

**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FARKLI BETON SINIFLARI KULLANILAN CAM ELYAF DONATILI
HİBRİT KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞI**

Zafer SARIER

KIRIKKALE, 2018

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Zafer SARIER tarafından hazırlanan
FARKLI BETON SINIFLARI KULLANILAN CAM ELYAF DONATILI HİBRİT
KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞI adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı
standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. İlker KALKAN
Anabilim Dalı Başkanı

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

: Dr.Öğr.Üy. Eda AVANOĞLU SICACIK
Danışman

Jüri Üyeleri

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

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

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

Prof. Dr. Recep ÇALIN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

FARKLI BETON SINIFLARI KULLANILAN CAM ELYAF DONATILI HİBRİT KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞI

SARIER, Zafer

Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi

Danışman: Dr.Öğr.Üy. Eda AVANOĞLU SICACIK

Ekim 2018, 54 sayfa

Malzeme sektöründeki gelişmeler, mevcut malzemelerin ortaya çıkardığı olumsuzlukları gidermektedir. Betonarmeyi oluşturan beton ve çelik birbirini tamamlayan iki malzeme olmasına karşılık yapının kullanım ömrünü, dayanımını önemli ölçüde etkileyen dezavantajlara sahiptir. Çelik korozyona karşı dayanıklı bir malzeme değildir. Korozyona uğrayan çeliğin yüzeyinde oluşan pas tabakası betonda çatlak oluşumuna neden olur ve bu durum beton dayanımını ve kullanılabilirliğini olumsuz etkiler. Betonarme yapılarda ortaya çıkan bu tür problemleri önleyebilmek adına son yıllarda fiber katkılı donatıların (FRP) inşaat çeliğine alternatif olarak kullanılması ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. FRP donatılar korozyona karşı dayanıklı olmaları, yüksek çekme dayanımları, hafif olmaları gibi birçok avantajın yanında kullanıldığı yapı elemanın davranışını olumsuz etkileyecek dezavantajlara da sahiptir. Bu çalışmanın amacı FRP donatıların avantajlarından faydalanırken dezavantajlarının da ortadan kaldırıldığı hibrit yapı elemanlarının davranışlarının incelenmesidir. Çalışma içerisinde cam lifli donatılar (GFRP) kullanılarak hibrit kirişler üretilmiştir. Farklı beton sınıfları ve donatı oranları ile hibrit kirişlerin eğilme davranışları deneysel yöntem kullanılarak incelenmiştir. Çalışma sonucunda beton basınç dayanımının eğilme altında test edilen kirişlerin taşıma kapasitesinde belirgin bir artış göstermediği gözlenmiştir. Beton

dayanımının farklı olduğu her iki deney grubunda da efektif donatı oranındaki artış dayanımı arttırmıştır.

Anahtar Sözcükler: GFRP donatı, FRP donatı, çelik donatı, betonarme kiriş, eğilme deneyi.



ABSTRACT

FLEXURAL BEHAVIOR OF GFRP REINFORCED HYBRID BEAMS USED IN DIFFERENT CONCRETE GRADES

SARIER, Zafer

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor: Dr. Eda AVANOĞLU SICACIK

October 2018, 54 pages

Advances in the material field are eliminated the disadvantages of the existing materials. Although the concrete and steel forming the concrete are two complementary materials, they have disadvantages that significantly affect the life and durability of the structure. Steel is not a corrosion resistant material. The rust layer formed on the surface of the corroded steel causes cracks in the concrete and this negatively affects the concrete strength and serviceability. In order to prevent such problems in reinforced concrete structures, a number of studies have been carried out in recent years on the use of fiber reinforced reinforcements (FRP) as an alternative to structural steel. Although FRP reinforcements have corrosion resistant, high tensile strength, light weight, it has disadvantages that negatively affect the behavior of the structural member. The purpose of this study is to examine the behavior of hybrid structural elements by eliminating the disadvantages of FRP reinforcements. Hybrid beams were produced by using glass fiber reinforcements(GFRP). Flexural behavior of hybrid beams with different concrete classes and reinforcement ratios were investigated by using experimental method. As a result of the study, it was observed that the concrete compressive strength did not provide a significant increase in the carrying capacity of the beams tested under bending. In both experimental groups where the strength of concrete was different, the increase in the effective reinforcement ratio increased the strength of beams.

Key Words: GRP reinforcement, FRP reinforcement, steel reinforcement, reinforced concrete, flexural experiment.



TEŞEKKÜR

Tez çalışmalarımda büyük emeği geçen Sayın Dr.Öğr.Üy Eda AVANOĞLU SICACIK Hocamıza yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim ve yine bu çalışmalarda her an yanımda olup destek veren Sayın Dr.Öğr.Üy.Şule BAKIRCI ER Hocamıza teşekkür ediyorum.

