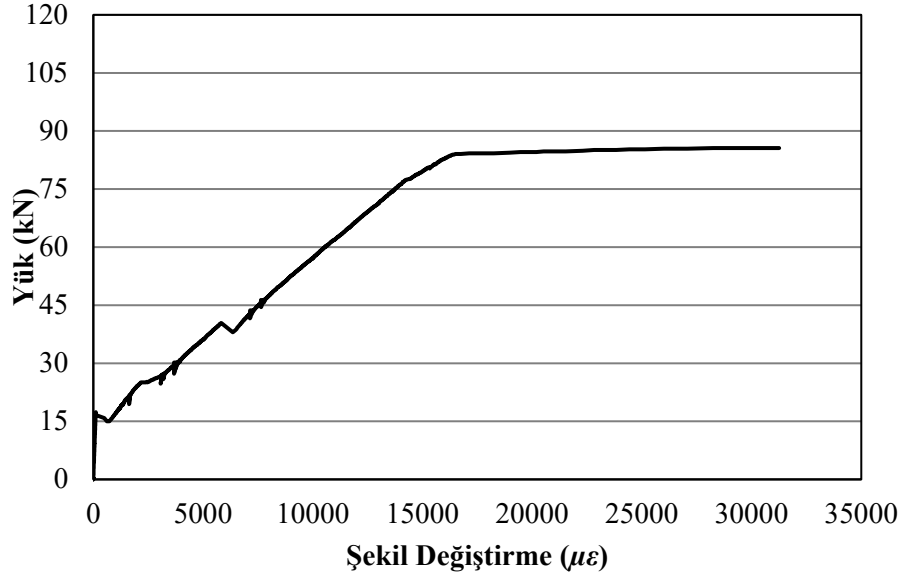
Şekil 4.10. B3 kirişi dört nokta eğilme deneyi

B3 kirişine uygulanan yük ve karşılık gelen kiriş orta noktasında okunan deplasmanlar ile oluşturulan deneysel yük-deplasman eğrisi Şekil 4.11’de sunulmuştur.



Şekil 4.11. B3 kirişi yük-deplasman eğrisi

B3 kirişine uygulanan yükler sonucunda oluşan yük- GFRP donatı birim şekil değiştirme eğrisi Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12. B3 kirişi yük-şekil değiştirme eğrisi

4.1.3.4. B4 Kirişi

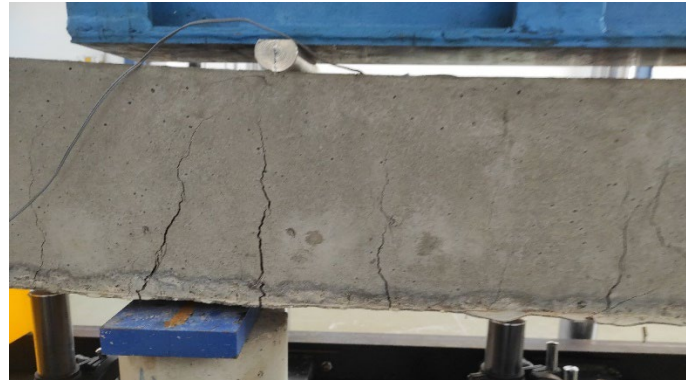
Deneyisel çalışma kapsamında hazırlanan B4 kirişi dört nokta eğilme altında test edilmiştir (Şekil 4.13(a)). Deneyde ilk çatlağın 17.70 kN yük değerinde ve kılcal düzeyde olduğu görülmüştür. Bu eğilme çatlağı sonucunda kiriş açıklık ortasında 1.52 mm deplasman meydana geldiği tespit edilmiştir. Artan yüklemeler ile kirişte 25.88 kN yük değerinde kılcal düzeyde eğilme çatlaklarının olduğu, 29.29 kN yük değerinde eğilme çatlaklarının ilerlemeye başladığı gözlemlenmiştir. Deneyde 37.14 kN yük değerinde mevcut çatlakların kılcal düzeyde ilerlemeye devam ettiği, 47 kN yük değerinde ana çatlağın genişlemeye başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.13(b)). B4 kirişinin 50.44 kN yük değerinde mevcut çatlakların yanında kılcal düzeyde yeni eğilme çatlaklarının olduğu, 53.50 kN yük değerinde ise eğilme çatlaklarında ilk kollara ayrılmanın meydana geldiği tespit edilmiştir. Deneyin 55.38 kN yük değerinde mevcut çatlakların ilerlemeye çalıştığı ancak çelik liflerin çatlakların genişlemesini engellediği görülmüştür. Deneyde 57.10 kN yük değerinde ana çatlakların çelik lifler nedeniyle genişleyemediği, söz konusu çatlakların yakınında yeni çatlakların olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.13(b)). Yapılan deneyin 60.54 kN yük değerinde mesnete yakın bölgede kılcal düzeyde ilk kesme çatlağının olduğu tespit edilmiş, 64.25 kN yük değerinde ise mevcut çatlakların ilerlemeye devam ettiği görülmüştür ((Şekil 4.13(b)). Test edilen kirişin 72.60 kN yük düzeyinde çatlakların yükleme noktasına doğru ilerlediği, 78 kN yük değerinde mesnete yakın bölgede kesme çatlağı olduğu, 82 kN yük düzeyinde ise mesnete yakın bölgede kılcal düzeyde yeni kesme çatlağı olduğu belirlenmiştir. Deneyde 84.71 kN yük değerinde mevcut çatlakların genişlemeye çalıştığı, 102.78 kN yük değerinde yükün uygulandığı bölgede betonda ezilmelerin başladığı ve 106 kN yük değerinde basınç bölgesinde ezilmelerin tamamen olduğu görülmüş ve deney sonlandırılmıştır. Deney sonucunda taşıma gücü anında kiriş orta noktasında 41.57 mm deplasman ölçülmüştür. Diğer kirişlerle karşılaştırıldığında, B4 kirişinde çelik lif hacimsel oranının artmasına bağlı olarak kirişin taşıma gücünde bir miktar artış olduğu, çatlak genişliğinde ve deplasmanda azalma olduğu tespit edilmiştir. B4 kirişinin deney öncesi ve deney sonrası görünümü Şekil 4.13'te sunulmuştur.



