



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

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**HİBRİT FRP VE ÇELİK DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**EMRE BOZDOĞAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ**



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

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**HİBRİT FRP VE ÇELİK DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**EMRE BOZDOĞAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DANIŞMAN
PROF. DR. SERKAN TOKGÖZ**

ADANA 2025

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezde yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik davranışa uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bu kuralların ve davranışların gerektirdiği şekilde bu çalışmaya özgün olmayan tüm bilgiler için atıf verdiğimi ve kaynak gösterdiğimi beyan ederim.

....../....../20..

[İmza]

Emre BOZDOĞAN



ÖZET

HİBRİT FRP VE ÇELİK DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Emre BOZDOĞAN

Yüksek Lisans, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Serkan TOKGÖZ

Ağustos 2025, 63 sayfa

Sunulan tezde, hibrit CFRP-çelik donatılı betonarme kirişlerin davranışı incelenmiştir. Çalışmada, toplam beş adet kiriş hazırlanmıştır. Bunlardan biri CFRP donatılı betonarme kiriş, ikisi hibrit CFRP-çelik donatılı betonarme kiriş ve ikisi hibrit CFRP-çelik donatılı çelik lifli betonarme kiriştir. Kiriş numuneler 150×200 mm kesit boyutlarında ve 1500 mm uzunluğundadır. Hazırlanan kirişler denge üstü olarak tasarlanmıştır. Kirişler eğilme davranışını belirlemek amacıyla dört nokta yüklemesi altında test edilmiştir. Deneysel çalışmada elektronik data toplama sistemi kurulmuş ve kirişlere uygulanan yük ve karşılık gelen deplasman ve birim deformasyonlar belirli aralıklarla bilgisayara kaydedilmiştir. Kiriş testlerinde numunede meydana gelen çatlaklar, çatlak gelişimleri, uygulanan yük ve deplasmanlar ile şekil değiştirmeler gözlenmiştir. Kirişlerin taşıma kapasitesi ve yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Test edilen kirişlerin tasarıma uygun olarak denge üstü olacak şekilde kırıldığı görülmüştür. Yapılan deneylerde, çelik liflerin çatlak genişliğini sınırladığı ve kirişlerin sünekliğini arttırdığı tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca, hibrit FRP-çelik donatılı çelik lifli ve lifsiz kirişlerin analizi için teorik bir yöntem ele alınmıştır. Teorik yöntemde çelik lifli ve lifsiz betonun doğrusal olmayan gerilme-birim deformasyon ilişkileri dikkate alınmıştır. Test edilen kirişler yük-deplasman eğrileri ve taşıma gücü için analiz edilmiştir. Analitik sonuçlar deney sonuçları ile karşılaştırılmış ve uyum içinde olduğu görülmüştür. Teorik yöntemde beton ve çelik lifli beton için kabul edilen gerilme-şekil değiştirme modellerinin hibrit CFRP-çelik donatılı betonarme kirişlerin davranışının belirlenmesinde makul sonuçlar sağladığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hibrit Kiriş, Fiber Takviyeli Polimer, Beton, Dört Nokta Yükleme

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF HYBRID FRP AND STEEL REINFORCED CONCRETE BEAMS

Emre BOZDOĞAN

M.Sc., Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Serkan TOKGÖZ

August 2025, 63 pages

In the presented thesis, the behavior of hybrid CFRP-steel reinforced concrete beams was examined. In the study, a total of five beams were prepared. One of them was reinforced concrete beam with CFRP bars, two beams were hybrid CFRP-steel reinforced concrete beams and two beams were hybrid CFRP-steel reinforced steel fiber concrete beams. The beam specimens were 150×200 mm in cross section sizes and 1500 mm in length. The prepared beams were designed as over-reinforced. The beams were tested under four-point loading to determine the flexural behavior. In the experimental study, an electronic data acquisition system was set and the applied load and the corresponding deflections and strains were recorded in a computer at an interval time. In the beam tests, cracks, crack developments, applied load, deflections and strains in the beams were observed. The ultimate loads, load-deflection curves of the beams were attained. It was observed that the tested beams were failed as over-reinforced in consistent with design. In the experiments, it was found that steel fibers restricted the crack widths and improved the ductility of the beams. In addition, a theoretical procedure was taken into consideration to analyse the plain and steel fibers reinforced concrete beams with hybrid FRP-steel bars in the study. In the theoretical method, the nonlinear stress-strain relationships of plain and steel fiber concrete were considered. The tested beams were analysed for load-deflection curves and load capacities. The analytical results were compared with the test results and obtained in good agreement. It was determined that the stress-strain models for plain and steel fiber concrete assumed in the theoretical method provided reasonable results for the predicting the behavior of hybrid CFRP-steel reinforced concrete beams.

Keywords: Hybrid beam, Fiber Reinforced Polymer, Concrete, Four-Point Loading

TEŞEKKÜR

Tezimin her aşamasında bilimsel rehberliği, engin tecrübesi ve motive edici desteğiyle bana yol gösteren danışmanım Prof. Dr. Dr. Serkan TOKGÖZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmalarım ve laboratuvar süreçlerim boyunca verdikleri destek ve değerli yardımları için Arş. Gör. Dr. Sedat KARAAHMETLİ'ye ve laboratuvar görevlilerine teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte, bana gösterdikleri anlayış ve destekten dolayı çalıştığım şirket Kambeton A.Ş.'ye ve yöneticilerine şükranlarımı sunarım.

Akademik hayatım boyunca bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, gelişimime katkıda bulunan tüm değerli hocalarıma teşekkür ederim.

Bu yolculukta maddi ve manevi desteklerini daima yanımda hissettiğim sevgili aileme, annem Hatice BOZDOĞAN'a ve babam Kenan BOZDOĞAN'a en içten duygularıyla teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
TABLolar DİZİNİ.....	xii
KISALTMALAR.....	xiii
1.GİRİŞ	1
2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3.MALZEME VE YÖNTEM.....	9
3.1.Deneysel Çalışma	9
3.1.1.Malzemeler	9
3.1.1.1.Beton.....	9
3.1.1.2.Donatı.....	10
3.1.2.Kiriş numuneleri	10
3.1.2.1.Kiriş donatıları.....	11
3.1.2.2.Kiriş numune üretimi.....	13
3.1.2.3.Numunelerin testi	14
3.1.2.4.Beton basınç testi.....	14
3.1.2.5.Kiriş dört nokta yükleme deneyi	15
3.1.3.Kiriş davranışı	17
3.1.3.1.B-I-4F kirişi.....	17
3.1.3.2.HB-I-3F-2S kirişi	20
3.1.3.3.HB-I-4F-2S kirişi	23
3.1.3.4.HB-I-3F-2S-SF kirişi.....	26
3.1.3.5.HB-I-4F-2S-SF kirişi.....	29
4.MATERYAL ve METOD	34
4.1.Yöntemde Kabul Edilen Varsayımlar	34
4.2.Analiz Yöntemi.....	36
4.3.Hibrit FRP-Çelik Donatılı Kiriş Denge Denklemleri	38
4.4.Hibrit FRP-Çelik Donatılı Kiriş Deplasman Hesabı	39

5.ANALİTİK ÇALIŞMA.....	41
5.1.Kirişlerin Analizi	41
6.SONUÇLAR	46
7.ÖNERİLER	47
KAYNAKLAR.....	48
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 CEM I 52.5R sınıfı çimento.....	9
Şekil 3.2 Hibrit kiriş donatı düzenlenmesi.....	11
Şekil 3.3 Kiriş donatıları	12
Şekil 3.4 Kiriş numune üretimi	14
Şekil 3.5 Silindir numunelere basınç deneyi uygulanması	15
Şekil 3.6 Hibrit kiriş donatı düzenlenmesi.....	16
Şekil 3.7 Kiriş eğilme test düzeni	16
Şekil 3.8 B-I-4F kirişi dört nokta eğilme deneyi	18
Şekil 3.9 B-I-4F numunesi deneysel yük-deplasman eğrisi.....	19
Şekil 3.10 B-I-4F kirişi yük-beton birim deformasyon eğrisi.....	19
Şekil 3.11 HB-I-3F-2S kirişi dört nokta eğilme deneyi	21
Şekil 3.12 HB-I-3F-2S kirişi deneysel yük-deplasman eğrisi.....	22
Şekil 3.13 HB-I-3F-2S kirişi yük-beton birim deformasyon eğrisi	22
Şekil 3.14 HB-I-4F-2S kirişi dört nokta eğilme deneyi	24
Şekil 3.15 HB-I-4F-2S kirişi yük-deplasman eğrisi.....	25
Şekil 3.16 HB-I-4F-2S kirişi yük-beton birim deformasyon eğrisi	25
Şekil 3.17 HB-I-3F-2S-SF kirişi dört nokta eğilme deneyi	27
Şekil 3.18 HB-I-3F-2S-SF kirişi yük-deplasman eğrisi.....	28
Şekil 3.19 HB-I-3F-2S-SF kirişi yük-beton birim deformasyon eğrisi	28
Şekil 3.20 HB-I-4F-2S-SF kirişi dört nokta eğilme deneyi	30
Şekil 3.21 HB-I-4F-2S-SF kirişi yük-deplasman eğrisi.....	31
Şekil 3.22 HB-I-4F-2S-SF kirişi yük-beton birim deformasyon eğrisi	31
Şekil 3.23 HB-I-3F-2S ve HB-I-3F-2S-SF kirişleri karşılaştırmalı yük-deplasman eğrileri ...	32
Şekil 3.24 HB-I-4F-2S ve HB-I-4F-2S-SF kirişleri karşılaştırmalı yük-deplasman eğrileri ...	32
Şekil 4.1 Beton ve FRP donatı gerilme-birim deformasyon eğrileri	34
Şekil 4.2 Kiriş kesiti, birim deformasyon ve gerilme dağılımı.....	36
Şekil 5.1 B-I-4F kirişi yük-deplasman eğrileri	42
Şekil 5.2 HB-I-3F-2S kirişi yük-deplasman eğrileri.....	42
Şekil 5.3 HB-I-4F-2S kirişi yük-deplasman eğrileri.....	43
Şekil 5.4 HB-I-3F-2S-SF kirişi yük-deplasman eğrileri	44
Şekil 5.5 HB-I-4F-2S-SF kirişi yük-deplasman eğrileri	44

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1 Çelik lifin mekanik ve fiziksel özellikleri	10
Tablo 3.2 CFRP ve betonarme çeliği donatı özellikleri.....	10
Tablo 3.3 Kiriş numune beton karışım ağırlıkça değerleri (kg/m^3)	11
Tablo 3.4 Kiriş numune donatıları	12
Tablo 4.1 Çelik lifli beton modeli parametreleri (f_c MPa) (Hsu 1992, ve Hsu ve Hsu 1992). 36	
Tablo 5.1 Test edilen betonarme kirişlerin teorik ve deneysel değerlerinin karşılaştırılması..	41



KISALTMALAR

ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü (American Concrete Institute)
CFRP	: Karbon Fiber Takviyeli Polimer
CSA	: Kanada Standartlar Birliği (Canadian Standards Association)
FRP	: Fiber Takviyeli Polimer
GFRP	: Cam Fiber Takviyeli Polimer
f_c	: Beton basınç dayanımı
ϵ_{co}	: Betonun maksimum gerilmeye ulaşıldığındaki şekil değiştirme değeri
ϵ_{cu}	: Betonun en dış lifin maksimum şekil değiştirme değeri
E_f	: FRP donatının elastisite modülü
ϵ_f	: FRP donatı birim deformasyon değeri
ϵ_{fu}	: FRP donatı kopma anındaki birim uzama
f_{fu}	: FRP donatı çekme dayanımı
ϵ_{ci}	: Beton şerit şekil değiştirmesi
σ_{ci}	: Her bir beton şeridin gerilme değeri
x_{ci}	: Beton şerit ağırlık merkezinin kesit en dış lifine olan uzaklığı
ϵ_s	: Çelik donatı birim deformasyonu
ϵ_s'	: Çelik donatı basınç şekil değiştirme değeri
σ_f	: FRP donatı gerilme değeri
A_s	: Betonarme çeliği çekme donatısı alanı
A_s'	: Betonarme çeliği basınç donatısı alanı
A_f	: FRP donatı alanı
ρ_f	: FRP donatının donatı oranı
ρ_s	: Çelik donatının donatı oranı
ρ_{ef}	: Hibrit donatı oranı
ρ_{fb}	: FRP donatılı kesitin dengeli donatı oranı
ρ_{sb}	: Çelik donatılı betonarme kiriş dengeli donatı oranını
f_y	: Çelik akma dayanımı
ϵ_y	: Çelik akma birim şekil değiştirme değeri

Δ_{cr} : Çatlama yüküne karşılık gelen kiriş orta noktası deplasmanı
 P_{cr} : Çatlama yükü
 P_{test} : Deneysel taşıma kapasitesi
 P_u : Teorik taşıma gücü



1. GİRİŞ

Geleneksel betonarme yapılarda yaygın olarak kullanılan çelik donatılar, yapıların servis ömrü boyunca çevresel etkilere maruz kalmaktadır. Özellikle asidik, tuzlu veya kimyasal açıdan zorlu ortamlarda, donatının etrafındaki koruyucu beton örtüsü zamanla bozulmakta ve donatı yüzeyinde korozyon başlamaktadır. Bu süreç, donatı kesit alanının azalmasına ve dolayısıyla taşıma kapasitesinin düşmesine neden olmaktadır. Donatı hacmindeki artış, beton içinde iç gerilmeler yaratarak beton örtüsünün çatlamasına ve zamanla dökülmesine yol açar. Bu durum, sadece yapının estetik görünümünü bozmakla kalmaz, aynı zamanda yapısal bütünlüğün de tehlikeye girmesine neden olur. Özellikle deniz yapıları, köprüler, otoparklar ve kimyasal tesisler gibi zorlu çevresel koşullara maruz kalan yapılar için bu sorun daha da kritik hale gelmektedir. Korozyon sorunu nedeniyle betonarme çelik donatısına alternatif olarak, modern inşaat mühendisliğinde yeni bir malzeme olan fiber takviyeli polimer (FRP) donatılar giderek daha fazla önem kazanmıştır. FRP donatılar, cam, karbon, bazalt veya aramid gibi yüksek dayanımlı liflerin polimer reçine matrisinde birleştirilmesiyle elde edilir ve çeliğe kıyasla pek çok üstün özelliğe sahiptir. Yüksek çekme dayanımı, düşük özgül ağırlık, manyetik olmama ve en önemlisi korozyona karşı direnç gibi özellikleri sayesinde, FRP donatılar, çelik donatının yetersiz kaldığı alanlarda ideal bir çözüm sunmaktadır. Başlangıçta havacılık ve savunma sanayisi gibi ileri teknoloji gerektiren sektörlerde kullanılan bu malzemeler, 1980'li yıllardan itibaren inşaat mühendisliği uygulamalarında da yer bulmaya başlamıştır. Günümüzde, deniz suyu ve buz çözücü tuzlar gibi aşındırıcı maddelerin bulunduğu ortamlarda, FRP donatılar kullanılarak inşa edilen yapılar daha uzun ömürlü ve daha az bakım gerektiren çözümler sunmaktadır.

Ancak, FRP donatıların tek başına kullanıldığı sistemlerde bazı önemli dezavantajlar da bulunmaktadır. Mekanik açıdan FRP donatılar, yük etkisi altında tamamen elastik davranış sergiledikleri için betonarme yapılarda arzu edilen sünekliği tam olarak sağlayamamaktadırlar. Ayrıca, çeliğe kıyasla daha düşük elastisite modülüne sahip olmaları, elemanda yük altında daha büyük sehimlere ve daha geniş çatlaklara neden olabilmektedir. Bu durum, özellikle servis yükleri altında davranış bakımından kritik duruma gelebilmektedir. Bunlara ek olarak, FRP donatıların yangına karşı dayanımının çeliğe göre daha sınırlı olması nedeniyle, yapılarda donatı olarak sadece FRP donatı ile tasarım mekanik açıdan kısıtlayıcı bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle, sadece FRP donatı kullanılarak

oluşturulan betonarme elemanlar, geleneksel elik donatının sunduğu süneklik ve enerji sönümlleme kapasitesini tam olarak karşılayamamaktadır.