Bu tez çalışması Kırıkkale Üniversitesi BAP birimi tarafından desteklenen 2016/070 nolu Yüksek Performanslı Beton Kullanılan Hibrit Kirişlerin Eğilme Davranışı adlı proje tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Kırıkkale Üniversitesi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Yorucu tez aşamalarında hem işimle hem okulumla fazlasıyla ilgilenerek motive eden eşim ve aileme ayrıca sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
KISALTMALAR DİZİNİ	xi
SİMGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Taraması	3
2. DENEYSEL ÇALIŞMA	9
2.1. Deney Programı	9
2.2. Malzeme Özellikleri	16
2.3. Yük ve Ölçüm Düzenneği	21
3. DENEYLER	22
3.1. Normal Dayanımlı Beton Kullanılan Kiriş Elemanları	22
3.1.1. NG3S2 (G12.7S10) Deney Elemanı	22
3.1.2. NG2S3 (G12.7S10) Deney Elemanı	24
3.1.3. NG2S3 (G12.7S12) Deney Elemanı	26
3.2. Yüksek Dayanımlı Beton Kullanılan Kiriş Elemanları	29
3.2.1. HG2S3 (G12.7S10) Deney Elemanı	29
3.2.2. HG3S2 (G12.7S10) Deney Elemanı	31
3.2.3. HG3S2 (G12.7S12) Deney Elemanı	33
4. TEORİK ANALİZ	37
4.1. FRP Donatılı ve Hibrit Donatılı Betonarme Kirişlerin Taş. Gücü Hesabı ..	38

5. SONUÇLAR.....	49
KAYNAKÇA	51



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. NG2S3(G12.7S12) kiriş donatı detayı	11
2.2. NG2S3(G12.7S10) kiriş donatı detayı	12
2.3. NG3S2(G12.7S10) kiriş donatı detayı	13
2.4. HG2S3(G12.7S10) kiriş donatı detayı	14
2.5. HG3S2(G12.7S10) kiriş donatı detayı	15
2.6. HG3S2(G12.7S12) kiriş donatı detayı	16
2.7. Cam Elyaf Donatı (GFRP).....	18
2.8. Yüksek dayanımlı kirişlerin beton döküm öncesi kalıp durumu	19
2.9. Yüksek dayanımlı kirişlerin beton döküm sonrası kalıp durumu	19
2.10. Normal dayanımlı kirişlerin beton döküm öncesi kalıp durumu	20
2.11. Normal dayanımlı kirişlerin beton döküm sonrası kalıp durumu	20
2.12. Yük ve ölçüm sistemi	21
3.1. NG3S2 (G12.7S10) deney elemanı.....	23
3.2. NG3S2 (G12.7S10) elemanı çatlak oluşumu.....	23
3.3. NG3S2 (G12.7S10) elemanı yük deplasman grafiği.....	24
3.4. NG2S3 (G12.7S10) deney elemanı.....	25
3.5. NG2S3 (G12.7S10) elemanı yük-deplasman grafiği	25
3.6. NG2S3 (G12.7S12) elemanı deneyi.....	27
3.7. NG2S3 (G12.7S12) elemanı çatlak oluşumu.....	27
3.8. NG2S3 (G12.7S12) elemanı yük deplasman grafiği.....	28
3.9. Normal dayanımlı elemanların birleştirilmiş yük deplasman grafikleri	28
3.10. HG2S3 (G12.7S10) elemanı deneyi.....	30
3.11. HG2S3 (G12.7S10) elemanı deney sonu.....	30
3.12. HG2S3 (G12.7S10) elemanı yük deplasman grafiği.....	31
3.13. HG3S2 (G12.7S10) elemanı deneyi	32

3.14.	HG3S2 (G12.7S10) elemanı yük deplasman grafiği.....	32
3.15.	HG3S2 (G12.7S12) elemanı deneyi.....	34
3.16.	HG3S2 (G12.7S12) deney sonu.....	34
3.17.	HG3S2 (G12.7S12) elemanı yük deplasman grafiği.....	35
3.18.	Yüksek dayanımlı elemanların birleştirilmiş yük deplasman grafikleri ...	35
3.19.	NG3S2 (G12.7S10) ve HG3S2 (G12.7S10) el. yük deplasman eğrileri ...	36
4.1.	Kesitteki gerilme dağılımı	38
4.2.	Denge altı tasarım	40
4.3.	Hognestad beton modeli	44
4.4.	Çelik ve FRP donatı gerilme birim şekil değiştirme ilişkileri	44
4.5.	NG2S3(G12.7S10) El. deneysel ve teorik yük-deplasman grafiği	45
4.6.	NG3S2(G12.7S10) El. deneysel ve teorik yük-deplasman grafiği	45
4.7.	NG2S3(G12.7S12) El. deneysel ve teorik yük-deplasman grafiği	46
4.8.	HG2S3(G12.7S10) El. deneysel ve teorik yük-deplasman grafiği	46
4.9.	HG3S2(G12.7S10) El. deneysel ve teorik yük-deplasman grafiği	47
4.10.	HG3S2(G12.7S12) El. deneysel ve teorik yük-deplasman grafiği	47