(a) B4 kirişinin kırılmadan önceki durumu



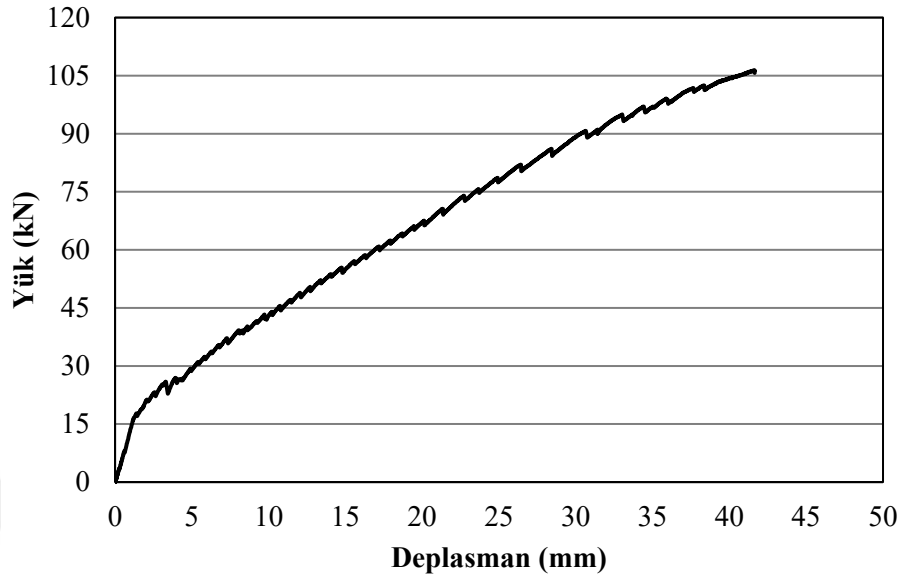
(b) B4 kirişinin kırıldıktan sonraki durumu (ön görünüş)



(c) B4 kirişinin kırıldıktan sonraki durumu (arka görünüş)

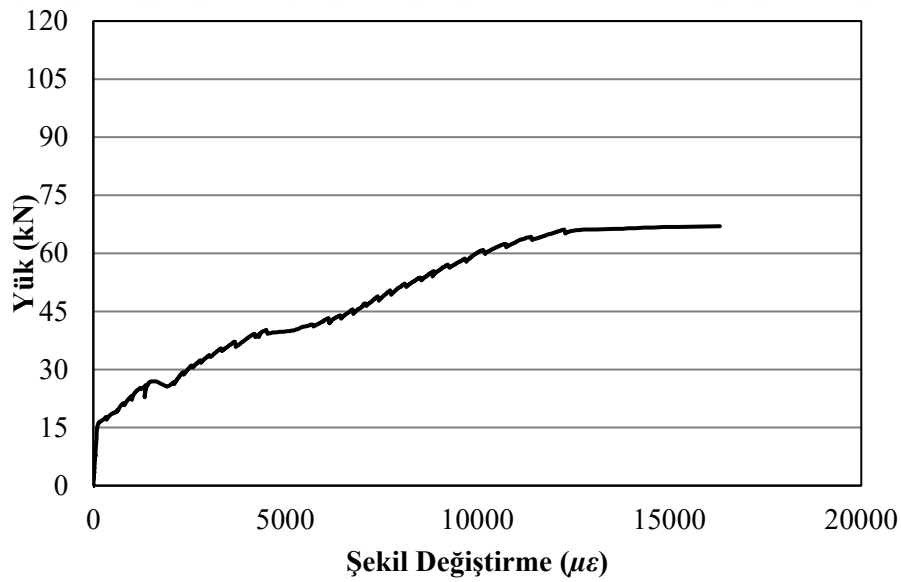
Şekil 4.13. B4 kirişi dört nokta eğilme deneyi

B4 kiriş deneyinde uygulanan yük ve karşılık gelen kiriş orta noktası deplasman değerleri ile elde edilen deneysel yük-deplasman eğrisi Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14. B4 kiriş yük-deplasman eğrisi

B4 kirişine uygulanan yükler sonucunda oluşan yük- GFRP donatı birim şekil değiştirme eğrisi Şekil 4.15'te verilmiştir.