Bu durumun üstesinden gelmek için ve her iki malzemenin de avantajlarından faydalanmak amacıyla, FRP ve elik donatıların birlikte kullanıldığı hibrit sistemler son yıllarda inşaat mühendisliği araştırmalarının odağı haline gelmiştir. Bu yaklaşım, çeliğin sünek davranışı, yüksek elastisite modülü ve enerji sönümlleme kapasitesi ile FRP donatının korozyon direnci ve yüksek çekme dayanımını bir araya getirmeyi amaçlamaktadır. Hibrit donatılı betonarme kirişler, hem korozyona karşı yüksek direnç göstermekte hem de yeterli sünekliği ve enerji sönümlleme kapasitesini koruyarak daha dengeli ve güvenilir bir yapısal performans sunma potansiyeline sahip olmaktadırlar. Sunulan tez çalışması kapsamında, hibrit FRP ve elik donatılı betonarme kirişlerin dört nokta yükleme altında deneysel ve teorik davranışı incelenmiştir. Test edilen kirişlerin eğilme kapasitesi, yük-deplasman davranışı ve süneklik gibi özellikleri ele alınarak hibrit FRP ve elik donatılı betonarme kirişlerin davranışı sunulmuştur.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, literatürde yer alan bir takım FRP donatılı ve hibrit FRP-çelik donatılı betonarme elemanlar üzerine yapılmış çalışmalara yer verilmiştir.

Abdelkarim, Ahmed, Mohamed, ve Benmokrane (2019) cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) donatı ile güçlendirilmiş normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin eğilme davranışlarını, servis performanslarını ve süneklik kapasitelerini kapsamlı deneysel ve analitik çalışmalarla incelemiştir. Toplam sekiz kiriş numunesi, iki noktalı eğilme testi ile kırılmaya kadar test edilmiştir. Deneyler sırasında gerinim, eğilme momenti, çatlak açıklığı, sehim ve süneklik gibi kritik parametreler detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Donatı oranının artması, servis momenti üzerinde nihai momentten daha belirgin bir etkiye sahiptir. GFRP çubuk çapının büyümesi ise çatlak genişliğinde artışa yol açmıştır. Yüksek dayanımlı beton, çatlak sayısını artırırken açıklıkların azaltmakta, sehimleri düşürmekte ve çatlama sonrası rijitliğini yükseltmektedir. Mevcut süneklik kavramlarının GFRP donatılı kirişler için yetersiz olduğu gözlemlenmiş ve bu doğrultuda, eğrilik tabanlı yeni bir süneklik indeksi geliştirilmiştir. Bu indekste servis sınırı, GFRP donatı gerinimi $2000\mu\epsilon$ ve çatlak genişliği 0.5 mm olarak belirlenmiştir. Analizler, yüksek dayanımlı betonun sünekliği anlamlı biçimde artırdığını ortaya koymuştur.

Deng, Zhong, Liu, ve Wen (2022) korozyon riskinin yüksek olduğu ortamlarda çelik donatıya alternatif olarak karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) çubukların betonarme kirişlerdeki eğilme davranışını incelemiştir. Çalışmada farklı beton dayanımlarına (C20 ve C30) ve donatı oranlarına sahip 12 adet kiriş numunesi dört nokta eğilme testine tabi tutulmuştur. Servis sınırlarında kirişlerin taşıma kapasitesi toplam kapasitenin yalnızca %47–61'ine ulaşabilmiştir. Çalışmada ayrıca, nihai eğilme kapasitesini tahmin eden bir tasarım formülü önerilmiş ve bu modelin deneysel verilerle yüksek uyum gösterdiği tespit edilmiştir.

Ünal (2022) Tasarlanmış çimento esaslı kompozit (ECC) içeren GFRP donatılı betonarme kirişlerin eğilme davranışını incelemek amacıyla deneysel ve teorik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Farklı ECC derinliklerine ve donatı oranlarına sahip toplam 6 kiriş numunesi hazırlanarak dört nokta eğilme testine tabi tutulmuştur. %2 polipropilen lif içeren

ECC malzemesi, özellikle çekme bölgesinde deformasyon kapasitesi ve çatlak kontrolü açısından değerlendirilmiştir. Deneysel bulgular, ECC'nin çatlak yayılımını kılcal düzeyde sınırlayarak çoklu çatlak oluşumu sayesinde kiriş sünekliğini belirgin biçimde artırdığını göstermiştir. Örnek olarak tamamı ECC içeren kirişte, normal betonlu kirişe göre taşıma gücünün arttığı ve daha fazla deplasman kapasitesi elde edildiği belirtilmiştir. ECC derinliği arttıkça taşıma gücü, sehim ve donatı gerinimi değerleri de artış göstermiştir. Bu çalışma, ECC'nin sadece süneklik değil, aynı zamanda enerji sönümleme kapasitesi bakımından da FRP donatılı kiriş performansını artırdığını ortaya koyarak, betonarme tasarımında alternatif matris-donatı sistemlerine dair önemli bir katkı sunmuştur.

Gürler (2023) GFRP donatı içeren çelik lifli betonarme kirişlerin eğilme altında davranışını araştırmıştır. Çalışma kapsamında kiriş numuneler hazırlayarak dört nokta yükleme testi altında test etmiştir. Yapılan deneylerde GFRP donatılı çelik lifli betonarme kirişlerin çatlak dağılımı, çatlak ilerlemesi, kirişlerin taşıma gücü ve yük-deplasman davranışı incelenmiştir. Çalışmada, çelik liflerin kiriş davranışına olan etkileri araştırılmış ve çelik liflerin kirişlerin deplasman, süneklik ve çatlak davranışını önemli düzeyde etkilediği belirlenmiştir. Test edilen kirişlerin yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Kirişler analiz edilerek sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçların uyum içinde olduğu belirlenmiştir.

Yoo, Banthia, ve Yoon (2016) tarafından yapılan çalışmada, cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) donatılar ve hibrit donatılar (çelik + GFRP) ile güçlendirilmiş ultra yüksek performanslı fiber takviyeli beton (UHPFRC) kirişlerin eğilme davranışları incelenmiştir. Farklı donatı oranlarına sahip üç GFRP donatılı ve dört hibrit donatılı kiriş üretilerek dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Yapılan deneysel çalışmalarda tüm kirişlerin çatlama sonrası oldukça rijit yük-sehim davranışı sergilediği ve servis çatlak genişliği kriterlerini karşıladığı belirlenmiştir. Araştırmada, GFRP donatı oranının artırılmasının çatlak sonrası rijitlik, taşıma kapasitesi ve süneklik üzerinde olumlu etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Hibrit donatı sistemlerinde, çelik donatının katkısı ile çatlak sonrası rijitlik ilk etapta daha yüksek olsa da, çeliğin akmasından sonra bu avantaj kaybolmuş ve süneklik düzeyi saf GFRP donatılı sistemlere göre düşük kalmıştır. Sonuç olarak, GFRP donatılı UHPFRC kirişlerin, geleneksel FRP donatılı betonarme sistemlerin düşük rijitlik ve geniş çatlak açıklığı gibi zayıf yönlerini iyileştirdiği vurgulanmıştır. Ancak hibrit donatı kullanımının bu avantajları tam anlamıyla koruyamadığı, üstelik kesit içi gerilme dağılımında sorunlar yaratabileceği ifade edilerek,

sadece GFRP donatı ile birlikte UHPFRC kullanımının daha avantajlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Lu ve diğerleri (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) ve çelik donatının birlikte kullanıldığı hibrit donatılı çelik elyaf katkılı beton (SC) kirişlerin eğilme davranışı dört nokta eğilme testi ile incelenmiştir. Yedi SC kiriş üzerinde yapılan deneylerde, çatlama momenti, nihai taşıma kapasitesi, kırılma modu, çatlak davranışı ve sehim değerleri değerlendirilmiştir. Ayrıca sonuçlar daha önce aynı donatıya sahip düz beton (PC) kirişler ile karşılaştırılmıştır. Araştırma sonucunda, hibrit donatılı SC kirişlerin çatlama yükünün düşük, taşıma kapasitesinin ise yüksek olduğu görülmüştür. Kırılma modlarının; çelik donatının akması ve betonun ezilmesi (SY-CC) ile çelik donatının akması, betonun ezilmesi ve GFRP donatının kopması (SY-CC-GF) şeklinde geliştiği, GFRP çubuğunun kopmaması için minimum donatı oranının gerekli olduğu tespit edilmiştir. SC kirişlerdeki çelik lif katkısı sayesinde çatlama momentinde ortalama %35'lik artış gözlenmiş, nihai momentlerin ise PC kirişlere göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada hibrit donatılı betonarme kirişler için iki farklı dengeli donatı oranı tanımlanmış ve güvenli kırılma davranışı sağlayacak şekilde optimize edilmiştir.

Maranan ve diğerleri (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) ve çelik donatıların birlikte kullanıldığı hibrit donatılı geopolimer betonarme kirişlerin eğilme davranışı dört noktalı eğilme deneyiyle incelenmiştir. Çalışma kapsamında farklı GFRP-çelik donatı oranlarına ve düzenlemelerine sahip yedi adet kiriş üretilmiş ve kırılma anına kadar test edilmiştir. Yalnızca GFRP donatıya sahip kirişlerle karşılaştırıldığında, hibrit donatılı kirişlerin daha yüksek süneklik, daha iyi hizmet kabiliyeti ve yaklaşık %15'e kadar daha yüksek eğilme dayanımı gösterdiği belirlenmiştir. Üstte çelik ve altta GFRP donatının birlikte kullanıldığı konfigürasyonlarda, yalnızca çekme bölgesinde hibrit donatı bulunan kirişlere göre daha yüksek rijitlik ve beton ezilmesinde daha iyi performans elde edilmiştir. Ayrıca geopolimer beton kirişlerin, benzer şekilde donatılmış normal beton kirişlere kıyasla daha yüksek eğilme momenti kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir. Çalışma sonunda; donatı oranının artmasının süneklik ve sehim kapasitesini artırdığı, GFRP miktarındaki artışın ise özellikle yüksek dayanımlı betonlarda yapısal kapasiteyi belirgin ölçüde iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır. ACI 440.1R-15 ve CSA S806-12 standartlarının, hibrit kirişlerin eğilme kapasitesi ve orta açıklık sehimlerini yeterli güvenlik

marjıyla tahmin ettiği ancak basınç donatısı katkısı dikkate alındığında doğruluğun artırılabilceğı belirtilmiştir.

Lau ve Pam (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, cam elyaf takviyeli polimer (FRP) donatılı betonarme kirişlerdeki düşük süneklik sorununu çözmek amacıyla, çelik donatı ilavesiyle oluşturulan hibrit FRP donatılı beton (FRPRC) kirişlerin eğilme davranışları incelenmiştir. Bu kapsamda, düz beton kirişler, yalnızca çelik donatılı kirişler (SRC), yalnızca FRP donatılı kirişler ve hibrit FRPRC kirişlerden oluşan toplam 12 numune hazırlanmış ve dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda, hibrit FRPRC kirişlerin yalnızca FRP donatılı kirişlere kıyasla daha sünek bir davranış sergilediğı belirlenmiştir. Özellikle çelik donatı ilavesi ve aşırı donatı düzeyine sahip tasarımlarda, süneklik önemli ölçüde artmıştır. Ayrıca, FRPRC sistemlerin sünekliğinin artırılmasında geleneksel çelik donatı kullanımının ve yüksek donatı oranlarının etkili stratejiler olduğu vurgulanmıştır. Deneyisel bulgular, ACI 440.1R-06 standardında belirtilen minimum FRP donatı gereksiniminin yaklaşık %25 oranında azaltılabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, aşırı donatılı örneklerde 135° kancalı etriyelerin, 90° kancalı olanlara kıyasla yer değiştirme sünekliğinde %77'ye varan iyileşme sağladığı rapor edilmiştir. Ancak bu geometrik farkın eğilme dayanımı üzerinde belirgin bir etkisi bulunmamıştır. Sonuç olarak, çalışmada hibrit FRPRC kirişlerin sünekliğini artırmaya yönelik kapsamlı bir deneysel analiz sunulmuş ve sahada uygulanabilir tasarım ilkeleri önerilmiştir. Elde edilen veriler, hibrit sistemlerin, FRP donatılı beton elemanların kullanımında süneklik eksikliği nedeniyle yaşanan sınırlamaların aşılmasında etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur.

Tarawneh ve diğerleri (2023) hibrit FRP/çelik donatıya sahip betonarme kirişlerin eğilme kapasitesini değerlendirmek amacıyla kapsamlı bir veri tabanı oluşturmuş ve bu veriler üzerinden güvenilirlik temelli bir kalibrasyon çalışması gerçekleştirmiştir. Çalışma kapsamında, dünya genelinde dört nokta eğilme testi ile kırılmaya kadar test edilmiş toplam 136 hibrit betonarme kiriş incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, teorik kırılma modları ile karşılaştırılmış ve “çelik akması–beton ezilmesi” kırılma moduna sahip numunelerde teorik moment tahminlerinin deneysel verilerle uyumlu olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, ACI 440.1R-15 standardına uygun şekilde, taşıma kapasitesine ait dayanım azaltma katsayısının belirlenmesine yönelik Monte Carlo simülasyonuna dayalı bir güvenilirlik analizi yapılmıştır. Güvenilirlik indeksinin $\beta = 3.5$ olması hedeflenmiş ve buna karşılık önerilen katsayı $\phi = 0.80$

olarak belirlenmiştir. Çalışma, mevcut standartlarda hibrit FRP/çelik donatılı sistemler için özel tasarım hükümlerinin yetersizliğine dikkat çekmiş ve teorik tasarım modellerinin doğruluğunu istatistiksel olarak değerlendirmiştir. Bu yönüyle çalışma, hibrit donatılı betonarme elemanların eğilme altındaki davranışlarının daha güvenli şekilde tasarlanabilmesi için önemli bir referans sunmaktadır.

Yang, Pan, Wu, ve Cao (2021) hibrit fiber takviyeli polimer (FRP) ve çelik donatı ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme davranışını incelemişlerdir. Çalışmada, FRP ve çelik donatıyı tek bir eşdeğer malzeme olarak kabul eden gerilme-şekil değiştirme modeli geliştirilmiş ve bu modelin doğruluğu deneysel testlerle araştırılmıştır. Üç adet hibrit betonarme kiriş, dört noktalı eğilme yüklemesine tabi tutulmuş, taşıma kapasitesi, sehim, çatlak gelişimi ve süneklik performansı analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar, önerilen modelin hibrit kirişlerin kırılma modlarını ve eğilme kapasitesini başarıyla tahmin ettiğini göstermiştir. Ayrıca, düşük FRP/çelik oranlarında yüksek süneklik sağlandığı, çelik donatı miktarının artırılmasının akma yükünü yükselttiği ve kesit yüksekliği ile FRP şekil değiştirme kapasitesinin artırılmasının kiriş performansını olumlu etkilediği tespit edilmiştir. Bu çalışma, hibrit FRP-çelik donatılı betonarme kirişlerin tasarımında güvenilir ve uygulanabilir bir analiz yöntemi sunmaktadır.

Yapılan çalışmalarda yüksek dayanıma sahip beton içeren ve yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülü özelliği gösteren FRP malzemelerden oluşan hibrit FRP-çelik kirişler üzerine çalışmaların sınırlı olduğu ve bu kapsamda daha fazla araştırma çalışmalarının literatüre önemli katkı sağlayacağı anlaşılmaktadır.