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Çelik donatı ve GFRP donatı detayları	10
2.2. Yüksek dayanımlı betonun numune dayanımları	17
2.3. Normal dayanımlı betonun numune dayanımları	17
2.4. Kullanılan donatıların özellikleri	18
4.1. Deney elemanları donatı oranları.....	41
4.2. Deney elemanlarının teorik ve deneysel taşıma gücüne karşılık gelen deneysel ve teorik deplasman değerleri.....	43
4.3. Deney elemanlarının teorik taşıma gücüne karşılık gelen deneysel ve teorik deplasman değerleri.....	48

KISALTMALAR DİZİNİ

CFRP	Karbon Lif Takviyeli Polimer
FRP	Lif Takviyeli Polimer
GFRP	Cam Lif Takviyeli Polimer
LVDT	Doğrusal Değişken Türevsel Dönüştürücü
S	Çelik Donatı
G	Cam Elyaf Donatı

SİMGELER DİZİNİ

A_f	FRP donatı alanı
A_s	Çelik donatı alanı
a	Eşdeğer basınç bloğu derinliği
b	Kiriş gövde genişliği
c	Tarafsız eksen derinliği
d	Etkili kiriş yüksekliği
E_f	Elastisite modülü (FRP)
E_s	Elastisite modülü (Çelik)
F_c	Betona basınç bölgesinde uygulanan bileşke kuvvet
F_f	FRP donatılara çekme bmölgesinde uygulanan bileşke kuvvet
F_s	Çelik donatılara çekme bölgesinde uygulanan kuvvet
f_c	Beton basınç dayanımı
f_f	FRP donatıdaki çekme dayanımı
f_{fu}	FRP'nin tasarımıdaki çekme dayanımı
f_y	Çelik akma dayanımı
h	Kiriş yüksekliği
M_u	Taşıma gücü momenti
ϵ_{cu}	Betonun ezilme şekil değiştirmesi

ρ_{eff}	Efektif donatı oranı
ρ_f	FRP donatı oranı
$\rho_{f,b}$	Dengeli donatı oranı
ρ_s	Çelik donatı oranı
$\emptyset_y$	Çekme donatısının akmasına karşılık geleneğrilik
$\emptyset_f$	FRP donatı çapı

1. GİRİŞ

Farklı yapı tipleri o bölgedeki şartların gerektirdiği iklim çeşidi, ekonomik, malzeme kaynakları, arazi şartları, deprem etkisi gibi parametreler sayesinde oluşur. Ülkemizde yaygın olarak betonarme yapılar, ülkemiz koşullarına en uygun ve uzun ömürlü bir biçimde tasarlanarak projelendirilirler.

Bir yapı elemanı işlevine uygun, ekonomik ve emniyetli olmalıdır. Yapı elemanının uygulanacağı yer, istenilen amaca uygun olması, yapıda ileride meydana gelebilecek aksaklıkların önüne geçilip güvenli tarafta kalmak için bu gibi etkilerin neler olabileceği önceden bilinmesi gerekmektedir. Böylece oluşturulan model üzerinde çalışmalar yapılarak istenen optimum özellikleri elde etmek, ileride oluşabilecek aksaklıkları önceden görmek ve önlem almak mümkündür bu da mühendislik alanında ayrıca önem arz etmektedir.

Çevresel etkiler ve malzeme sektöründeki gelişmeler, betonarme yapılarda kullandığımız çelik donatı yerine korozyon ve kimyasal etkilere karşı direnci fazla olan, daha hafif alternatif bir donatı çeşidi aramaya sevk etmiştir.

Günümüzde FRP donatılar inşaat sektöründe; hafiflik, yüksek dayanım, korozyona dayanıklılık, yorulma mukavemetinin yüksek olması, düşük ısı iletkenlik özelliği ve manyetik geçirgenliğinin olmaması gibi avantajlarından dolayı kullanılmaya başlanmıştır. FRP donatıların inşaat çeliğine tercih edilmesinin en önemli nedenlerinden biri de yüksek çekme dayanımlı hafif bir malzeme olmasıdır.

FRP donatıların çelik donatıya göre üstünlüklerinin yanında dezavantajları da vardır. FRP donatılar sünek davranış gösteren inşaat çeliğine kıyasla daha düşük elastisite modülüne sahiptir.

FRP donatıların en önemli dezavantajı ise uzama kapasitesinin sınırlı olmasıdır. Bu davranış FRP donatıların gevrek davranış göstermesine ve dolayısıyla kullanıldığı yapı elemanında gevrek davranmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra FRP donatıların

eksenel rijitliğinin ve aderansının çelik donatıya oranla daha küçük olması çatlak sayısı ve çatlak genişliklerinin daha büyük olmasına neden olmaktadır. Bu dezavantajlarından FRP donatının yalnız başına çelik donatıya alternatif olması mümkün değildir. FRP donatıların avantajlarından faydalanırken dezavantajlarının da önüne geçebilmek için hibrit yapı elemanları tasarlanmıştır. Son yıllarda bu konu ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Mekanik davranışı birbirinden farklı iki malzemenin bir arada kullanılması ve hibrit yapı elemanının davranışının öngörülebilmesi için konu ile ilgili incelenmesi gereken birçok parametre vardır. Bu nedenlerden dolayı FRP donatılı hibrit kirişlerin davranışı hala güncelliğini korumaktadır.