Şekil 4.15. B4 kiriş yük-şekil değiştirme eğrisi

4.1.3.5. B5 Kirişi

Deneyisel çalışma kapsamında hazırlanan B5 kirişi dört nokta yüklemesi altında test edilmiştir (Şekil 4.16 (a)). Yapılan deneyin 19.40 kN yük değerinde kılcal düzeyde ilk çatlağın oluştuğu ve kiriş açıklık ortasında 1.74 mm deplasman meydana geldiği tespit edilmiştir. Deneyde 23.16 kN yük değerinde yeni eğilme çatlaklarının oluştuğu, 26 kN yük düzeyinde eğilme çatlaklarının ilerlemeye başladığı ve 33.90 kN yük değerinde yeni eğilme çatlaklarının meydana geldiği gözlemlenmiştir (Şekil 4.16(b)). Kirişte 49 kN yük düzeyinde mevcut çatlaklarda ilerlemelerin oluştuğu, 52.65 kN yük değerinde kılcal çatlaklarının genişlemeye başladığı görülmüştür. Kirişin 61.18 kN yük değerinde çatlaklarda ilk kollara ayrılmanın başladığı, 63.22 kN yük değerinde ise mevcut çatlaklarda yeni kollara ayrılmaların olduğu görülmüştür. Deneyin 69 kN yük değerinde çatlak ilerlemesinin gözlemlendiği, 76.52 kN yük değerinde ise mevcut çatlakların ilerlemeye çalıştığı görülmüştür. Kirişte 78.06 kN yük değerinde mesnete yakın bölgede kılcal düzeyde ilk kesme çatlağının oluştuğu, 79.76 kN yük değerinde ilk kesme çatlağının simetriğinde yeni bir kesme çatlağının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Deneyin 80.96 kN yük değerinde çatlakların yükleme noktasına doğru yaklaştığı, 83.17 kN yük değerinde ise kirişin basınç bölgesinde betonda ezilme oluştuğu görülmüştür ((Şekil 4.16(b)). Söz konusu basınç ezilmesinin betona yapıştırılmış olan gerinimölçerin üzerinde meydana geldiği tespit edilmiştir. Kiriş deneyinde 84.19 kN yük değerinde çatlakların genişlemeye çalıştığı ancak çelik liflerin çatlakların genişlemesini engellediği görülmüştür. Deneyde 94.25 kN yük değerinde betonun basınç bölgesinde ezildiği ve kirişin taşıma gücü kapasitesine ulaştığı görülmüş ve deney sonlandırılmıştır. Deney sonucunda kirişte açıklık ortasında 34.45 mm deplasman tespit edilmiştir. B5 kirişinin deney öncesi ve deney sonrası görünümü Şekil 4.16'da verilmiştir.



(a) B5 kirişinin kırılmadan önceki durumu



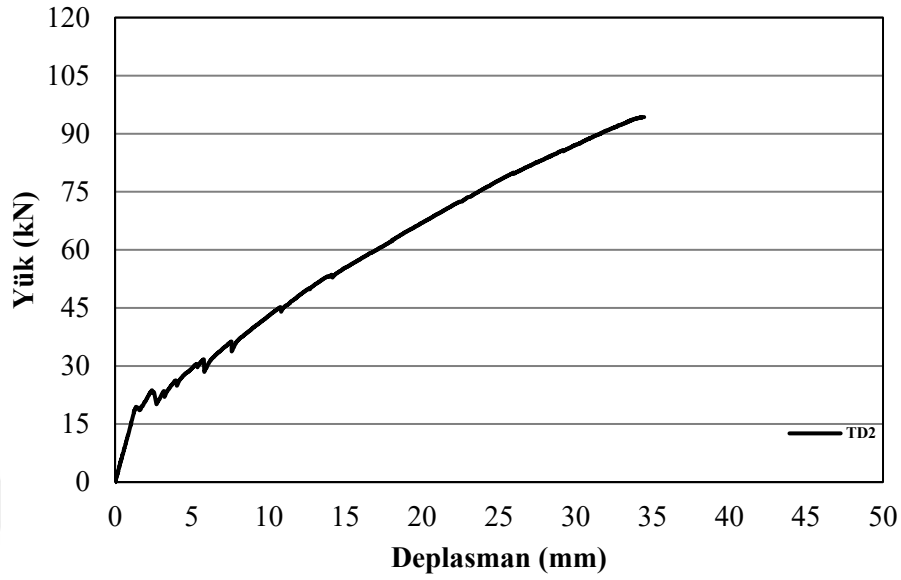
(b) B5 kirişinin kırıldıktan sonraki durumu (ön görünüş)



(c) B5 kirişinin kırıldıktan sonraki durumu (arka görünüş)