Kartal (2020) hibrit FRP-çelik donatılı betonarme kirişlerin eğilme davranışına lifli polimer donatı oranının etkisini araştırmak amacıyla deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, farklı FRP donatı oranlarına sahip toplam 5 kiriş numunesi hazırlanarak dört nokta eğilme testine tabi tutulmuştur. Numunelerde çekme bölgesinde GFRP donatılar, basınç bölgesinde ise çelik donatılar kullanılmıştır. Deneysel veriler, GFRP donatı oranının artmasıyla birlikte kirişlerin taşıma gücünde ve deformasyon kapasitesinde artış yaşandığını göstermiştir. Özellikle yüksek FRP oranına sahip kirişlerde çatlak ilerlemesi daha kontrollü şekilde gerçekleşmiş ve daha sünek bir kırılma davranışı gözlemlenmiştir. Hibrit donatı kombinasyonunun, geleneksel donatı düzenlerine kıyasla rijitliği artırarak enerji yutma

kapasitesini yükselttiği tespit edilmiştir. Bu çalışma, GFRP ve çelik donatıların birlikte kullanımının kirişlerin eğilme performansını olumlu yönde etkilediğini ortaya koyarak, hibrit donatılı betonarme elemanların yapısal tasarım açısından potansiyelini vurgulamaktadır.

Nguyen, Dang, ve Vu (2020) GFRP ve çelik donatılardan oluşan hibrit donatılı betonarme kirişlerin eğilme davranışını incelemek amacıyla deneysel ve analitik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Farklı kiriş numuneleri üzerinde yapılan dört nokta eğilme testlerinde, donatı oranı ve yerleşiminin yapısal performansa etkisi değerlendirilmiştir. Deneysel veriler, çelik donatının akma yaptığı ancak GFRP donatının kopmadığı durumda en uygun sünekliğin elde edildiğini göstermiştir. Ayrıca, taşıma gücü ile ilk çatlak yükü gibi parametrelerin teorik analizlerle yüksek oranda uyum sağladığı belirlenmiştir. GFRP donatı oranının artırılmasıyla kiriş rijitliğinin ve deformasyon kapasitesinin yükseldiği, çelik donatı ile birlikte kullanıldığında ise ani kırılma riskinin azaldığı gözlemlenmiştir. Çalışma, hibrit donatılı sistemlerin eğilme performansını iyileştirerek taşıma gücü, süneklik ve çatlak kontrolü açısından avantaj sağladığını ortaya koymuştur.

Bozdoğan ve Tokgöz (2025 hibrit FRP-çelik donatılı betonarme kirişlerin eğilme davranışını incelemek amacıyla teorik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Farklı donatı oranlarına, kesme açıklıklarına ve FRP donatı türlerine sahip kiriş numuneleri dört nokta yüklemesi altında detaylı analize tabi tutulmuştur. Kirişlerin çekme bölgesinde GFRP donatı, iç bölgelerde ise çelik donatı kullanılarak oluşturulan hibrit sistemin süneklik ve taşıma gücü üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Bulgular, donatı oranı arttıkça taşıma gücünün yükseldiğini; kesme açıklığı azaldıkça kirişin yük taşıma kapasitesinde artış meydana geldiğini göstermiştir. Ayrıca, GFRP yerine CFRP donatı kullanılması durumunda analiz edilen kirişte taşıma kapasitesinde %43'ü aşan artış sağlandığı belirlenmiştir. Teorik analizler ile literatürde yer alan deneysel sonuçlar büyük oranda uyumlu bulunmuş, hibrit sistemin rijitlik, deplasman kapasitesi ve kontrollü kırılma açısından önemli avantajlar sunduğu ortaya konulmuştur. Bu çalışma, hibrit FRP-çelik donatı kullanımının betonarme kirişlerin eğilme performansını geliştirmede etkili bir yaklaşım olduğunu göstermiştir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Sunulan tez çalışmasında, dört nokta yüklemesine maruz çelik lifsiz ve %0.75 hacimsel oranında CFRP donatılı ve hibrit CFRP-çelik donatılı betonarme kirişlerin davranışı ele alınmıştır. Çalışma kapsamında beş adet kiriş numunesi üretilmiş ve test edilmiştir. Çelik lifli kirişlerde 5D tipi çelik lifler kullanılmıştır. Deneysel çalışmada kiriş numunelerinin taşıma gücü ve yük-deplasman eğrileri belirlenmiştir. Yapılan çalışmada, kirişlerin davranışı gözlemlenmiş ve çelik liflerin kiriş davranışı üzerine olan etkileri araştırılmıştır.

3.1. Deneysel Çalışma

3.1.1. Malzemeler

Deneysel çalışmada, bir adet CFRP donatılı kiriş, iki adet CFRP-çelik hibrit donatılı kiriş ve iki adet %0.75 hacimsel oranda çelik lif içeren hibrit CFRP-çelik donatılı kiriş olmak üzere toplam beş adet kiriş numunesi üretilmiştir. Betonarme kirişler 150×200 mm kesit boyutlarında ve 1500 mm uzunluğunda hazırlanmıştır. Kirişlerin etkili derinliği (d) 175 mm değerindedir. Hibrit kirişlerde çekme bölgesindeki çelik donatı kesit üst noktasından 155 mm aşağıda yerleştirilmiştir.

3.1.1.1. Beton

Çalışma kapsamında hazırlanan beton karışımında Oyak Çimento firması tarafından üretilen CEM I 52.5R sınıfı çimento kullanılmıştır (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1 CEM I 52.5R sınıfı çimento

Kirişlerin üretiminde, maksimum 16 mm çapında çakıl, doğal kum ve içme suyu kullanılmıştır. Betonun işlenebilirliğini arttırmak üzere Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından üretilen süper akışkanlaştırıcı malzeme beton karışımına konulmuştur. Çelik lifli betonda Bekaert firmasının üretmiş olduğu 5D tipinde Dramix RC 65/60 BN 5D çelik lifler kullanılmıştır. Çelik lifli üretilen kirişlerde kullanılan çelik lifin mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 3.1.'de sunulmuştur.

Tablo 3.1 Çelik lifin mekanik ve fiziksel özellikleri

Çelik lif	Çelik lif görünümü	Çelik lif tipi	Narinlik oranı	Boy (mm)	Çapı (mm)	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
5D 65/60		5D	65	60	0.90	1160	200000

3.1.1.2. Donatı

Üretilen kirişlerde çekme bölgesinde 8 mm çapında (Ø8) karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) donatı ve hibrit kirişlerde 8 mm çapında betonarme çeliği kullanılmıştır. Tüm kirişlerin basınç bölgesinde 8 mm çapında betonarme çeliği bulundurulmuştur. Standart çelik donatı ve CFRP donatılarına ait mekanik özellikler Tablo 3.2'de gösterilmiştir. CFRP donatı mekanik özellikleri üretici firmadan temin edilmiştir.

Tablo 3.2 CFRP ve betonarme çeliği donatı özellikleri

Donatı	Çapı (mm)	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
CFRP	8	-	2500	165
Çelik	8	500	600	200

3.1.1. Kiriş numuneleri

Yapılan tez çalışması kapsamında, çelik lif içermeyen ve çelik lifli CFRP donatılı beş adet betonarme kiriş üretilmiştir. Bu kirişlerden biri çelik lif içermeyen CFRP donatılı kiriş, ikisi çelik lif içermeyen CFRP-çelik hibrit donatılı kiriş ve iki adeti % 0.75 hacimsel oranına sahip

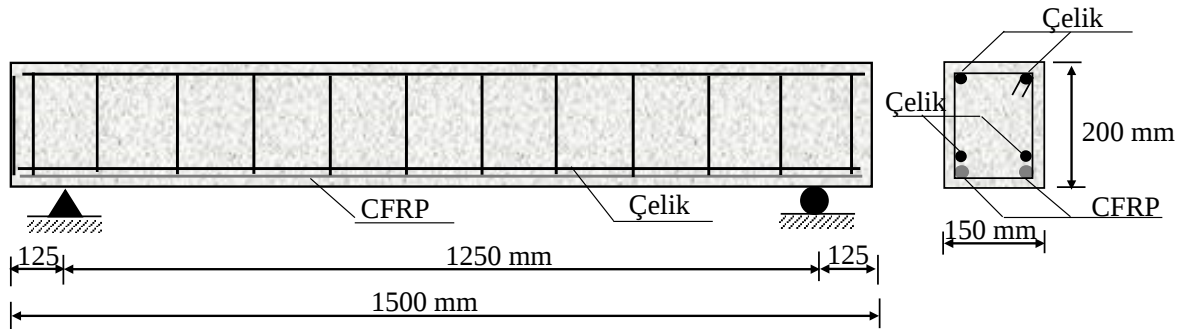
elik lifli CFRP-elik hibrit donatılı kiriş olarak üretilmiştir. Betonarme kirişlerin hazırlılığında kullanılan malzemelerin karışım oranları Tablo 3.3’de sunulmuştur.

Tablo 3.3 Kiriş numune beton karışım ağırlıkça değerleri (kg/m³)

Numune	akıl	Kum	imento	Su	Akışkan	elik lif
B-I-4F	1070	830	370	150	4	0
HB-I-3F-2S	1070	830	370	150	4	0
HB-I-4F-2S	1070	830	370	150	4	0
HB-I-3F-2S-SF	1070	810	370	150	4	59
HB-I-4F-2S-SF	1070	810	370	150	4	59

3.1.1.1. Kiriş donatıları

Sunulan tez çalışmasında hazırlanan kirişlerde 8 mm çapında CFRP donatı ve 8 mm çapında betonarme çeliği kullanılmıştır. Üretilen kirişler ACI 440.1R-15 rehberinde ve Bölüm 4’de belirtilen koşullar ile denge üstü davranış sağlayacak şekilde hazırlanmıştır. Kirişlerin donatı düzeni şekil 3.2’de gösterilmiştir. Her bir kiriş için kullanılan çekme ve basınc donatıları ise Tablo 3.4’te yer almaktadır.

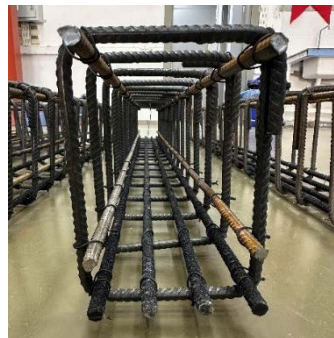
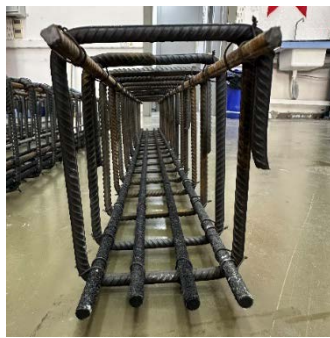


şekil 3.2 Hibrit kiriş donatı düzenlenmesi

Tablo 3.4 Kiriş numune donatıları

Numune	Çekme Donatısı	Basınç Donatısı
B-I-4F	4Ø8 CFRP	2Ø8 çelik
HB-I-3F-2S	3Ø8 CFRP+2Ø8 çelik	2Ø8 çelik
HB-I-4F-2S	4Ø8 CFRP+2Ø8 çelik	2Ø8 çelik
HB-I-3F-2S-SF	3Ø8 CFRP+2Ø8 çelik	2Ø8 çelik
HB-I-4F-2S-SF	4Ø8 CFRP+2Ø8 çelik	2Ø8 çelik

Hazırlanan kirişlerin tamamında 8 mm çapında çelik etriye donatısı 80 mm aralıklı olarak düzenlenmiştir (Şekil 3.3). CFRP donatılı betonarme kirişlerin tamamında çekme bölgesinde CFRP donatı orta uzunluk noktasında birim deformasyonları belirlemek amacıyla donatıya gerinim ölçer yapıştırılmıştır. Hazırlanan donatılar beton dökümü için çelik kalıp içerisine yerleştirilmiştir.



Şekil 3.3 Kiriş donatıları

3.1.1.2. Kiriş numune üretimi

Kiriş numune beton hazırlığında öncelikle, karışım oranında hazırlanan kum ve çakıl beton mikserine dökülerek karıştırılmıştır. Ardından, karışıma çimento eklenmiş ve daha sonra su ve akışkanı içeren sıvı karışım mikserde bulunan beton karışımına ilave edilmiştir. Mikser yaklaşık beş dakika karıştırılarak homojen bir karışım elde edilmiştir (Şekil 3.4.(a)). Çelik lifli beton için karışıma çelik lifler ilave edilerek çelik lifli beton üretilmiştir. Beton karışımı hazırlandıktan sonra kiriş kalıbına dökülerek vibrasyon uygulanmış ve kiriş numune hazırlığı tamamlanmıştır. Kirişlerin beton basınç dayanımının belirlenmesi üzerine karışımdan 150×300 mm standart silindir numuneler alınmıştır. Beton prizini aldıktan sonra silindir ve kiriş numuneler kalıplardan çıkarılarak laboratuvar ortamında kür edilmiştir.



(a) Lifsiz ve çelik lifli betonun hazırlanması



(b) Silindir ve prizma numuneleri



(c) Kiriş numune beton dökümü

Şekil 3.4 Kiriş numune üretimi

3.1.2. Numunelerin testi

3.1.2.1. Beton basınç testi

Çelik lifsiz ve çelik lifli beton kirişlerin beton basınç dayanımlarının belirlenmesi amacıyla silindir numunelere TS EN 12390-3 standardına uygun olarak tek eksenli basınç deneyi uygulanmıştır (Şekil 3.5). Deney sonucunda çelik lifsiz betonun ortalama basınç dayanımı 46.7 MPa, çelik lifli betonun basınç dayanımı ise 56.8 MPa olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre çelik liflerin beton basınç dayanımını bir miktar arttırdığı görülmüştür. Test edilen silindir numune deney düzeni Şekil 3.5’te sunulmuştur.

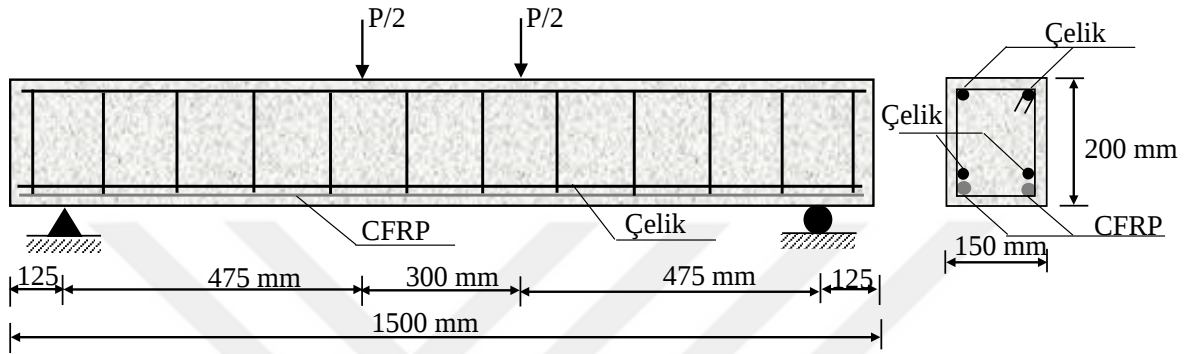


Şekil 3.5 Silindir numunelere basınç deneyi uygulanması

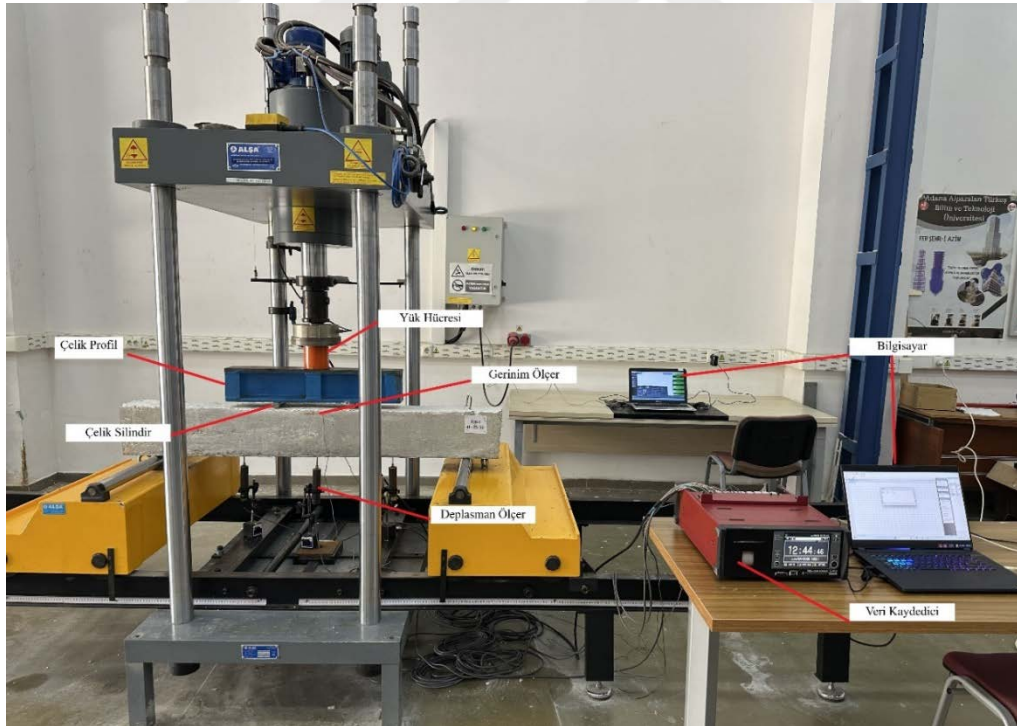
3.1.2.2. Kiriş dört nokta yükleme deneyi