FRP donatı ile birlikte çelik donatının kullanılması yapı elemanın daha sünek davranmasını sağlamaktadır. Ayrıca çelik donatı eklenmesi çatlak genişliğini ve çatlak sayısını azaltır. ACI440.1R-15 yönetmeliğinde FRP donatılı kirişlerin tasarımında denge üstü donatı kullanılması önerilmektedir. Bu yöntemle göre yapı elemanı göçme yüküne ulaştığında basınç bölgesindeki beton ezilme birim deformasyonuna ulaşmış olacaktır ve FRP donatılar kopmadan göçme gerçekleşecektir. [1]

Bu çalışmanın amacı GFRP donatılı hibrit kirişlerin eğilme davranışının incelenmesidir. Çalışmadaki ana parametre etkili donatı oranı ve beton sınıfıdır. Çalışmada ayrıca hibrit donatılı kirişlerin davranışlarını tahmin edebilmek ve deney sonuçları ile uyumluluklarını karşılaştırabilmek için literatürde önerilen yöntemler de kullanılmıştır.

1.1. Literatür Özeti

Literatürde son yıllarda FRP donatılı elemanların, eğilme, deplasman ve taşıma gücünü inceleyen birçok çalışma yapılmıştır. Ancak yapılan bu çalışmalar neticesinde eğilme ve deplasman için geliştirilen modeller arasında farklılıkların bulunması ve bu çalışmaların çelik donatılı kirişlerin dayanımını inceleyen çalışmalarla karşılaştırıldığında halâ yeterli düzeyde bulunmamaktadır. Literatürde konu ile ilgili çalışmalar bu bölümde yer verilmiştir.

Chakib ve diğerleri karbon, cam ve aramid lif takviyeli polimer donatılı 24 adet betonarme kirişin eğilme davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerden elde edilen sonuçlar yönetmeliklerde önerilen formülasyon ile karşılaştırmışlar ve sonuçların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. FRP donatılı deney elemanlarının betonun ezilme birim kısalmasına erişince taşıma gücüne ulaştıkları gözlemlenmiştir. [2]

Razaqpur ve diğerleri, FRP donatılı betonarme kirişlerde oluşan deplasmanların hesabı için moment eğrilik ilişkisine dayandırdıkları analitik bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yöntemde ilk etapta tüm kirişi tamamen çatlamış olarak kabul etmekte ve daha sonra çatlamanın oluşmadığı bölgelerde gerekli düzenlemeleri yaparak elde ettikleri eğrilik değerlerinden deplasmanları hesaplamaktadırlar. Geliştirdikleri bu yöntemde çekme rijitleşmesi etkisini göz önünde bulundurmamışlardır.[3]

Rami A. Hawileh hibrit kirişlerin sonlu eleman modellemesini yapmıştır. Çelik ve Aramid elyaf takviyeli polimer (AFRP) donatısının hibrit kombinasyonu ile kirişler üzerinde daha önceden yapılmış olan deneyler ile kendi yaptığı sonlu elemanlar yöntemini karşılaştırarak, kirişlerin eğilme-deplasman davranışlarının yakın değerler aldığını gözlemlemiştir. [4]

A. Lapko, M. Urbański Bazalt elyaf takviyeli polimerler (BFRP) ile güçlendirilmiş kirişlerin üzerinde çalışmalar yapmışlardır. BFRC model beton kirişlerin C30/37 MPa sınıflı betondan 8 mm çapındaki boyuna doğrultuda bazalt çubukları ile aynı kesitli güçlendirilmiş çelik çubuklar kullanılarak kıyaslama yapılmıştır. Nümerik ve

deneysel sonuçlar neticesinde BFRP donatılı kirişte ani göçme meydana gelmiştir. Fakat yükleme kuvvetinin daha düşük olduğu seviyelerde iyi sonuçlar gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre BFRP donatıların korozyona karşı tam dirençli ve betonun güçlenmesi için iyi bir alternatif donatı çeşidi olduğunu tespit etmişlerdir. [5]

C. Barris, L. Torres, A. Turon, M. Baena, A. Catalan çeliğin korozyonu nedeniyle analitik ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. Elastisite modülü yüksek olduğunu düşündükleri GFRP çubuklarını kullanmışlardır. Takviye oranı ve etkinliğini değiştirerek kısa süreli eğilme davranışını ölçmektedirler. Taşıma gücü ve nihai limit hallerinde deney sonuçları servis yüküne kadar olan davranışları karşılayabilirken, nihai yükleme sınırlarında ani göçme kırılmaların oluştuğunu, sünek olmayan bir davranış olduğunu gözlemlemişlerdir. [6]

Alsayed çelik GFRP donatılı hibrit kirişlerin yük yer değiştirme ilişkilerini deneysel olarak elde etmiş yönetmelik ve literatürde önerilen yöntemlerle karşılaştırmıştır. Kontrol parametresi olarak beton sınıfı ve donatı oranı kullanılmıştır. Önerilen yöntem ile deney sonuçlarının uyum içerisinde olduğu görülmüştür. [7]

Wang ve arkadaşları, çalışmalarında FRP donatılı normal dayanımlı ve lif takviyeli beton kullanılan kirişlerin eğilme davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Lif takviyeli beton kullanılması durumunda servis yüklerinde çatlak genişliklerinin azaldığı ve sünekliğin arttığı görülmüştür [8].