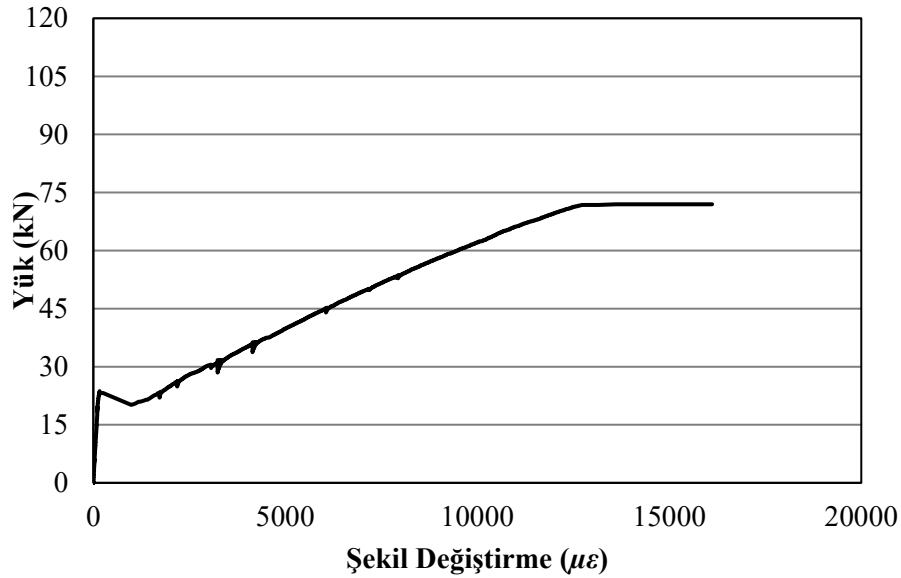
Şekil 4.16. B5 kirişi dört nokta eğilme deneyi

B5 kirişı deney sırasında okunan yük ve kiriş orta noktası deplasman değerleri ile oluşturulan deneysel yük-deplasman eğrisi Şekil 4.17’de verilmiştir.



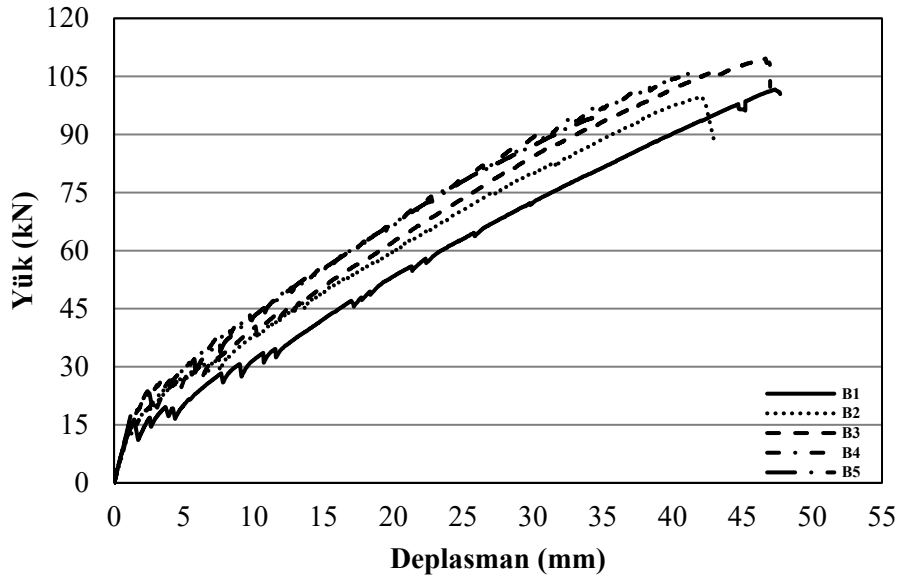
Şekil 4.17. B5 kirişı yük-deplasman eğrisi

B5 kirişine uygulanan yükler sonucunda oluşan yük- GFRP donatı birim şekil değiştirme eğrisi Şekil 4.18’de verilmiştir.



Şekil 4.18. B5 kirişı yük-şekil değiştirme eğrisi

Test edilen kirişlerin yük-deplasman eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.19’da sunulmuştur.



Şekil 4.19. Test edilen kirişlerin yük-deplasman eğrileri

Yapılan deneyler sonucunda, çelik liflerin ve GFRP donatının betonarme kirişlerin taşıma gücüne olumlu katkı sağladığı, özellikle çelik liflerin kiriş deplasmanlarını azalttığı, çatlakların genişlemesini engellediği ve kirişin daha sünek davranmasına olanak sağladığı belirlenmiştir.

4.2. Analitik Bulgular

Bu bölümde, yapısal tez çalışması kapsamında dört nokta eğilme deneyi uygulanan çelik lifsiz ve farklı lif hacimsel oranlara sahip çelik lifli GFRP donatılı betonarme kirişlerin yapısal davranışları incelenmiştir. Betonarme kirişler önerilen yöntemle dayalı olarak analiz edilmiş ve kirişlerin taşıma gücü değerleri ile yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Daha sonra kirişlerin deneysel ve teorik sonuçları karşılaştırılmıştır.