Tez çalışması kapsamında üretilen çelik lifsiz ve lifli CFRP donatılı ve hibrit CFRP-çelik donatılı kirişler, eğilme davranışının belirlenmesi üzerine dört nokta yükleme testine tabi tutulmuştur (Şekil 3.6 ve 3.7). Kiriş testleri Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Yapı Laboratuvarı'nda yer alan çelik eğilme test çerçevesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada, kirişlerin yük taşıma kapasiteleri ve yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Kirişlere uygulanan yükü ölçmek üzere yükölçer kullanılmıştır. Kiriş orta nokta deplasmanını ölçmek için 50 mm kapasiteli elektronik deplasman ölçerler kiriş ortasına yerleştirilmiştir (Şekil 3.7). Bunlara ilave olarak beton basınç bölgesinde kısılmaları belirlemek için Tokyo Measuring Instruments Lab. firması tarafından üretilen beton gerinim ölçer kiriş orta noktası beton basınç bölgesine en dış life yapıştırılmıştır (Şekil 3.7). Kiriş testinde uygulanan yük ve karşılık gelen kiriş orta noktası deplasmanları ve beton ve CFRP donatıda oluşan birim deformasyonları belirlemek ve kaydetmek üzere elektronik veri toplama sistemi kurulmuştur (Şekil 3.7). Üretilen kirişler mesnetten mesnete 1250 mm olarak düzenlenmiş ve kesme açıklığı (a) 475 mm olarak seçilmiştir. Kesme açıklığı/etkili derinlik oranı (a/d) 2.71 olarak belirlenmiştir. Kiriş deney düzeneği Şekil 3.7'de sunulmuştur.

Deneyin uygulanması sırasında tatbik edilen yük ve karşılık gelen deplasmanlar ve birim deformasyonlar veri toplama sistemi sayesinde zamana bağlı olarak bilgisayara kaydedilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında test edilen kirişlerin davranışı gözlemlenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda kirişlerin yük taşıma kapasitesi ve yük-deplasman eğrileri belirlenmiştir.



Şekil 3.6 Hibrit kiriş donatı düzenlenmesi



Şekil 3.7 Kiriş eğilme test düzeneği

3.1.3. Kiriş davranışı

3.1.3.1. B-I-4F kirişi

Dört nokta yüklemesi altında test edilen B-I-4F kirişinin eğilme davranışı gözlenmiştir. Kiriş testinde ilk çatlak kiriş eksenine dik olarak, iki yük arasında, maksimum moment bölgesinde, kılcal özellikte ve 51 kN yük düzeyinde meydana gelmiş ve 2.98 mm deplasman ölçülmüştür. Yükleme sırasında 64.76 kN yük değerinde, iki yük arasında bulunan çatlakların bir miktar ilerlediği fakat kılcal düzeyde olduğu görülmüştür. 80 kN yük seviyesinde, 5.30 mm deplasmanda ilk kesme çatlağının meydana geldiği ve bu çatlağın simetrisi olan bir diğer kesme çatlağının ise 85 kN seviyesinde oluştuğu gözlenmiştir. 93.06 kN yük değerinde ilk oluşan eğilme çatlağının ve diğer eğilme çatlaklarının kılcal düzeyde olduğu ve bir miktar ilerledikleri görülmüştür. 108 kN yük değerinde kesme çatlaklarının kılcal düzeyde olduğu ve ilerleme yönünün yüklerin uygulama noktalarına doğru olduğu belirlenmiştir. 111 kN yük değerinde ilk oluşan simetrik kesme çatlaklarının ilerlediği gözlemlenmiştir (Şekil 3.8(b)). 118 kN yük değerinde iki yük arasında bulunan bazı eğilme çatlaklarının kollara ayrılmaya başladığı gözlemlenmiştir. 127 kN yük değerinde, mesnete yakın bölümde kesme çatlaklarının oluştuğu gözlemlenmiştir. 138 kN yük değerinde eğilme çatlaklarında yeniden kollara ayrılmaların oluştuğu ve çatlakların kılcal düzeyde olduğu görülmüştür. Kirişte oluşan kesme çatlağının 149 kN yük seviyesinde yükün uygulama noktasına doğru ilerlediği tespit edilmiştir (Şekil 3.8(b)). 165 kN yük seviyesinde eğilme çatlaklarının bir miktar genişlemeye başladığı kesme çatlaklarının ise hala kılcal düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Uygulanan yükün 182 kN seviyesinde betonda ezilmenin başladığı, 197 kN yük altında eğilme çatlağının betonda ezilme yaşanan yük uygulama noktasına doğru ilerleme kaydettiği ve 252 kN yük altında betonda basınç bölgesinde ezilme meydana geldiği, eğilme ve kesme çatlaklarının genişlediği ve kirişin taşıma gücü kapasitesine ulaştığı tespit edilmiştir. Bu aşamadan sonra deney sonlandırılmıştır. Taşıma gücü anında kirişin orta noktasında 19 mm deplasman oluştuğu tespit edilmiştir. B-I-4F kirişine ait deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafları Şekil 3.8’de verilmiştir.



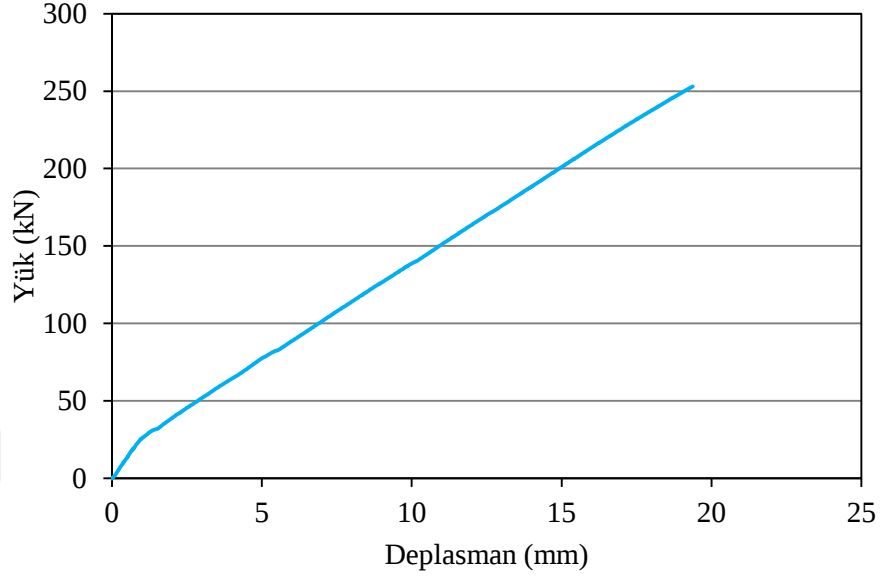
(a) B-I-4F kirişinin kırılmadan önceki görünümü



(b) B-I-4F kirişinin kırıldıktan sonraki görünümü

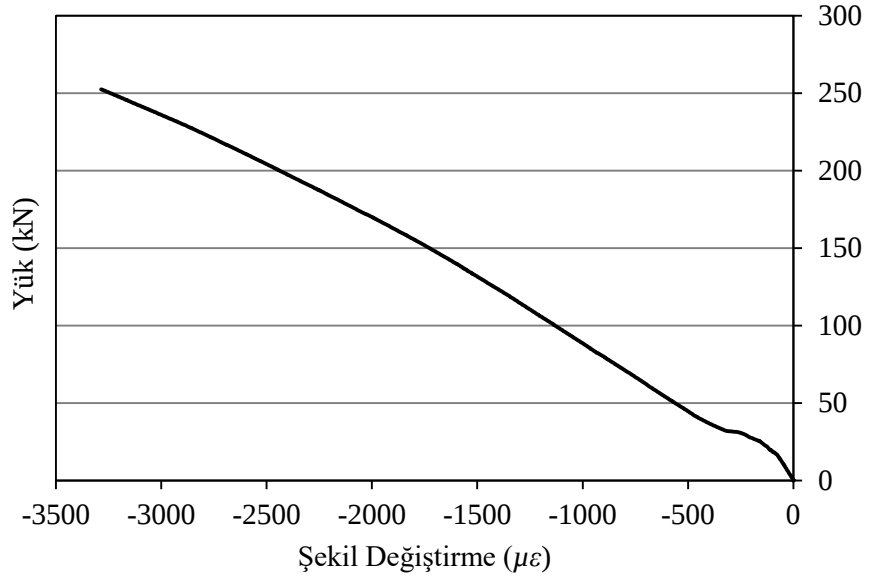
Şekil 3.8 B-I-4F kirişi dört nokta eğilme deneyi

B-I-4F kirişı deneyinde uygulanan yük ve kiriş orta noktasında okunan deplasman değerleri sonucu elde edilen deneysel yük-deplasman eğrisi Şekil 3.9'da sunulmuştur.



Şekil 3.9 B-I-4F numunesi deneysel yük-deplasman eğrisi

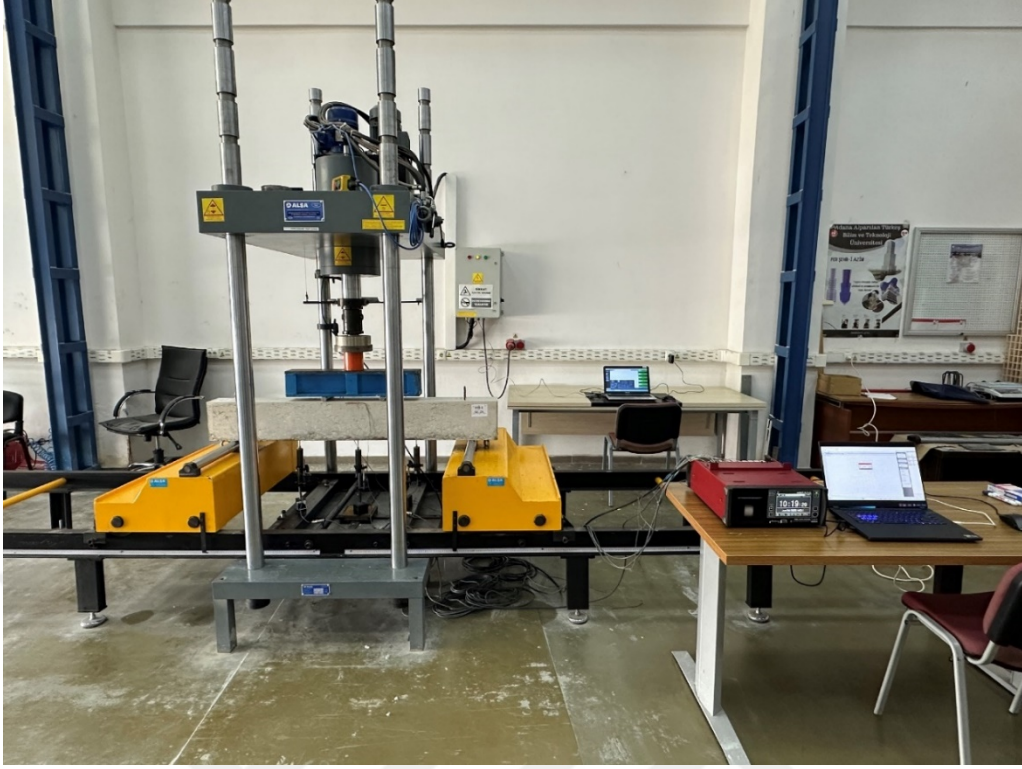
B-I-4F kiriş numunesi yük-beton birim kısalma grafiği Şekil 3.10'da görülmektedir.



Şekil 3.10 B-I-4F kiriş yük-beton birim deformasyon eğrisi

3.1.3.2. HB-I-3F-2S kirişı

Dört nokta yüklemesi altında test edilen HB-I-3F-2S kirişinin deneysel eğilme davranışı gözlenmiştir. Kiriş testinde ilk çatlak kiriş eksenine dik olarak, iki yük arasında, maksimum moment bölgesinde, kılcal özellikte ve 45 kN yük düzeyinde meydana gelmiş ve 2.21 mm deplasman oluşmuştur. Bu aşamadan sonra 78 kN yük düzeyinde iki yük arasında oluşan ilave kılcal eğilme çatlakları gözlenmiştir. Yükün artması ile yeni eğilme çatlakları oluşmuş ve kirişte 100 kN yük değerinde ilk kesme çatlağının kılcal düzeyde olduğu tespit edilmiştir. 107 kN yük düzeyinde ilk oluşan kesme çatlağının simetriği olan kesme çatlağının olduğu görülmüştür. 120 kN yük değerinde iki yük arasında bulunan eğilme çatlaklarının bir miktar ilerlediği, 125 kN yük değerinde simetrik olarak oluşan kesme çatlaklarının yüklerin uygulanma noktasına doğru ilerledikleri görülmüştür (Şekil 3.11(b)). Kirişte 139 kN yük düzeyinde iki yük arasında olan eğilme çatlaklarının bir miktar daha genişlediği, kılcal düzeyin bir miktar üzerinde olduğu, kesme çatlaklarının ise kılcal düzeyde ilerlemeye devam ettiği tespit edilmiştir. Kirişin 172 kN yük değerinde eğilme çatlağının kirişin basınç bölümüne doğru ilerlediği, 176 kN yük düzeyinde kirişte yeni bir kesme çatlağı olduğu gözlenmiştir. Kirişte 180 kN yük değerinde betonda basınç bölgesinde bir miktar ezilme olduğu görülmüştür. Bu yük düzeyinde kesme çatlaklarının kılcal düzeyde, eğilme çatlaklarının ise belirgin düzeyde ilerlemiş durumda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.11(b)). Test edilen kirişin 196 kN yük düzeyinde mesnete yakın kesme çatlağı bir miktar ilerlediği fakat hala kılcal düzeyde olduğu görülmüştür. İki yük arasında bulunan eğilme çatlakları belirgin bir şekilde genişlemiş durumda olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.11(b)). 203 kN yük düzeyinde eğilme çatlağının yüke doğru ilerlemiş durumda olduğu görülmüştür. 211 kN yük değerinde çatlakların kollara ayrılmaya başladığı, 218 kN yük değerinde yeni eğilme çatlaklarının olduğu gözlenmiş olup eğilme bölgesinde çatlakların yayılmış durumda olduğu görülmüştür. Eğilme çatlaklarının genişlemeye devam ettiği, kesme çatlaklarının ise kılcal düzeyde olduğu görülmüştür (Şekil 3.11 (b)). Test edilen kirişin 220 kN yük düzeyinde, eğilme çatlağının kirişin basınç bölgesine doğru ilerlediği ve kirişin basınç bölgesinde betonda daha fazla ezilmelerin meydana geldiği ve kirişin taşıma gücü kapasitesine ulaştığı tespit edilmiştir. Bu aşamadan sonra deney sonlandırılmıştır. Taşıma gücü anında 17.93 mm deplasman olduğu tespit edilmiştir. HB-I-3F-2S kirişine ait deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafları Şekil 3.11’de verilmiştir.