Çuluazoğlu Yüksek lisans tez çalışmasında FRP donatılı kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışını modelleyebilmek için bir bilgisayar programı geliştirmiştir. Betonarme kirişlerde, FRP çekme donatısının artırılmasıyla kirişteki deplasmanın büyük ölçüde azaldığı görülmüştür. Ayrıca hibrit donatılı kirişler FRP donatılı kirişlere göre daha sünek ve rijit olduğu gözlemlenmiştir. [9]

Kara ve arkadaşları çalışmalarında FRP ve çelik donatılı hibrit kirişlerin eğilme davranışını incelemişlerdir. Hibrit kirişlerin eğrilik, yer değiştirme ve moment kapasitesinin tahmin edilebilmesi için sayısal bir sistem sunmuşlardır. Bu sistemden

elde ettikleri verileri deneysel verilerle karşılaştırdıklarında sundukları sistemin eğrilik, yer değiştirme ve moment kapasitesini doğru tahmin ettiği görülmüştür. Ayrıca kirişlerde FRP donatıların kullanılmasına bağlı olarak süneklik ve rijitliğin de arttığı gözlemlenmiştir.[10]

Yoo ve arkadaşları çalışmalarında GFRP donatılı ve ultra yüksek performanslı beton kullanılan hibrit kirişlerin eğilme davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. GFRP donatı oranının artırılmasıyla kirişteki eğilme dayanımı arttığı gözlenmiştir, hibrit kirişlerde çelik donatı sünekliği arttırmış ancak FRP donatılı kirişlere göre taşıma gücünün daha küçük olduğu görülmüştür. [11]

Lau ve Pam çalışmalarında çelik donatılı, FRP donatılı ve her iki donatının da birlikte kullanıldığı hibrit kirişlerin deneylerini yapmışlardır. Hibrit kirişlerde daha sünek bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Yapılan deneylerde ayrıca FRP donatılı kirişlerde denge üstü donatılı olanlarında da bu sünek davranışı gözlemlediklerini belirtmişlerdir. [12]

Issa ve arkadaşları çalışmalarında GFRP donatılı kirişlerde eğilme davranışı ve kirişlerin sünekliğine liflerin katkının etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre çelik donatı kullanımının sünekliği, GFRP donatı kullanımının ise eğilme dayanımını arttırdığı görülmüştür. [13]

Urbanski ve arkadaşları çalışmalarında bazalt donatılı betonarme kirişlerin eğilme altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Kirişlerin eğilme deneyi sonucunda deplasman ve çatlak gelişimleri elde edilmiştir. Bazalt donatılı kirişlerin geleneksel donatılı kirişlere göre daha fazla yük taşıdıkları ve daha fazla deplasman yaptıkları görülmüştür. [14]

Ünsal ve arkadaşları çalışmalarında çekme rijitleşmesinin, FRP ve çelik donatılı betonarme kirişlerin yük-deplasman davranışı üzerindeki etkisi teorik olarak incelenmiştir. Yapılan analizlerde, literatürde mevcut çeşitli deneysel çalışmalarda test edilmiş olan on iki adet FRP ve çelik donatılı kiriş numunesi esas alınmıştır. Analizlerden elde edilen sonuçlar, mevcut deneysel çalışmalarda verilen kiriş

numunelerine ait yük-deplasman ilişkileriyle karşılaştırılmışlardır. [15]

Ünsal ve arkadaşları bir başka çalışmalarında hibrit kirişlerin yük deplasman davranışlarını teorik olarak incelemişlerdir. Literatürde deneyleri yapılmış kirişlerin yük-deplasman eğrileri ile teorik olarak elde edilmiş yük-deplasman eğrilerini karşılaştırmışlardır. [16]

El-Refai ve arkadaşları GFRP donatılı hibrit kirişlerin eğilme davranışlarını irdelenmişlerdir. Hibrit donatılı kirişlerde denge üstü donatı kullanılması durumunda GFRP donatılı kirişlere oranla dayanım ve sünekliğin arttığı görülmüştür. Deney sonuçları yönetmeliklerde FRP donatılı kirişler için önerilen ve literatürde hibrit kirişler için önerilen teorik hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar açısından GFRP donatılı kirişlere oranla daha iyi performans sergilediğini gözlemlemişlerdir. Test sonuçlarına bağlı olarak, ACI-440.1R-15 standardında ile teorik analiz sonuçlarının uyumlu olduğunu göstermişlerdir. [17]

Qin ve arkadaşları hibrit donatılı kirişlerin eğilme davranışını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Hibrit kirişlerin taşıma gücü kapasitelerini arttırmak taşıma gücü kapasitesini ve süneklikliğini iyileştirmek için FRP donatı oranı için uygun bir aralık belirlemeye çalışmışlardır [18]