4.2.1. Test Edilen Kirişlerin Analizi

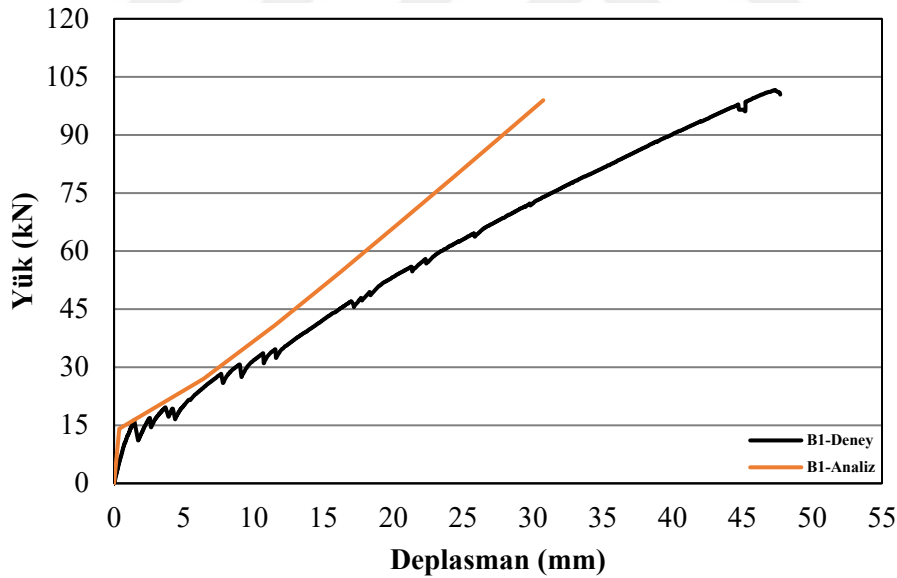
Yapılan çalışmada, dört nokta eğilme deneyi uygulanan çelik lifsiz ve farklı lif hacimsel oranlara sahip çelik lifli GFRP donatılı betonarme kirişlerin yük ve deplasman değerlerinin hesaplanması için Bölüm 3.2’de önerilen yöntemle göre analizi yapılmıştır. Analizde, beton basınç bölgesi için silindir numunelerin basınç deneyi testinden elde edilen gerilme-birim deformasyon eğrileri kullanılmıştır (Şekil 4.1). Yapılan analiz sonucunda kirişlerin teorik

taşıma kapasiteleri ve yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Tablo 4.3'te kirişlerin deneysel taşıma gücü değerleri (P_{test}), teorik taşıma gücü değerleri (P_u) ve P_u / P_{test} oranları verilmiştir.

Tablo 4.3. Test edilen betonarme kirişlerin teorik ve deneysel değerlerinin karşılaştırılması

Numune	P_{test} (kN)	P_u (kN)	P_u/P_{test}
B1	98.96	101.62	1.03
B2	99.70	99.97	1.00
B3	104.48	109.63	1.05
B4	112.94	106.39	0.94
B5	109.63	94.29	0.86

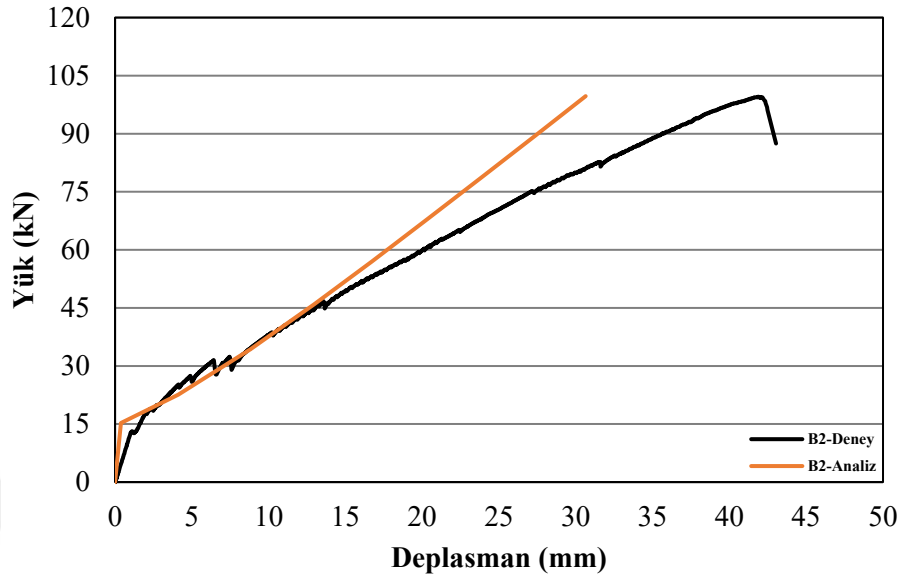
Çalışma kapsamında test edilen çelik lifsiz ve farklı lif hacimsel oranlara sahip çelik lifli GFRP donatılı betonarme kirişlerin deneysel ve teorik yük-deplasman eğrileri Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'te karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 4.20. B1 kirişinin deneysel ve teorik yük-deplasman eğrileri