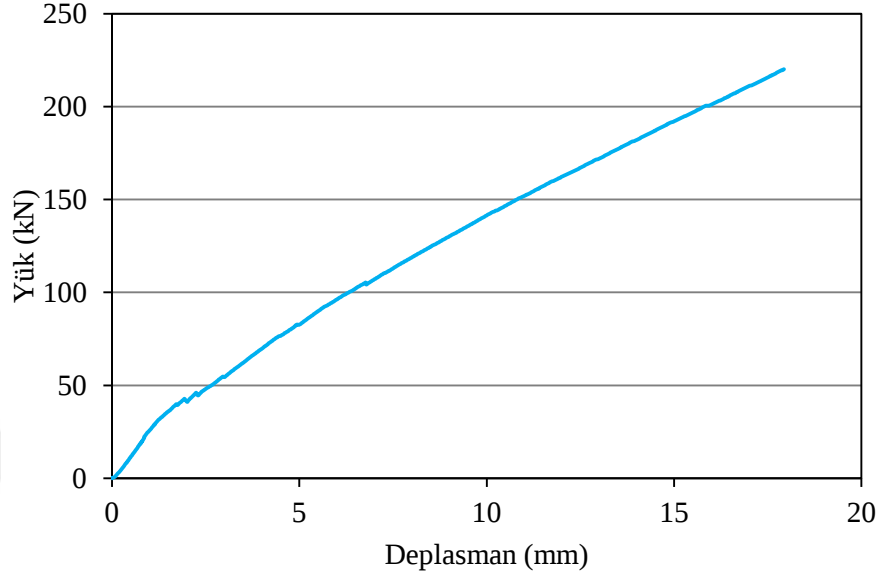
(a) HB-I-3F-2S kirişinin kırılmadan önceki görünümü



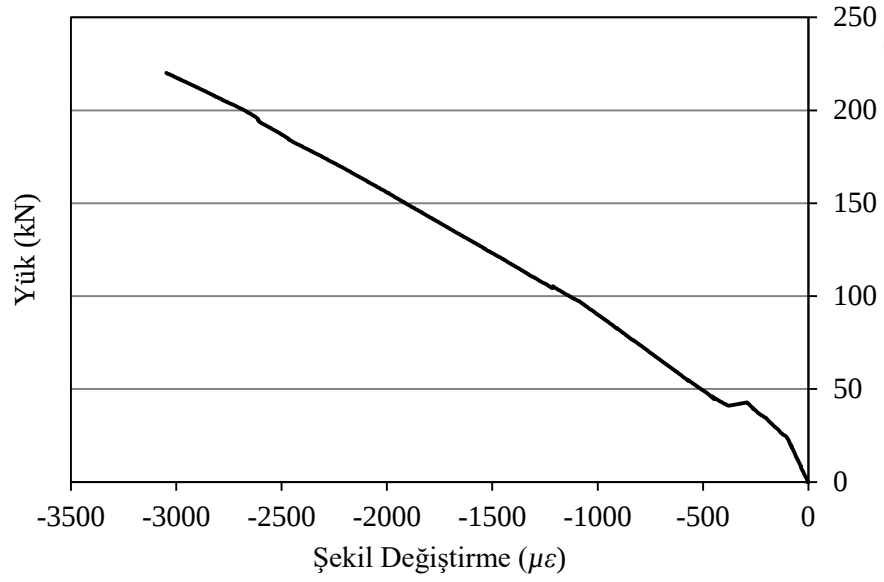
(b) HB-I-3F-2S kirişinin kırıldıktan sonraki görünümü

Şekil 3.11 HB-I-3F-2S kirişi dört nokta eğilme deneyi

HB-I-3F-2S kirişı deneysel yük-deplasman eğrisi Şekil 3.12’de, yük-beton birim deformasyon eğrisi Şekil 3.13’te sunulmuştur.



Şekil 3.12 HB-I-3F-2S kirişı deneysel yük-deplasman eğrisi



Şekil 3.13 HB-I-3F-2S kirişı yük-beton birim deformasyon eğrisi

3.1.3.3. HB-I-4F-2S kirişı

Dört nokta yüklemesi altında test edilen HB-I-4F-2S kirişinin deneysel eğilme davranışı gözlemlenmiştir. Kirişte ilk eğilme çatlağı, 50 kN yük düzeyinde, iki yük noktası arasında, maksimum moment bölgesinde oluşmuş ve 2.75 mm deplasman okunmuştur. Bu aşamadan sonra 59 kN ve 65 kN yük seviyelerinde yeni eğilme çatlakları görülmüş; bu çatlakların tamamının eğilme bölgesinde ve kılcal düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Yükün artması ile 73 kN yük seviyesinde ilk çatlağın bir miktar ilerlediği, 80 kN yük düzeyinde ilk kesme çatlağının oluştuğu ve bu çatlakların kılcal düzeyde olduğu görülmüştür. Kirişte 100 kN yük düzeyinde yeni bir kesme çatlağı tespit edilmiş, bu aşamada tüm çatlakların hâlen kılcal düzeyde olduğu gözlemlenmiştir. 110 kN yük seviyesinde, daha önce oluşmuş kesme çatlağının yükün uygulama noktasına doğru bir miktar ilerlediği tespit edilmiştir (Şekil 3.14 (b)). Artan yük ile, 118 kN’da yeni bir kılcal kesme çatlağı gözlenmiş, 128 kN yük seviyesinde ise eğilme bölgesindeki çatlaklarda basınç bölgesine doğru ilerleme görülmüştür. Deney sırasında 138 kN yük seviyesinde yeni bir kesme çatlağı oluşmuş, 148 kN yük seviyesinde ise eğilme çatlaklarının bir miktar genişlediği görülmüştür. Kirişte 153 kN ve 158 kN yük seviyelerinde yeni kesme çatlaklarının oluştuğu, mevcut çatlakların ise yükün uygulama noktasına doğru ilerlemeye devam ettiği gözlemlenmiştir. 176 kN yük düzeyinde kesme çatlaklarında kollara ayrılmalar meydana geldiği, eğilme bölgesindeki çatlakların ise bir miktar daha genişlediği ve kirişin basınç bölgesine doğru ilerlediği gözlemlenmiştir. Kirişte. 222 kN yük düzeyinde kesme çatlaklarında ilerleme oluştuğu, 235 kN’da yük uygulama noktasının altında betonda bir miktar ezilme meydana geldiği ve iki yük arasında bulunan eğilme çatlaklarının genişlediği görülmüştür. Yapılan deneyde, 245 kN yük seviyesinde kirişin basınç bölgesinde betonda daha fazla ezilmelerin meydana geldiği ve kirişin taşıma gücü kapasitesine ulaştığı tespit edilmiştir. Bu aşamadan sonra deney sonlandırılmıştır. Taşıma gücü anında 18.38 mm deplasman oluştuğu tespit edilmiştir. HB-I-4F-2S kirişine ait deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafları Şekil 3.14’te verilmiştir.



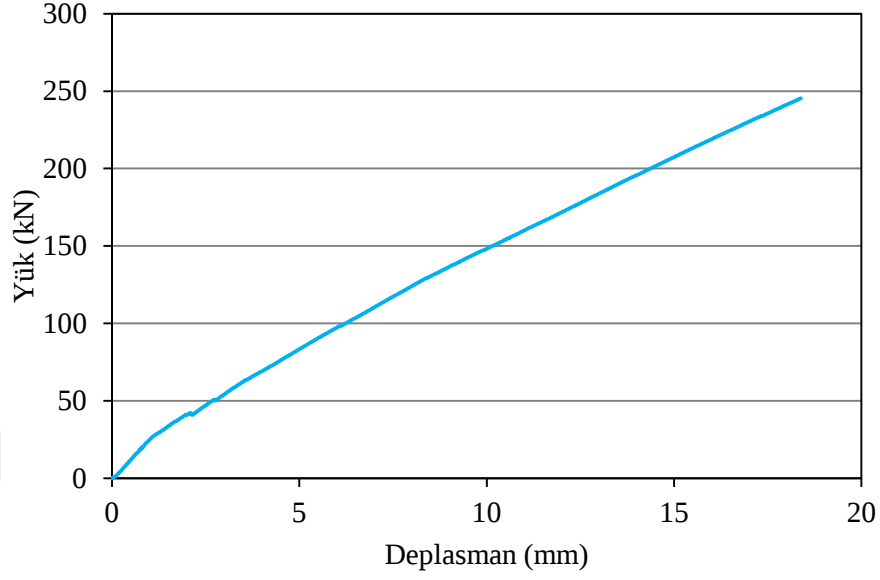
(a) HB-I-4F-2S kirişinin kırılmadan önceki görünümü



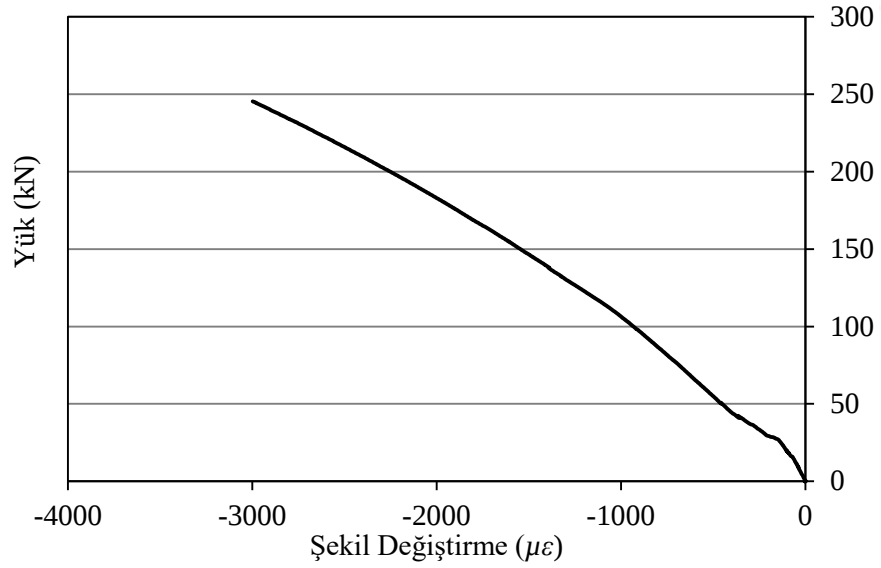
(b) HB-I-4F-2S kirişinin kırıldıktan sonraki görünümü

Şekil 3.14 HB-I-4F-2S kirişi dört nokta eğilme deneyi

HB-I-4F-2S kirişı yük ve kiriş orta noktası deplasmanı grafiği Şekil 3.15’de, yük-beton birim deformasyon eğrisi Şekil 3.16’da sunulmuştur.



Şekil 3.15 HB-I-4F-2S kirişi yük-deplasman eğrisi



Şekil 3.16 HB-I-4F-2S kirişi yük-beton birim deformasyon eğrisi

3.1.3.4. HB-I-3F-2S-SF kirişi

Dört nokta yüklemesi altında test edilen HB-I-3F-2S-SF kirişinin eğilme davranışı gözlemlenmiştir. Kirişte oluşan ilk çatlak, 45 kN yük düzeyinde, iki yük arasında, maksimum moment bölgesinde meydana gelmiş ve 2.25 mm deplasman oluşmuştur. Uygulanan yükün artması ile 62 kN ve 76 kN yük seviyelerinde yeni eğilme çatlakları görülmüştür. Kirişte 83 kN yük düzeyine ulaşıldığında, 45 kN’da oluşan ilk eğilme çatlağının bir miktar ilerleme kaydettiği, 90 kN yük düzeyinde ise yeni bir eğilme çatlağının oluştuğu gözlemlenmiştir. Test edilen kirişin 115 kN yük düzeyinde eğilme çatlaklarının ilerlediği, çatlakların eğilme bölgesine yayıldığı ve çatlak genişliklerinin kılcal düzeyde kaldığı görülmüştür (Şekil 3.17 (b)). Bu aşamada çatlakların küçük ve kılcal düzeyde kaldığı, çelik lif katkısının etkisiyle, lifsiz numuneye kıyasla kesme çatlaklarının neredeyse görünmeyecek kadar kılcal düzeyde oluştuğu tespit edilmiştir. Kirişte 142 kN yük düzeyinde eğilme çatlaklarının ilerlemeye devam ettiği, kesme çatlaklarının ise çelik liflerin katkısıyla hâlen kılcal düzeyde olduğu, 171 kN yük düzeyinde ilk belirgin kesme çatlağının oluştuğu tespit edilmiştir. Yükün artmasıyla, 185 kN yük seviyesinde eğilme çatlağının yük noktasına doğru ilerlediği tespit edilmiştir (Şekil 3.17 (b)). 195 kN yük seviyesinde betonun ezilmeye başladığı gözlemlenmiş, eğilme çatlaklarının genişliğinin kılcal düzeyin biraz üzerinde olduğu görülmüştür. Kesme çatlaklarının ise hâlen kılcal düzeyde olduğu ve genişliğinde belirgin bir artışın bulunmadığı tespit edilmiştir. Test edilen kirişte çelik lifsiz numuneye kıyasla eğilme çatlaklarının daha az genişlediği gözlemlenmiştir. Deneyde, 218 kN yük düzeyinde kesme çatlaklarının bir miktar belirginleştiği, eğilme çatlaklarının betonun basınç bölgesine doğru ilerlediği tespit edilmiştir. Yapılan deneyde, 229 kN yük seviyesinde kirişin basınç bölgesinde betonda ezilmelerin meydana geldiği ve kirişin taşıma gücü kapasitesine ulaştığı tespit edilmiştir. Bu aşamadan sonra deney sonlandırılmıştır. Taşıma gücü anında 18.49 mm deplasman oluştuğu tespit edilmiştir. HB-I-3F-2S-SF kirişine ait deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafları Şekil 3.17’de verilmiştir.



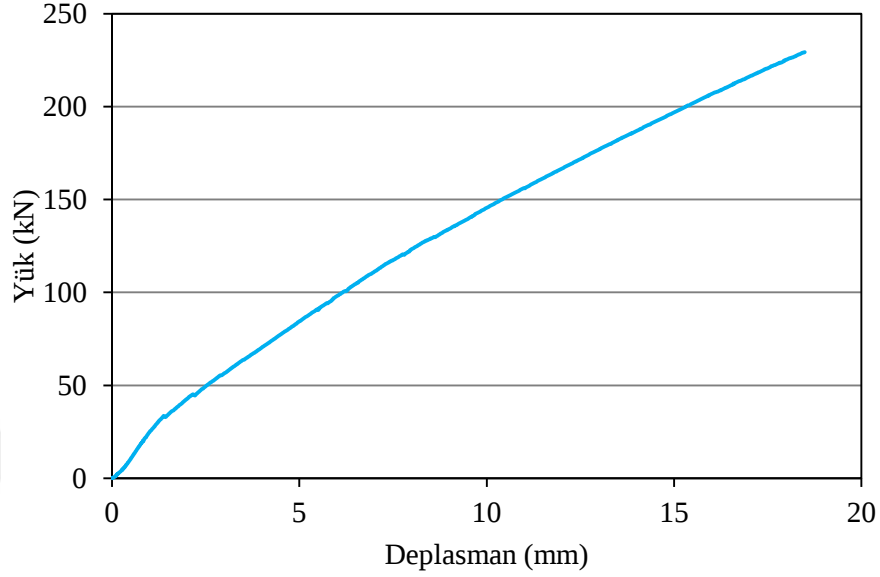
(a) HB-I-3F-2S-SF kirişinin kırılmadan önceki görünümü



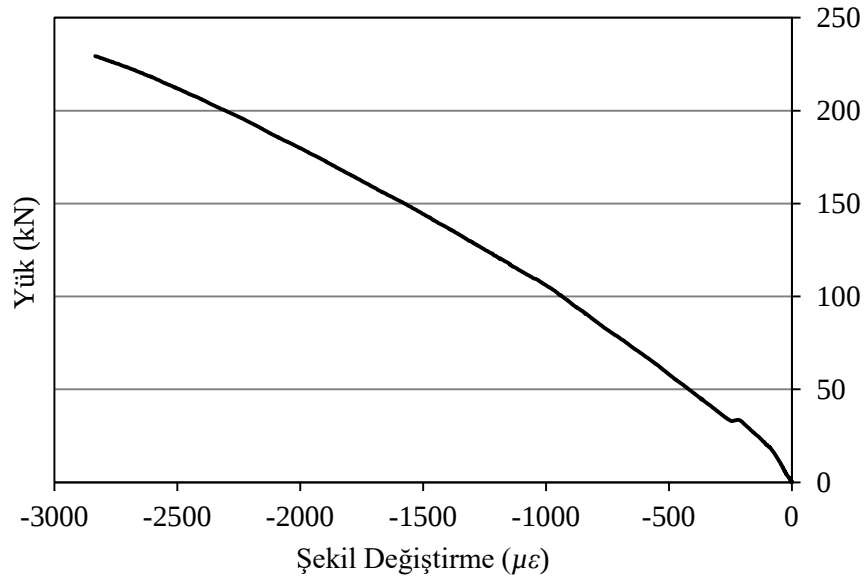
(b) HB-I-3F-2S-SF kirişinin kırıldıktan sonraki görünümü

Şekil 3.17 HB-I-3F-2S-SF kirişi dört nokta eğilme deneyi

HB-I-3F-2S-SF kirişı deneysel yük-deplasman eğrisi Şekil 3.18’de verilmiştir. Yük-beton birim deformasyon eğrisi Şekil 3.19’da sunulmuştur.