Alsayed çalışmasında çelik donatılı ve GFRP donatılı kirişlerin eğilme davranışlarını deneysel ve teorik olarak karşılaştırmışlardır. FRP donatılı yapı elemanlarının tasarımında kullanılan yönetmelikte önerilen formülasyonda düzenlemeler yapmışlardır. Önerdikleri yeni formülasyon ile deney sonuçlarının uyumlu olduğunu görmüşlerdir. [19]

Cai ve arkadaşları çalışmalarında BFRP donatılı normal beton ve lif takviyeli beton kullanılmış kirişlerin eğilme davranışını ATENA sonlu eleman programı ile analiz etmişlerdir. Kullanılan yöntemin doğruluğunu kanıtlamak için simülasyon sonuçları ile literatürde deneyleri yapılmış kiriş örnekleri karşılaştırılmıştır. Lifli beton kullanılması durumunda yük taşıma kapasitesinin, sünekliğinin ve çatlak kontrolünün arttığı görülmüştür.[20]

Yang ve arkadaşları çalışmalarında yüksek dayanımlı beton kullanılan FRP donatılı (GFRP ve CFRP) kirişlerin çatlak davranışı yük taşıma kapasitesi ve sünekliğine lif katkıların etkisini incelemişlerdir. Yüksek dayanımlı beton elde etmek için kullanılan lif takviyesinin ilk çatlama yükünü, eğilme dayanımını ve sünekliği arttırdığı ve çatlak genişliklerini azalttığı görülmüştür. [21]

Kara ve arkadaşları bir diğer çalışmalarında FRP donatılı kirişlerin deplasman hesabı için rijitlik matrisine dayalı bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntemin doğruluğu literatürde deneyleri yapılmış elemanlar modellenerek kontrol edilmiştir. Önerilen yöntemin literatürdeki diğer yöntemlere kıyasla deney sonuçları ile daha uyumlu olduğu görülmüştür[22]

Mustafa ve Hassan çalışmalarında cam ve karbon donatılı hibrit kirişlerin eğilme davranışlarını doğrusal olmayan sonlu eleman modeli ile incelemişlerdir. Çelik donatı ile beraber kullanılan cam ve karbon donatıların kirişin sünekliğini arttırdığı ve istenmeyen gevrek kırılmayı önlediği görülmüştür. Cam donatılı hibrit kirişlerde ilk çatlak oluşumundan sonra ve çelik donatının akması ile rijitliğin önemli ölçüde azaldığı ve deplasmanların arttığı gözlemlenmiştir. Karbon donatılı hibrit kirişlerde ise çatlak oluşumu ve çatlak yayılımı sırasında daha iyi bir performans elde edilmiştir. [23]

Brozda ve arkadaşları aramid, cam ve karbon lifli donatı kullanılan basit mesnetli kirişlerin literatürdeki yönetmeliklere göre statik analizlerini yapmışlar ve farklı donatı türleri için sonuçları karşılaştırmışlardır.[24]

Zhu ve arkadaşları kısmi lif takviyeli hibrit kirişlerin eğilme davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan parametreler FRP donatı oranı, lif oranı ve lif takviye kalınlığıdır. Çekme bölgesinde yapılan lif takviyesinin çatlak genişliğini ve deformasyon miktarını azalttığı ancak kirişin sünekliğini azalttığı görülmüştür. Donatı oranındaki artışın eğilme dayanımının, çatlak oluşumundan sonraki rijitliğin arttırdığı ve çatlak genişliklerini azalttığı görülmüştür. [25]

Yoo ve arkadaşları çalışmalarında cam elyaf donatılı kullanılan hibrit ultra yüksek

performanslı betonarme kirişlerinin eğilme davranışlarını incelemişlerdir. Üç tane cam elyaf donatılı ve dört tane hibrit donatılı kiriş hazırlanmış ve test edilmiştir. Ultra yüksek performanslı betonun pekleşme özelliğinden dolayı çatlakların oluşmaya başlamasından sonra rijit doğrusal yük deplasman davranışı sergilemişlerdir ve çatlak genişlikleri CAN/CSA S806 (fiber katkılı yapı elemanlarının tasarım yapımı ile ilgili yönetmelik)da belirtilen şartları sağlamaktadır. GFRP donatı oranının arttırılması kirişin eğilme davranışını geliştirmiştir. Çelik ve GFRP donatıların beraber kullanıldığı hibrit kirişlerde çelik akmadan önceki rijitliğe katkısı olmuştur daha yüksek ard çatlama rijitliği katkısı olmuştur fakat deformasyon yeteneğini azalttığı görülmüştür. [26]

Lau ve Pam benzer bir çalışma yapmışlardır ve hibrit kirişlerin FRP donatılı kirişlere göre, denge üstü donatılı kirişlerinde dengeli donatı oranına sahip kirişlere göre daha sünek bir davranış sergiledikleri görülmüştür.[27]