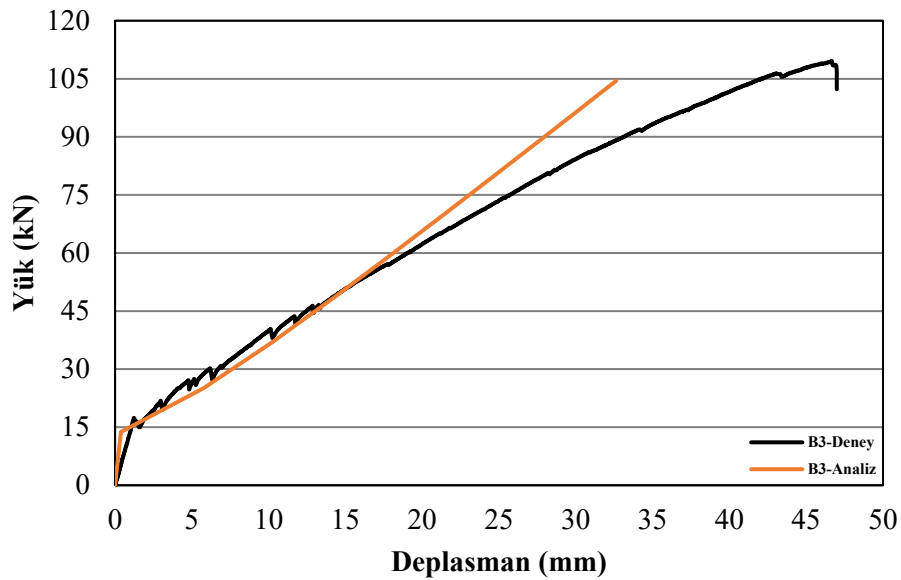
Şekil 4.20 incelendiğinde, çelik lifsiz olan B1 kiriş numunesinin deneysel ve teorik yük-deplasman eğrilerinin yaklaşık olarak 45 kN yük değerine kadar olan bölümünde birbirleriyle oldukça uyumlu olduğu bu noktadan sonra taşıma gücü anına kadar birbirinden bir miktar uzak kaldığı görülmüştür. Yapılan analiz sonucunda, kirişlerin deplasman değerinin elde

edilmesinde kullanılan Bischoff (2005) tarafından önerilen etkili atalet momenti ifadesinin kirişlerin teorik deplasman değerinin hesaplanmasında olumlu sonuç sağladığı anlaşılmıştır.



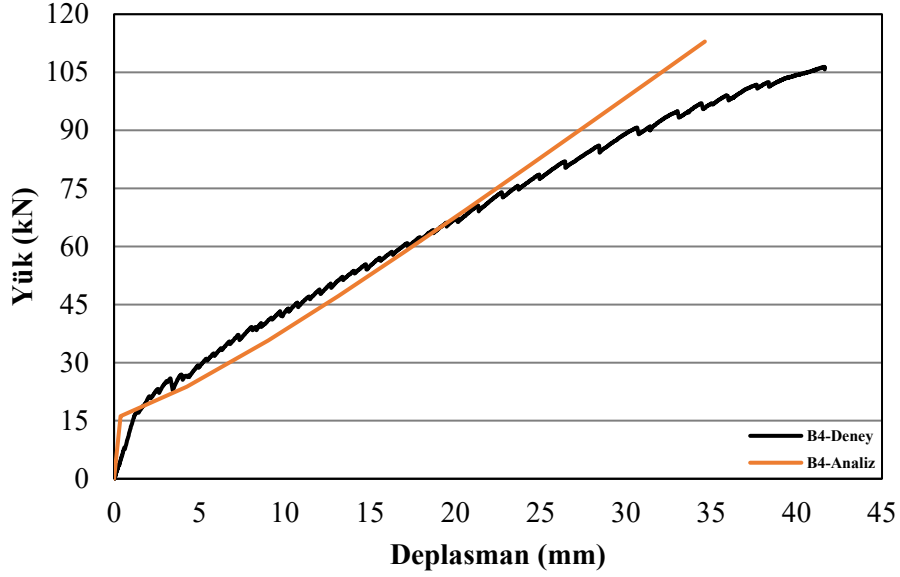
Şekil 4.21. B2 kirişinin deneysel ve teorik yük-deplasman eğrileri

Şekil 4.21’de görüldüğü üzere, B2 kiriş numunesinin deneysel ve teorik yük-deplasman eğrilerinin birbiriyle uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kirişlerin deplasman analizinde kullanılan Bischoff (2005) tarafından önerilen etkili atalet momenti modelinin olumlu sonuç sağladığı görülmüştür.



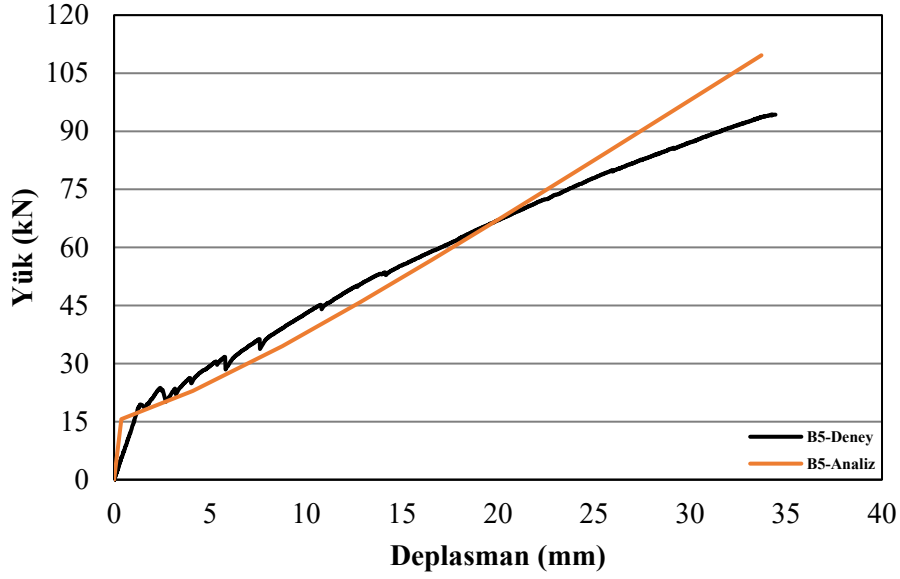
Şekil 4.22. B3 kirişinin deneysel ve teorik yük-deplasman eğrileri