Şekil 3.18 HB-I-3F-2S-SF kirişı yük-deplasman eğrisi



Şekil 3.19 HB-I-3F-2S-SF kirişı yük-beton birim deformasyon eğrisi

3.1.3.5. HB-I-4F-2S-SF kirişı

Dört nokta yüklemesi altında test edilen HB-I-4F-2S-SF kirişinin deney sırasında eğilme davranışı gözlenmiştir. Kiriş testinde ilk eğilme çatlağı 57 kN yük düzeyinde, kiriş eksenine dik şekilde ve maksimum moment bölgesinde meydana gelmiş ve 2.9 mm deplasman oluşmuştur. Bu çatlak, kılcal düzeyde ve ilk çatlak özelliğindedir. Yükün artmasına bağlı olarak, 62 kN yük seviyesinde yeni bir eğilme çatlağı oluşmuş, çelik lif katkısının etkisiyle bu yük düzeyinde oluşan çatlakların kılcal düzeyde kaldığı gözlenmiştir. Kirişte 88 kN yük düzeyinde eğilme çatlaklarının simetrik olarak dağıldığı ve halen kılcal düzeyde olduğu, 100 kN yük seviyesinde eğilme çatlaklarında ilerleme gözlemlendiği ve çatlakların iki yük noktası arasında yayılmış durumda olduğu ve kılcal nitelikte kaldığı belirlenmiştir. Bu aşamaya kadar kesme çatlağı oluşumu belirgin şekilde gözlenmemiştir. Test edilen kirişte 144 kN yük seviyesinde ilk kesme çatlağı meydana gelmiş, 150 kN yük düzeyinde ise bu çatlağın simetriği olan kesme çatlağı diğer kesme açıklığı bölgesinde oluşmuştur (Şekil 3.20 (b)). Bu aşamadan sonra 168 kN yük seviyesinde eğilme çatlaklarının ilerlediği, 178 kN yük seviyesinde ise kesme çatlaklarında kılcal düzeyde ilerleme olduğu tespit edilmiştir. Bu yük seviyesinde eğilme çatlaklarının iki yük arasında yayıldığı görülmüş, 193 kN yük seviyesinde mesnete yakın bölgelerde oldukça kılcal düzeyde kesme çatlaklarının oluştuğu ve 200 kN yük seviyesinde eğilme çatlaklarının ilerlemeye devam ettiği görülmüştür. Kirişte 207 kN yük seviyesinde yükleme noktasına doğru yönelen yeni bir kesme çatlağı oluştuğu, 216 kN yük seviyesinde iki yükleme noktasından birinin altında betonda ezilme başladığı gözlemlenmiştir. Bu aşamada eğilme çatlakları nispeten belirgin düzeye ulaşırken, kesme çatlaklarının halen kılcal düzeyde olduğu belirlenmiştir. 226 kN yük seviyesinde, beton basınç bölgesinde betonun ezildiği ve kirişin taşıma gücü kapasitesine ulaştığı tespit edilmiştir. Bu aşamadan sonra deney sonlandırılmıştır. Taşıma gücü anında 16.62 mm deplasman oluştuğu tespit edilmiştir. HB-I-4F-2S-SF kirişine ait deney öncesi ve deney sonrası fotoğrafları Şekil 3.20’de verilmiştir.



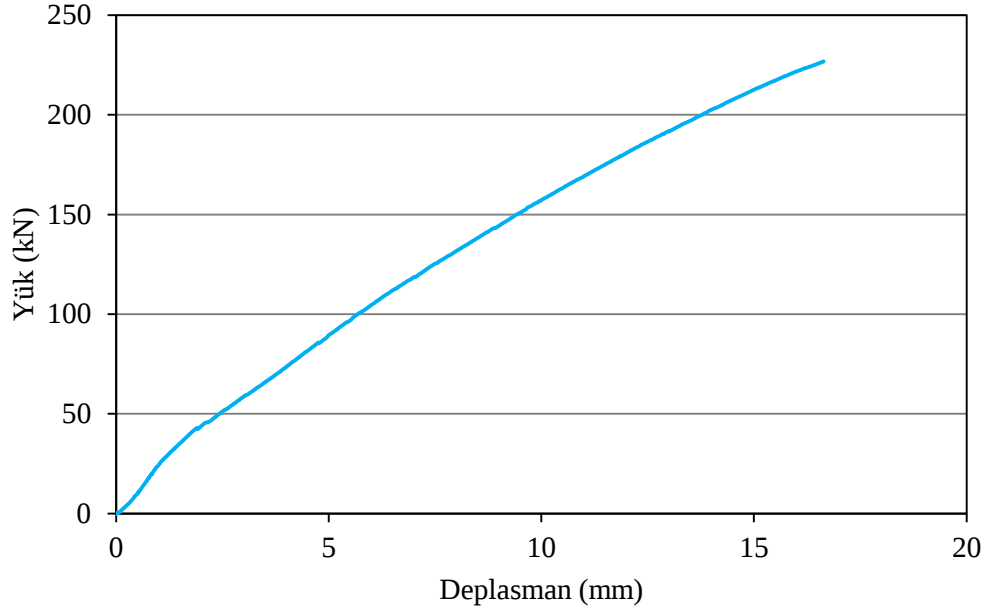
(a) HB-I-4F-2S-SF kirişinin kırılmadan önceki görünümü



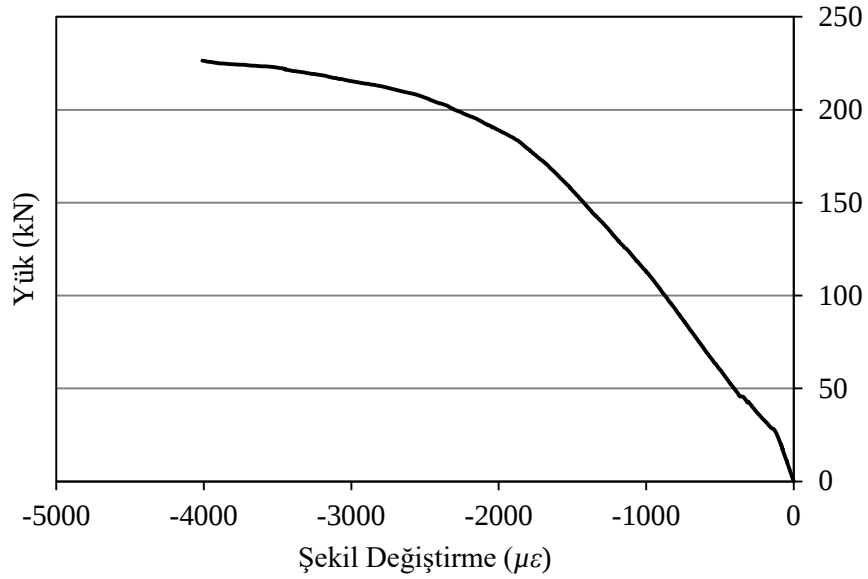
(b) HB-I-4F-2S-SF kirişinin kırıldıktan sonraki görünümü

Şekil 3.20 HB-I-4F-2S-SF kirişi dört nokta eğilme deneyi

HB-I-4F-2S-SF kiriş numunesi deneysel yük ve kiriş orta noktası deplasman değerleri ile elde edilen grafik Şekil 3.21’de sunulmuştur. Deney sırasında ölçülen yük-beton birim kısalma eğrisi Şekil 3.22’de görülmektedir.

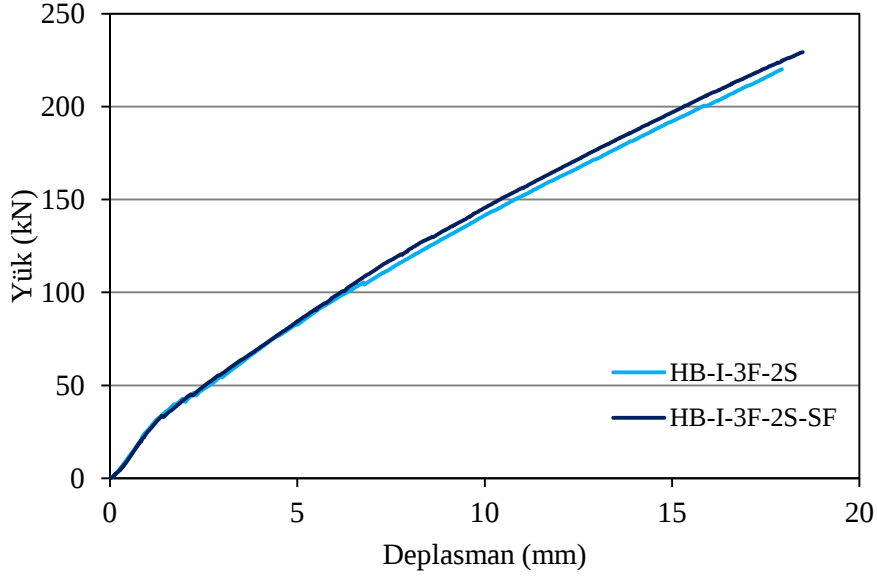


Şekil 3.21 HB-I-4F-2S-SF kirişi yük-deplasman eğrisi

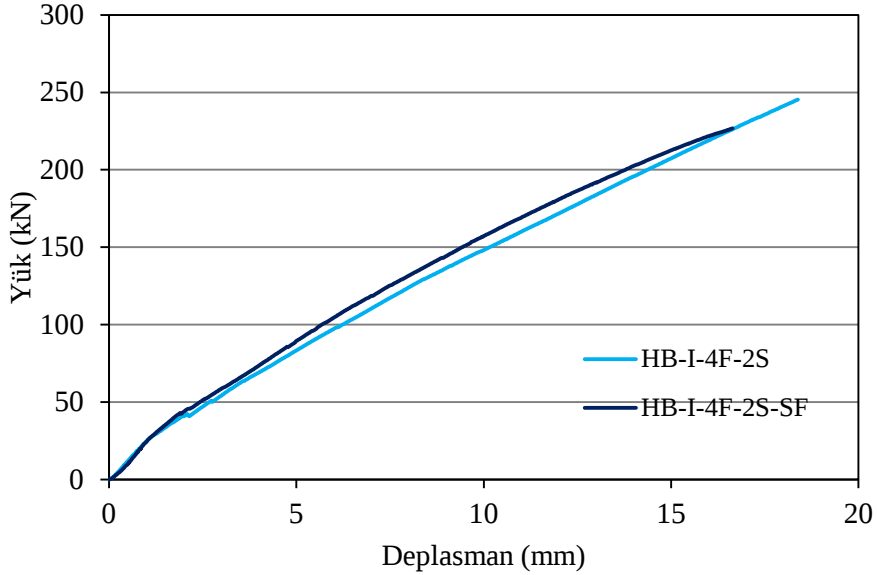


Şekil 3.22 HB-I-4F-2S-SF kirişi yük-beton birim deformasyon eğrisi

Hibrit CFRP-elik donatılı betonarme ve elik lifli betonarme kiriş karşılaştırılmalı deneysel yük-deplasman eğrileri şekil 3.23 ve şekil 3.24'te sunulmuştur.



şekil 3.23 HB-I-3F-2S ve HB-I-3F-2S-SF kirişleri karşılaştırılmalı yük-deplasman eğrileri



şekil 3.24 HB-I-4F-2S ve HB-I-4F-2S-SF kirişleri karşılaştırılmalı yük-deplasman eğrileri

Çalışma kapsamında yapılan deneyler sonucunda, hibrit CFRP-elik donatılı kiriş numunelerin eğilme altında olumlu davranış sergiledikleri grlmştur. Tüm kirişlerin tasarıma uygun olarak denge üstü olacak şekilde kırıldığı tespit edilmiştir. Test edilen

kirişlerde elik liflerin hibrit CFRP-elik donatılı kirişlerin eğilme davranışına olumlu etki sağladığı ancak taşıma gücü kapasitesini çok etkilemediği görölmüştür. Deneylerde, elik lifli kirişlerde betonda ölçölen birim kısalmalar elik lifsiz numunelere göre daha yüksek elde edilmiştir (şekil 3.16 ve şekil 3.22). Yapılan testlerde elik liflerin kirişlerde oluşan çatlak genişliğinin ilerlemesini engellediği ve kesme çatlaklarının sınırlı düzeyde kalmasını sağladığı görölmüştür. Kiriş numunelerde yer alan etriyeler sayesinde kirişlerde kesme kırılması meydana gelmediği ve kirişlerin eğilmede taşıma kapasitesine ulaştığı tespit edilmiştir. Buna ilave olarak, elik lifli kirişlerde elik liflerin kesme kapasitesine olumlu etki sağladığı belirlenmiştir.



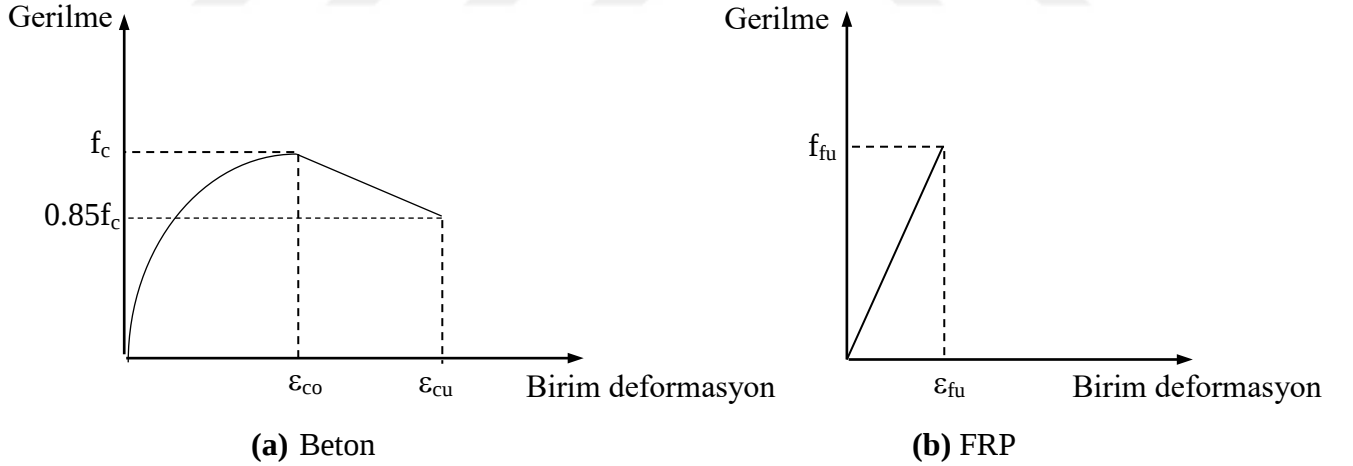
4. MATERİYAL ve METOD

Sunulan tezde, hibrit FRP-çelik donatılı betonarme kirişlerin dört nokta yüklemesi altında taşıma gücü kapasitesi ve yük-deplasman eğrilerinin elde edilmesi için bir yöntem ele alınmıştır.