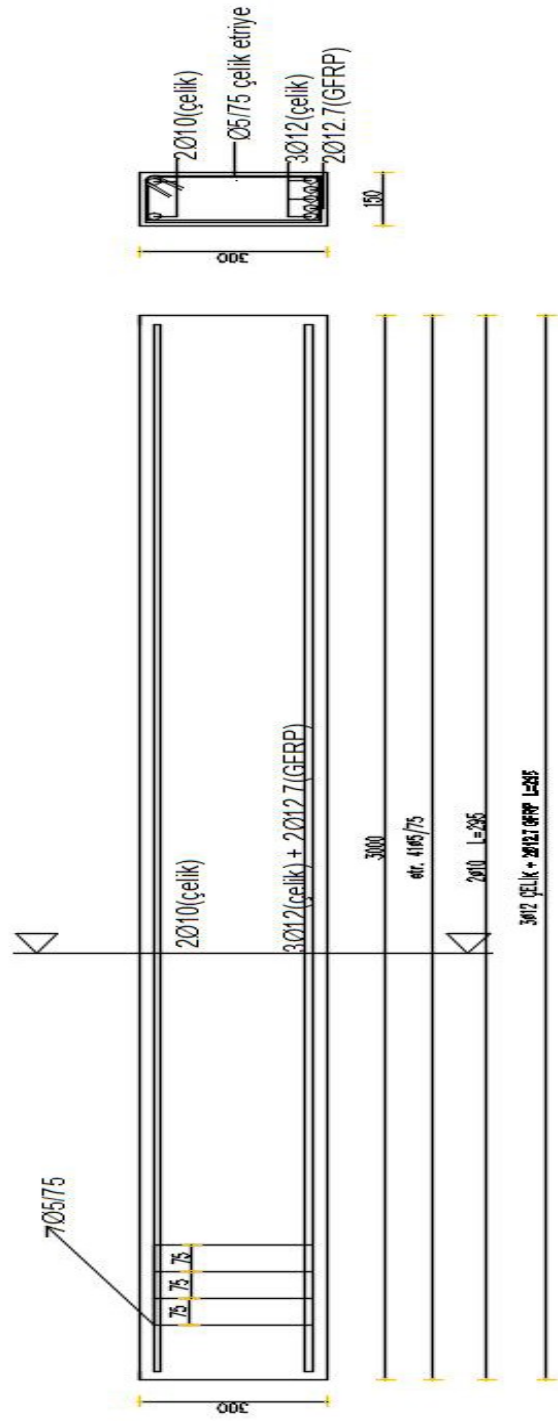
2.DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1.Deney Programı

Deneyisel çalışma kapsamında 6 adet kiriş üretilmiş ve iki noktalı yükleme etkisindeki eğilme deneyleri yapılmıştır. Deney elemanları 3 metre uzunluğunda 150 mm genişliğinde ve 300 mm yüksekliğindedir. Bütün deney elemanlarında iki tane 10 mm çaplı basınç donatısı ve 75 mm aralıkla 5 mm çaplı etriyeler kullanılmıştır. Her elemanda çekme bölgesinde 5 tane donatı kullanılmıştır. Çekme bölgesinde kullanılan çelik ve GFRP donatı oranları her elemanda farklı olacak şekilde tasarlanmıştır. Çalışmada kullanılan bir diğer değişken de beton dayanımıdır. Deney elemanları isimlendirilirken kullanılan ilk sembol beton sınıfını tanımlamaktadır. “N” normal beton basınç dayanımını (30 MPa), “H” ise kirişte yüksek dayanımlı beton (60MPa) kullanıldığını göstermektedir. İkinci sembol “G” çekme bölgesinde cam elyaf donatı olduğunu, bu sembolden sonraki sayısı kaç tane cam elyaf (GFRP) donatı kullanıldığını göstermektedir. Benzer şekilde 4. sembol “S” çekme bölgesinde çelik sonrasındaki sayı da bu donatının adedini göstermektedir. Çizelge 2.1.’de deney elemanlarının beton ve donatı türleri gösterilmiştir. Şekil 2.1.- Şekil 2.2.-2.6.’da eleman kesitleri donatı detayları verilmiştir.