Şekil 4.22 incelendiğinde, B3 kiriş numunesinin yaklaşık olarak 105 kN yük değerine ulaşıncaya kadar deneysel ve teorik yük-deplasman eğrilerinin birbiriyle uyumlu olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.23. B4 kirişinin deneysel ve teorik yük-deplasman eğrileri

Şekil 4.23 incelenecek olursa, B4 kiriş numunesinin deneysel ve teorik yük-deplasman eğrilerinin yaklaşık olarak 100 kN yük değerine ulaşıncaya kadar birbiriyle oldukça uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Bu aşamadan sonra eğrilerin birbirinden az miktarda uzaklaştığı görülmüştür.



Şekil 4.24. B5 kirişinin deneysel ve teorik yük-deplasman eğrileri

Şekil 4.24 incelendiğinde, B5 kiriş numunesinin deneysel ve teorik yük-deplasman eğrilerinin birbiriyle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.

Kiriş numunelerin yük-deplasman eğrileri incelenecek olursa, dört nokta eğilme deneyinde test edilen betonarme kirişlerin iyi düzeyde sünek davranış gösterdiği görülmektedir. Yapılan çalışmada, betonarme kirişlerin deneysel ve teorik sonuçlarının birbiriyle uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca deneysel ve teorik yük-deplasman eğrileri incelendiğinde, kiriş deplasmanlarının hesabında kullanılan Bischoff (2005) tarafından önerilen etkili atalet momenti ifadesinin kirişlerin deplasman değerinin elde edilmesinde uygun sonuç sağladığı belirlenmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, çelik liflerin ve GFRP donatıların kirişlerin yük taşıma kapasitesi üzerinde olumlu etkisinin olduğu, özellikle çelik liflerin kirişlerde oluşan çatlakların genişlemesini engellediği ve kiriş deplasmanlarının daha düşük düzeyde kalmasını sağladığı sonucuna varılmıştır.

5. SONUÇLAR

Sunulan tez çalışması kapsamında, çelik lifsiz ve farklı oranlarda çelik lif içeren GFRP donatılı beş adet kiriş üretilmiş ve kirişlerin dört nokta yüklemesi altında eğilme davranışı incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında test edilen kirişlerin yapısal davranışı, çatlak gelişimi, yük-deplasman ilişkisi ve yük-donatı birim şekil değiştirme ilişkisi araştırılmıştır. Çalışmada, ACI 440.1R-15’de yer alan formülasyonlar ve Bischoff (2005) tarafından önerilen etkili atalet momenti ifadesi esas alınarak kirişlerin analizi için teorik bir yöntem önerilmiştir. Test edilen kirişler söz konusu yöntem ile analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

1. Tüm kirişler ACI 440.1R-15 rehberine uygun olarak denge üstü olarak tasarlanmıştır. Yapılan çalışmada çelik lif içeren kiriş numunelerde yaklaşık olarak dengeli kırılma davranışı gözlenmiştir. Bu durumun temel nedeni, çelik lifler sayesinde betonun birim kısalma değeri arttığından, FRP donatıların daha fazla uzamasına olanak sağlanmış olmasıdır.
2. Çelik lif takviyeli betonla üretilen kirişlerde çelik lif ilavesinin betonun basınç dayanımı üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Ancak, çelik liflerin kirişlerde oluşan çatlakların genişlemesini engellediği ve kirişlerin taşıma kapasitesinde artış sağlandığı sonucuna varılmıştır.
3. Çelik lif hacimsel oranının artmasıyla birlikte kiriş taşıma gücünün arttığı, çatlak genişliğinin ve deplasmanın azaldığı tespit edilmiştir.
4. B2-B3 ve B4-B5 kirişleri arasındaki karşılaştırmalar neticesinde, beton basınç bölgesinde GFRP veya standart çelik kullanımının betonarme davranışı bakımından önemli bir farklılık meydana getirmediği gözlemlenmiştir.
5. Tez çalışması kapsamında yapılan kiriş analizlerinde elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir. Yöntemde esas alınan Bischoff (2005) tarafından önerilen etkili atalet momenti ifadesinin kirişlerin yük-deplasman eğrilerinin elde edilmesinde olumlu sonuçlar sağladığı sonucuna varılmıştır.

6. ÖNERİLER

Sunulan çalışmada, çelik lifin ve FRP donatının kiriş numunelerinin davranışı üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır. Söz konusu parametrelerin kiriş davranışına etkilerinin daha geniş ve kapsamlı bir şekilde belirlenmesi amacıyla, çeşitli FRP türleri ve oranlarının yanı sıra, beton içinde farklı hacimsel oranlarda ve tiplerde çelik lif ilavesiyle üretilen kiriş numunelerinin test edilmesi ile kiriş davranışı daha fazla ortaya konulabilecektir. Bu yönde gerçekleştirilecek çalışmaların, çelik lif takviyeli ve FRP donatılı betonarme kirişlerin deneysel sonuçlarına dair literatüre önemli katkı sağlanacağı öngörülmektedir.