4.1 Yöntemde Kabul Edilen Varsayımlar

- Düzlem kesitler eğilmeden sonra da düzlem kalır.
- Betonun doğrusal olmayan gerilme-birim deformasyon eğrisi dikkate alınmaktadır (Şekil 4.1a).
- Betonarme çeliği elasto-plastik kabul edilmektedir ($\sigma_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y$).
- Beton ve donatıda tam aderans bulunmaktadır.
- Betonun çekme dayanımına katkısı ihmal edilmektedir.
- Betonda süne ve büzülme ihmal edilmektedir.

Analizde beton gerilme-birim deformasyon ilişkisi için Hognestad modeli (Hognestad, Hanson ve McHenry, 1955) kabul edilmiştir (Şekil 4.1 (a)).



Şekil 4.1 Beton ve FRP donatı gerilme-birim deformasyon eğrileri

Hognestad modeli aşağıda sunulan denklemler ile ifade edilmektedir.

Eğrinin artan kısmı parabolik olarak temsil edilmektedir:

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] \quad (0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{co}) \quad (4.1)$$

Eğrinin azalan kısmı doğrusal olarak kabul edilmektedir:

$$\sigma_c = f_c \left[1 - 0.15 \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{co}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co}} \right) \right] , \quad (\varepsilon_{co} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}) \quad (4.2)$$

Burada, f_c betonun basınç gerilmesi, ε_{co} maksimum gerilmeye ulaşıldığındaki şekil değiştirme, ε_{cu} betonun en dış lifinin maksimum şekil değiştirme değerini ifade etmektedir.

Çelik Lifli Beton Modeli;

Çelik lifli beton için Hsu (1992) ve Hsu ve Hsu (1992) tarafından önerilen beton modeli dikkate alınmaktadır. Modeli temsil eden ifadeler aşağıda sunulmuştur:

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{n_1 \beta \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)}{n_1 \beta - 1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^{n_1 \beta}} \right] , \quad (0 \leq \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \leq x_d) \quad (4.3)$$

ve

$$\sigma_c = c_1 f_c \exp \left[-k_d \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - x_d \right)^{a_1} \right] \quad (x_d \leq \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}}) \quad (4.4)$$

burada,

$$\beta = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{f_c}{\varepsilon_{co} E_{ic}} \right) \right]} \quad \beta \geq 1.0 \text{ için} \quad (4.5)$$

Denklem (4.3-4.5)'de yer alan, n_1 and β malzeme parametreleri, n_1 malzeme dayanımına bağlı ($n_1=1$, $f_c < 62$ MPa için), β ise gerilme-şekil değiştirme eğrisi şekline bağlıdır (Hsu 1992, ve Hsu ve Hsu 1992), Modelde yer alan ε_{co} , E_{ic} , ve c_1 , k_d ve a_1 parametreleri %0.75 çelik lif hacimsel oranı için Tablo 4.1'de sunulmaktadır.

Tablo 4.1 Çelik lifli beton modeli parametreleri (f_c MPa) (Hsu 1992, ve Hsu ve Hsu 1992)

Çelik lif hacimsel oranı (%)	ε_{co}	E_{ic}	c_1	k_d	a_1
0.75	$1.7114f_c \times 10^{-5} + 0.002172$	$35.51f_c + 26152$	0.6	0.7	0.8

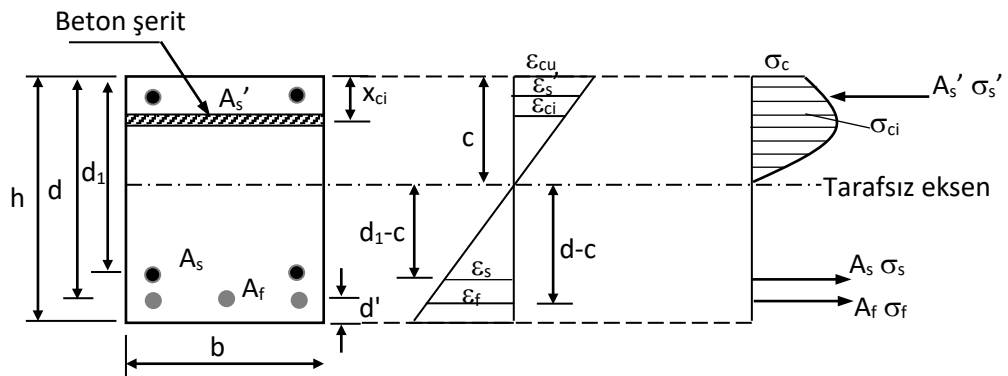
FRP donatıdaki gerilme:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \leq f_{fu} \quad (4.6)$$

denklemini ile belirlenir. Burada E_f FRP donatının elastisite modülü, ε_f FRP donatı birim deformasyon değeri, ε_{fu} FRP donatı kopma anındaki birim uzama, f_{fu} ise FRP donatı çekme dayanımını göstermektedir.

4.2 Analiz Yöntemi

Hibrit FRP-çelik donatılı kiriş kesiti, şekil değiştirme (birim deformasyon) ve gerilme dağılımı Şekil 4.2’de sunulmuştur.



Şekil 4.2 Kiriş kesiti, birim deformasyon ve gerilme dağılımı

Kesitte gösterilen, b kirişin genişliği, h kiriş kesit yüksekliği, c tarafsız eksen derinliği, ε_{ci} beton şerit şekil değiştirmesi, σ_{ci} her bir beton şeritin gerilme değeri, x_{ci} beton şerit ağırlık merkezinin kesit en dış lifine olan uzaklığı, d kesitte yer alan FRP donatının en dış life olan

uzaklığı, d_1 çelik donatının en dış life olan uzaklığı, ε_s ve ε_s' çelik donatı çekme ve basınç şekil değiştirme değerleri, σ_s , σ_s' ve σ_f sırasıyla çelik çekme ve basınç gerilmesi ve FRP donatı gerilme değeri, A_s , A_s' ve A_f ise sırasıyla betonarme çeliği çekme ve basınç donatısı alanı ve FRP donatının alanını göstermektedir.

Kirişlerin çekme bölgesinde bulunan FRP ve çelik donatının donatı oranları (ρ_f ve ρ_s) aşağıda yer alan denklemler ile belirlenmektedir.

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (4.7)$$

$$\rho_s = \frac{A_s}{bd_1} \quad (4.8)$$

Burada ele alınan hibrit kiriş tasarımında, betonun maksimum birim kısalma değerine ulaşıldığında çelik donatının akma konumunu aşmış olması ancak FRP donatıda kopma oluşmaması tercih edilen durum olduğundan, bu durumu sağlamak üzere kirişte bulundurulması gereken donatı oranı aşağıda sunulan ifadeyi sağlamalıdır (Maranan ve diğerleri 2018).

$$\rho_{ef} > \rho_{fb} \quad \text{ve} \quad \rho_s < \rho_{sb}$$

$$\rho_{ef} = \frac{A_f}{bd} + \frac{A_s}{bd_1} \frac{f_y}{f_{fu}} \quad (4.9)$$

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f_c}{f_{fu}} \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \quad (4.10)$$

$$\rho_{sb} = 0.85\beta_1 \frac{f_c}{f_y} \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_y} \quad (4.11)$$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \frac{f_c - 27.6}{7} \geq 0.65 \quad (4.12)$$

Denklemlerde yer alan ρ_{ef} hibrit donatı oranı, ρ_{fb} FRP donatılı kesitin dengeli donatı oranı, ρ_{sb} çelik donatılı betonarme kiriş dengeli donatı oranını, f_y ve ε_y çeliğin akma dayanımını ve akma birim şekil değiştirme değerini temsil etmektedir.

Ele alınan yöntemde betonun doğrusal olmayan davranışını hesaplara yansıtmak için kiriş beton basınç bölgesi şeritlere ayrılmaktadır (Şekil 4.2). Her bir şeridin ağırlık merkezindeki şekil değiştirme bulunarak beton gerilme-birim deformasyon modelinden beton şerit gerilmeleri hesaplanmaktadır. Beton şerit, FRP donatı ve çelik donatı çekme ve basınç şekil değiştirme değerleri birim deformasyon dağılımından (Şekil 4.2);

$$\epsilon_{ci} = \epsilon_{cu} \frac{c-x_{ci}}{c}, \quad \epsilon_f = \epsilon_{cu} \frac{d-c}{c}, \quad \epsilon_s = \epsilon_{cu} \frac{d_1-c}{c}, \quad \epsilon'_s = \epsilon_{cu} \frac{c-d'}{c} \quad (4.13)$$

olarak ifade edilmektedir.

4.3 Hibrit FRP-Çelik Donatılı Kiriş Denge Denklemleri

Hibrit FRP-çelik donatılı kiriş denge denklemleri aşağıda sunulmaktadır:

$$F = \sum_{i=1}^n A_{ci} \sigma_{ci} + A'_s \sigma'_s - A_f \sigma_f - A_s \sigma_s = 0 \quad (4.14)$$

Burada Denklem (4.14)'ü sağlayan tarafsız eksen derinliğinin (c) iterasyon uygulanarak elde edilmesinden sonra kirişin taşıma gücü momenti aşağıda verilen ifade ile bulunmaktadır.

$$M = \sum_{i=1}^n A_{ci} \sigma_{ci} \left(\frac{h}{2} - x_{ci} \right) + A_f \sigma_f \left(\frac{h}{2} - d' \right) + A_s \sigma_s \left(d_1 - \frac{h}{2} \right) + A'_s \sigma'_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) \quad (4.15)$$

Dört nokta yüklemesine maruz kirişin yük taşıma kapasitesi:

$$P = \frac{2M}{a} \quad (4.16)$$

ile hesaplanmaktadır. Burada a kesme açıklığını (uygulanan yük ile mesnet arasındaki mesafe) ifade etmektedir. Kirişte ilk çatlağı oluşturan çatlama momenti (ACI 440.1R-15):

$$M_{cr} = \frac{0.62 \lambda \sqrt{f_c I_g}}{y_t} \quad (4.17)$$

denklemini ile elde edilir. Denklem (4.17)'de yer alan I_g brüt kesit atalet momentini, y_t ise kesit ağırlık merkezinin en dış life olan uzaklığını temsil etmektedir. Kiriş kesit atalet momenti:

$$I_g = \frac{bh^3}{12} \quad (4.18)$$

ile bulunur.

4.4 Hibrit FRP-Çelik Donatılı Kiriş Deplasman Hesabı

Kiriş çatlama momenti Denklem (4.17) ile hesaplanarak, Denklem (4.16)'dan çatlama momentine karşılık gelen çatlama yükü (P_{cr}) belirlenmektedir.

Çatlama yüküne karşılık gelen kiriş orta noktası deplasmanı (Δ_{cr}) CAN/CSA S806-12 Standardına göre Denklem (4.19) ile hesaplanmaktadır;

$$\Delta_{cr} = \frac{P_{cr}L^3}{24E_cI_{cr}} \left[3 \left(\frac{a}{L} \right) - 4 \left(\frac{a}{L} \right)^3 - 8 \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right) \left(\frac{L_g}{L} \right)^3 \right] \quad (4.19)$$

burada, a kesme açıklığı, E_c ise betonun elastisite modülünü temsil eder. Betonun elastisite modülü (ACI 318):

$$E_c = 4700\sqrt{f_c} \quad (4.20)$$

ile ifade edilmektedir.

$$L_g = a \frac{M_{cr}}{M} \quad (4.21)$$

Çatlamış kesit atalet momenti (ACI 440.1R-15)

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + (n_f A_f + n_s A_s) d^2 (1 - k)^2 \quad (4.22)$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} \quad (4.23)$$

$$n_s = \frac{E_s}{E_c} \quad (4.24)$$

Tarafsız eksen derinliğinin donatı mesafesine olan oranı (k):

$$k = \sqrt{2(\rho_f n_f + \rho_s n_s) + (\rho_f n_f + \rho_s n_s)^2} - (\rho_f n_f + \rho_s n_s) \quad (4.25)$$

ile belirlenir (ACI 440.1R-15).

Dört nokta yüklemesi altındaki kirişin orta nokta deplasmanı Denklem (4.26)'da sunulan ifade ile belirlenmektedir (CAN/CSA S806-12):

$$\Delta = \frac{PL^3}{24E_c I_{cr}} \left[3 \left(\frac{a}{L} \right) - 4 \left(\frac{a}{L} \right)^3 - 8 \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right) \left(\frac{L_g}{L} \right)^3 \right] \quad (4.26)$$

5. ANALİTİK ÇALIŞMA

Sunulan tez kapsamında dört nokta yüklemesi altında test edilen çelik lifsiz ve çelik lifli FRP donatılı ve hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin davranışı araştırılmıştır. Kirişler teorik yöntem ile taşıma gücü ve yük-deplasman eğrileri için analiz edilmiştir. Elde edilen teorik sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

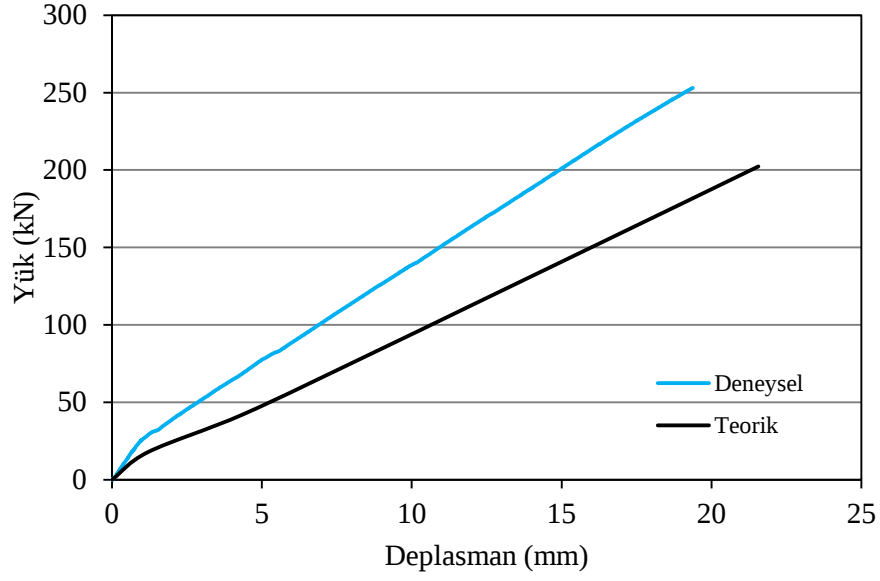
5.1 Kirişlerin Analizi

Sunulan çalışmada, test edilen CFRP donatılı ve hibrit CFRP-çelik donatılı çelik lifsiz ve çelik lifli kirişler analiz edilmiştir. Analizde, beton basınç bölgesi için Bölüm 4.1’de verilen beton ve çelik lifli gerilme-birim deformasyon modelleri kullanılmıştır. Analiz sonucunda kirişlerin taşıma gücü değerleri ve yük-deplasman grafikleri belirlenmiştir. Test edilen kirişlerin deneysel taşıma kapasiteleri (P_{test}), teorik taşıma gücü (P_u) ve oransal değerler (P_u / P_{test}) Tablo 5.1’de sunulmuştur.