KAYNAKÇA

Abbood, I. S., Odaa, S. A., Hasan, K. F. & Jasim, M. A. (2020). Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures – A review. *Materials Today: Proceedings*, 43(2), 1003-1008.

ACI 440.1R. (2015). *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute (ACI).

Adaklı, S.A. (2022). Geopolimer beton içeren kirişlerin davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Adana.

Ahmed, E. A., Benmokrane, B., & El-Nemr, A. (2013). Flexural behavior and serviceability of normal- And high-strength concrete beams reinforced with glass fiber-reinforced polymer bars. *ACI Structural Journal*, 110:1077-1087.

Banthia, N., Yoo, D. Y., & Yoon, Y. S. (2016). Predicting service deflection of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP bars. *Composites Part B: Engineering*, 99, 381-397.

Bischoff, P. H. (2005). Reevaluation of Deflection Prediction for Concrete Beams Reinforced with Steel and Fiber Reinforced Polymer Bars. *Journal of Structural Engineering*, 131(5), 752-767.

Blaszczynski, T. & Przybylska-Falek, M. (2015). Operational Research in Sustainable Development and Civil Engineering - meeting of EURO working group and 15th German-Lithuanian-Polish colloquium (ORSDC 2015). *Procedia Engineering* 122 (2015) 282 – 289.

Cheng, S., Danying, G., Li, C., Neaz, S. M., & Zhu, H. (2018). Flexural behavior of partially fiber-reinforced high-strength concrete beams reinforced with FRP bars. *Construction and Building Materials*, 161:587-597.

Cheng, S., Li, C., Niu, G., Yang, L., & Zhu, H. (2022). Flexural behavior and a new model for flexural design of concrete beams hybridly reinforced by continuous FRP bars and discrete steel fibers. *Structures*, 38:949-960.

Cheng, S., Li, Z., Wei, Y., Wen, C., & Zhu, H. (2020). Prediction model for the flexural strength of steel fiber reinforced concrete beams with fiber-reinforced polymer bars under repeated loading. *Composite Structures*, 250:1-13.

Cullazoğlu, F. (2014). FRP donatılı betonarme kirişlerin eğilme ve kesme etkisi altında analizi Yüksek Lisans Tezi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde.

Du, C., Gao, D., Li, Z., Wen, Ç., Yuan, J., & Zhu, H. (2021). Experimental study on cracking behavior of steel fiber-reinforced concrete beams with BFRP bars under repeated loading. *Composite Structures*, 267:1-16.

Elzeiny, S. M., Ibrahim, M. M., & Issa, M. S., (2011). Influence of fibers on flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars. *Engineering Structures*, 33:1754-1763.

Gudonis, E., Timinskas, E., Gribniak, V., Kaklauskas, G., Arnautov, & Tamulėnas, A. K. (2013). FRP reinforcement for concrete structures: state of-the-art review of application and design, *Engineering Structures and Technologies*, 5(4), 147-158

Ibrahim, M. A., Issa, M. A., & Ovitigala, T., (2016). Serviceability and Ultimate Load Behavior of Concrete Beams Reinforced with Basalt Fiber-Reinforced Polymer Bars. *ACI Structural Journal*, 113:757-768.

Jafarzadeh, H., & Nematzadeh, M. (2020). Evaluation of post-heating flexural behavior of steel fiber-reinforced high-strength concrete beams reinforced with FRP bars: Experimental and analytical results. *Engineering Structures*, 225:1-21.

Kandasamy, S., Pradeepkumar, S., Subash Chandra, R., & Syed İbrahim, S. (2021). Effect of discrete steel fibres on strength and ductility of FRP laminated RC beams. *Ain Shams Engineering Journal*, 12:1329-1337.

Kozak, M. (2013). Çelik lifli betonlar ve kullanım alanlarının araştırılması. *Teknik Bilimler Dergisi*, 3(1), 26-35.

Liu, X., Liu, Y., Sun, Y., & Wu, T. (2020). Flexural cracks in steel fiber-reinforced lightweight aggregate concrete beams reinforced with FRP bars. *Composite Structures*, 253:1-14.

Min, K.H., Shin, H.O., Yan, J.M., & Yoon, Y.S. (2012), Effect of steel and synthetic fibers on flexural behavior of high-strength concrete beams reinforced with FRP bars. *Composites: Part B*, 43:1077-1086.

Padmarajaiah, S. K., & Ramaswamy A. (2002). Comparative Study on Flexural Response of Full and Partial Depth Fiber-Reinforced High-Strength Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(2), 130-136.

Şengün, K. (2016). CFRP ile güçlendirilen çelik lifli betonarme kirişlerde dayanım artışlarının irdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Şimşek, S. (2023). Çelik lifli betonların davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Adana.

Tahenni, T., Chemrouk, M., & Lecompte, T. (2016). Effect of steel fibers on the shear behavior of high strength concrete beams. *Construction and Building Materials*, 105, 14-28.

Tokgöz, S., Dündar, C., & Tanrikulu, A. K. (2012). Experimental behaviour of steel fiber high strength reinforced concrete and composite columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 74, 98-107.

Ünal, H. Y. (2022). Çimento esaslı kompozit içeren FRP donatılı kirişlerin davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Adana.