Tablo 5.1 Test edilen betonarme kirişlerin teorik ve deneysel değerlerinin karşılaştırılması

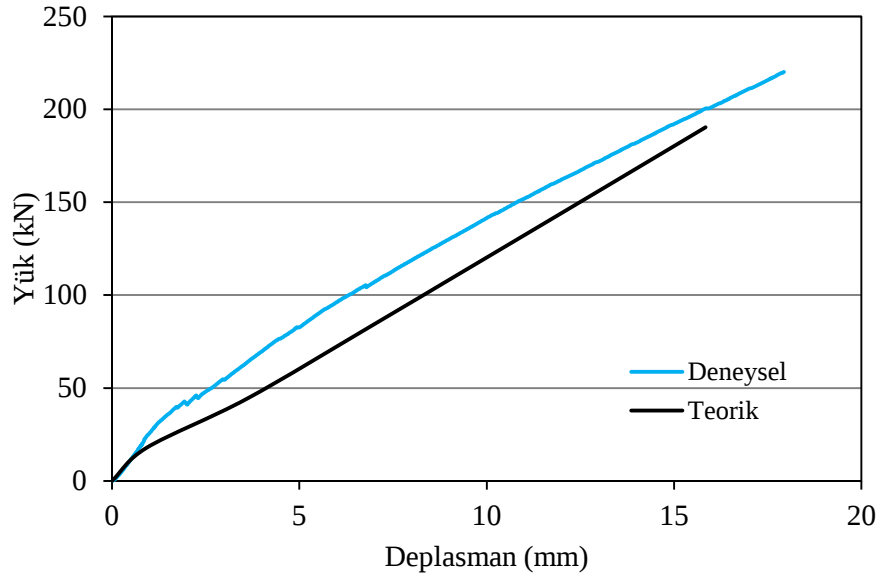
Numune	P_{test} (kN)	P_u (kN)	P_u/P_{test}
B-I-4F	252.51	202.32	0.801
HB-I-3F-2S	220.12	190.34	0.865
HB-I-4F-2S	245.35	210.36	0.857
HB-I-3F-2S-SF	229.32	221.13	0.964
HB-I-4F-2S-SF	226.76	244.58	1.078

Elde edilen analiz sonuçlarına göre kiriş teorik yük taşıma kapasitesinin deneysel değerlere oranının ortalaması 0.913 olarak bulunmuştur. Teorik olarak elde edilen değerlerin deneysel değerlerle uyumlu olduğu görülmektedir. Çalışmada test edilen CFRP donatılı betonarme kirişlerin deneysel ve analitik yük-deplasman eğrileri Şekil 5.1, Şekil 5.2, Şekil 5.3, Şekil 5.4, Şekil 5.5’de sunulmuştur.



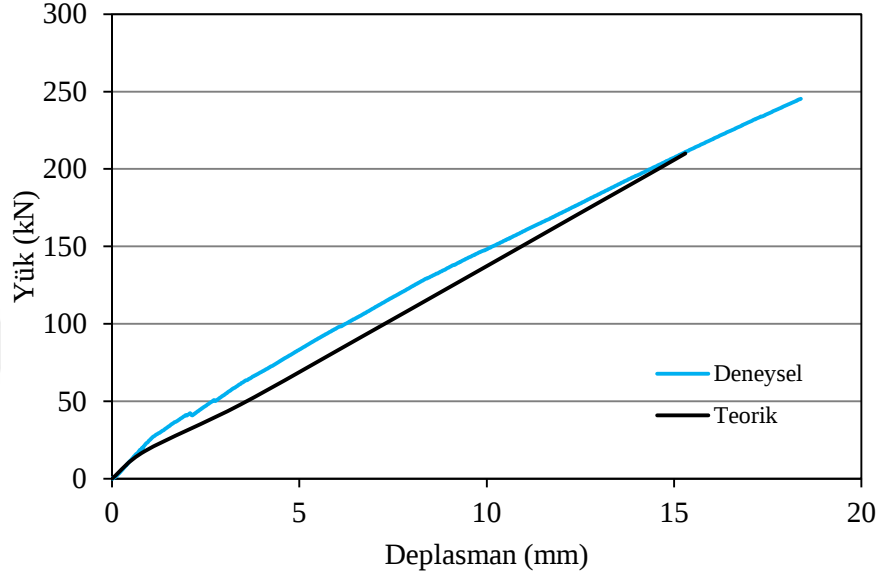
Şekil 5.1 B-I-4F kirişi yük-deplasman eğrileri

Şekil 5.1’ de sunulan grafik incelendiğinde, çelik lifsiz CFRP donatılı kirişin teorik yük-deplasman eğrisinin yaklaşık 80 kN yük değerine kadar deneysel yük-deplasman eğrisi ile yakın sonuç sağladığı, ancak daha büyük yük değerlerinde eğrilerin bir miktar uzaklaştığı görülmektedir.



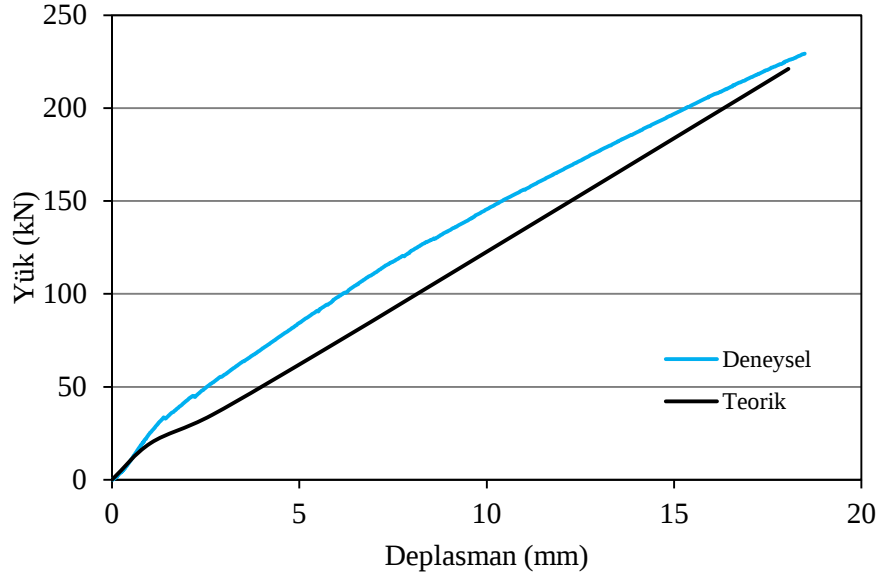
Şekil 5.2 HB-I-3F-2S kirişi yük-deplasman eğrileri

HB-I-3F-2S kirişı teorik ve deneysel yük-deplasman eğrilerinin iyi derecede uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Bulunan sonuçlar değerlendirildiğinde, ele alınan teorik yöntemin CFRP-çelik donatılı hibrit kirişlerin analizinde olumlu sonuç sağladığı anlaşılmaktadır (Şekil 5.2).



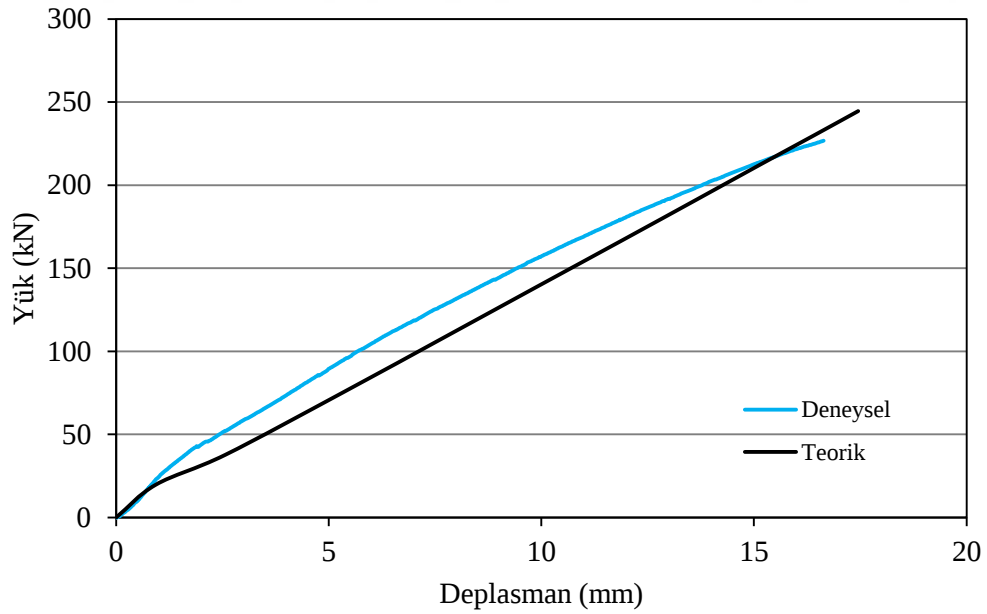
Şekil 5.3 HB-I-4F-2S kirişı yük-deplasman eğrileri

Şekil 5.3 ele alındığında, HB-I-4F-2S kiriş numunesi analitik yük-deplasman eğrisinin deneysel eğri ile çok uyumlu elde edildiği görülmektedir. Bulunan sonuçlara göre analitik yöntemin hibrit kirişlerin analizinde iyi sonuç sağladığını göstermektedir.



Şekil 5.4 HB-I-3F-2S-SF kirişi yük-deplasman eğrileri

Şekil 5.4 incelendiğinde, HB-I-3F-2S-SF çelik lifli kiriş numunesi teorik yük-deplasman eğrisinin deneysel eğri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Analiz sonuçlarına göre, yöntemde kullanılan çelik lifli beton modelinin uygun sonuçlar sağladığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.5 HB-I-4F-2S-SF kirişi yük-deplasman eğrileri

Şekil 5.5’de görüldüğü gibi, çelik lifli HB-I-4F-2S-SF kirişi analiz değerlerinin deneysel değerlerle iyi derecede uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

Test edilen CFRP donatılı ve hibrit CFRP-çelik donatılı kirişlerin yük-deplasman eğrileri ele alındığında, dört nokta yüklemesine maruz kirişlerin iyi derecede deplasman ve yük kapasitesi gösterdiği anlaşılmaktadır. Sunulan tez çalışmasında, test edilen kirişlerin deneysel ve analitik sonuçlarının uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Kirişlerin analizi için ele alınan yöntemin ve beton modellerinin uygun sonuç sağladığı belirlenmiştir.



6. SONUÇLAR

Sunulan tez çalışmasında hibrit CFRP-çelik donatılı kirişlerin dört nokta yüklemesi altında eğilme davranışı incelenmiştir. Çalışma kapsamında hazırlanan çelik lifsiz ve çelik lifli kirişler test edilmiş ve deneysel davranış gözlenmiştir. Çalışmada ayrıca, hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin taşıma gücü ve yük-deplasman analizi için teorik bir yöntem ele alınmıştır. Yöntemde beton ve çelik lifli betonun doğrusal olmayan davranışı hesaplarda dikkate alınmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Yapılan testlerde hibrit CFRP-çelik donatılı çelik lifsiz ve çelik lifli betonarme kirişlerin eğilme altında olumlu davranış sergiledikleri ve iyi derecede deplasman kapasitesi gösterdikleri görülmüştür.
- Kiriş deneyleri sonucunda, çelik liflerin hibrit CFRP-çelik donatılı kirişlerin eğilme davranışına olumlu etki sağladığı tespit edilmiştir. Çelik liflerin kirişlerde meydana gelen çatlakların genişliğini sınırladığı ve kesme çatlaklarını kılcal düzeyde tutarak ilerlemesini engellediği belirlenmiştir.
- Kirişlerde bulundurulan etriyeler sayesinde kirişlerde kesme kırılması meydana gelmediği ve kirişlerin eğilmede taşıma gücü kapasitesine ulaştığı gözlenmiştir. Ayrıca çelik lifli kirişlerde çelik liflerin kirişlerin kesme kapasitesine olumlu etki sağladığı tespit edilmiştir.
- Yapılan kiriş deneylerinde, çelik lifsiz numunelerle karşılaştırıldığında çelik liflerin betonun birim kısalma değerini arttırdığı görülmüştür.
- Hibrit CFRP-çelik donatılı kirişler için ele alınan analiz yönteminin kirişlerin taşıma kapasitesi ve yük-deplasman eğrilerinin elde edilmesinde olumlu sonuçlar sağladığı belirlenmiştir.
- Beton ve çelik lifli beton için kabul edilen gerilme-birim deformasyon modelinin hibrit kirişlerin analizinde uygun sonuçlar sağladığı anlaşılmıştır.
- Tez çalışması kapsamında test edilen kirişlerin analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

7. ÖNERİLER

Sunulan çalışmada, hibrit CFRP-çelik donatılı çelik lifsiz ve çelik lifli kirişlerin dört nokta yüklemesi altında davranışı araştırılmıştır. Hibrit kirişlerde lif etkisinin araştırılması üzerine farklı hacimsel oranlarda çelik liflerin katkısı incelenebilir. Ayrıca çelik lif dışında farklı tiplerde lifler esas alınarak liflerin hibrit kirişlerin süneklik ve taşıma kapasitelerine etkileri araştırılarak literatüre önemli katkılar sağlanabilir. Bunlara ek olarak, daha yüksek dayanımlı beton ve farklı yükleme koşulları içeren deneysel ve teorik çalışmalardan elde edilecek sonuçların hibrit kirişlerin davranışının belirlenmesinde etkili olacağı öngörülmektedir.



KAYNAKLAR

- Abdelkarim, O. I., Ahmed, E. A., Mohamed, H. M., & Benmokrane, B. (2019). Flexural strength and serviceability evaluation of concrete beams reinforced with deformed GFRP bars. *Engineering Structures*, s. 282–296.
- ACI 318-15 (2015). Building Code Requirements for Structural Concrete Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute;
- ACI Committee 440 (2015), Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI 440.1R-15, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Bozdoğan, E., Tokgöz, S. (2025). Hibrit FRP-çelik donatılı betonarme kirişlerin davranışının incelenmesi. *EGE 13. ULUSLARARASI UYGULAMALI BİLİMLER KONGRESİ TAM METİN KİTABI*, (s. 348-357).
- CSA-S806-12 (2012). Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers. Ontario (Canada): Canadian Standards Association.
- Deng, Z., Zhong, X., Liu, B., & Wen, K. (2022). Study on flexural behavior of coral concrete beams reinforced with CFRP bars. *Structures*, s. 378–386.
- Gürler, B. İ. (2023). *FRP donatılı çelik lifli betonarme kirişlerin davranışının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Adana.
- Hognestad, E., Hanson, N.W. & McHenry, D. (1955), Concrete stress distribution in ultimate stress design, *ACI Journal*., 27, 455-479.
- Hsu, L.S.M. (1992), Behavior of high strength concrete and slender reinforced concrete columns with and without steel fibers, PhD dissertation, New Jersey Institute of Technology, Newark.
- Hsu, L.S.M. & Hsu, C.T.T. (1992), Stress-strain behavior of plain and fibrous high strength concrete under compression. Technical report 92-1, Structural Concrete Series, Department of Civil and Environmental Engineering, NJIT, Newark
- Kartal, S. (2020). *Lifli polimer donatı oranının hibrit frp-çelik donatılı beton kirişlerin eğilme davranışı üzerindeki etkileri*. Kırıkkale: Kırıkkale Üniversitesi.
- Lau, D., & Pam, H. J. (2010, Eylül 23). Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, s. 3857–3865.

- Lu, C., Cai, Q., Xu, K., Sha, X., & Yan, Y. (2022, Haziran 20). Comparison of flexural behaviors between plain and steel-fiber-reinforced concrete beams with hybrid GFRP and steel bars. *Structures*, s. 1-11.
- Maranan, G., Manalo, A., Benmokrane, B., Karunasena, W., Mendis, P., & Nguyen, T. (2018, Aralık 27). Flexural behavior of geopolymer-concrete beams longitudinally reinforced with GFRP and steel hybrid reinforcements. *Engineering Structures*, s. 141-152.
- Nguyen, P. D., Dang, V. H., & Vu, N. A. (2020). Performance of concrete beams reinforced with various ratios of hybrid GFRP/steel bars. *Civil Engineering Journal*, s. 1652–1669.
- Tarawneh, A., Alajarmeh, O., Alawadi, R., Amirah, H., & Alramadeen, R. (2023, Kasım 2023). Database evaluation and reliability calibration for flexural strength of hybrid FRP/steel-RC Beams. *Composite Structures*.
- Ünal, H. Y. (2022). *Çimento esaslı kompozit içeren FRP donatılı kirişlerin davranışının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Adana.
- Yang, Y., Pan, D., Wu, G., & Cao, D. (2021). A new design method of the equivalent stress-strain relationship for hybrid (FRP bar and steel bar) reinforced concrete beams. *Composite Structures*, 270.
- Yoo, D.-Y., Banthia, N., & Yoon, Y.-S. (2016, Ocak 6). Flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars. *Engineering Structures*, s. 246-262.