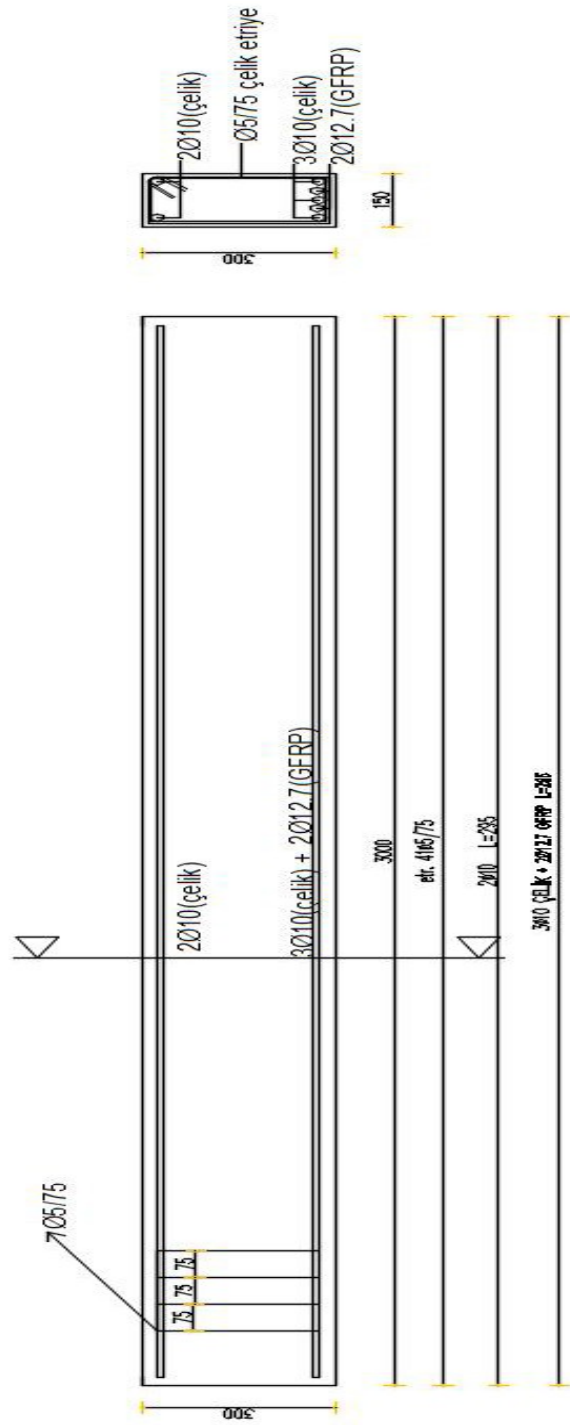
Çizelge 2.1. Çelik donatı ve GFRP donatı detayları

Numune Adı	f_c (MPa)	Çelik Donatı Sayısı	GFRP Donatı Sayısı	Çelik Donatı Çapı (mm)	GFRP Donatı Çapı(mm)
HG2S3	60	3	2	10	12.7
HG3S2	60	2	3	10	12.7
HG3S2	60	2	3	12	12.7
NG2S3	30	3	2	10	12.7
NG3S2	30	2	3	10	12.7
NG2S3	30	3	2	12	12.7



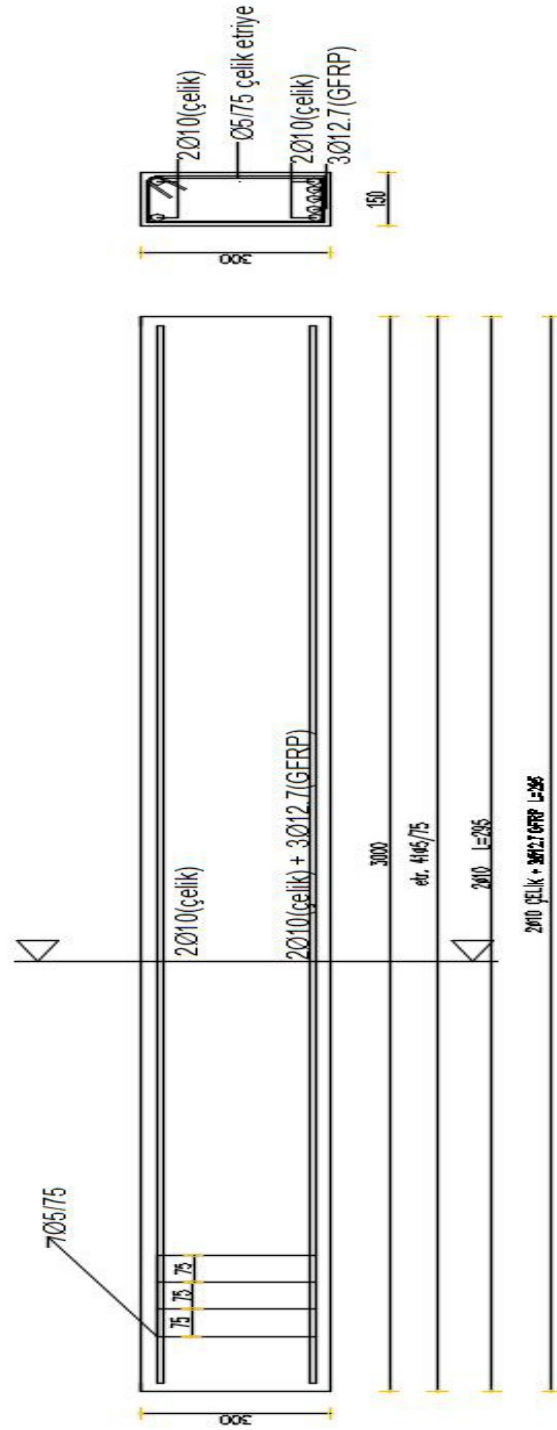
NG2S3(G12.7S12) elemanı donatı detay çizimleri

Şekil 2.1. NG2S3(G12.7S12) kiriş donatı detayı



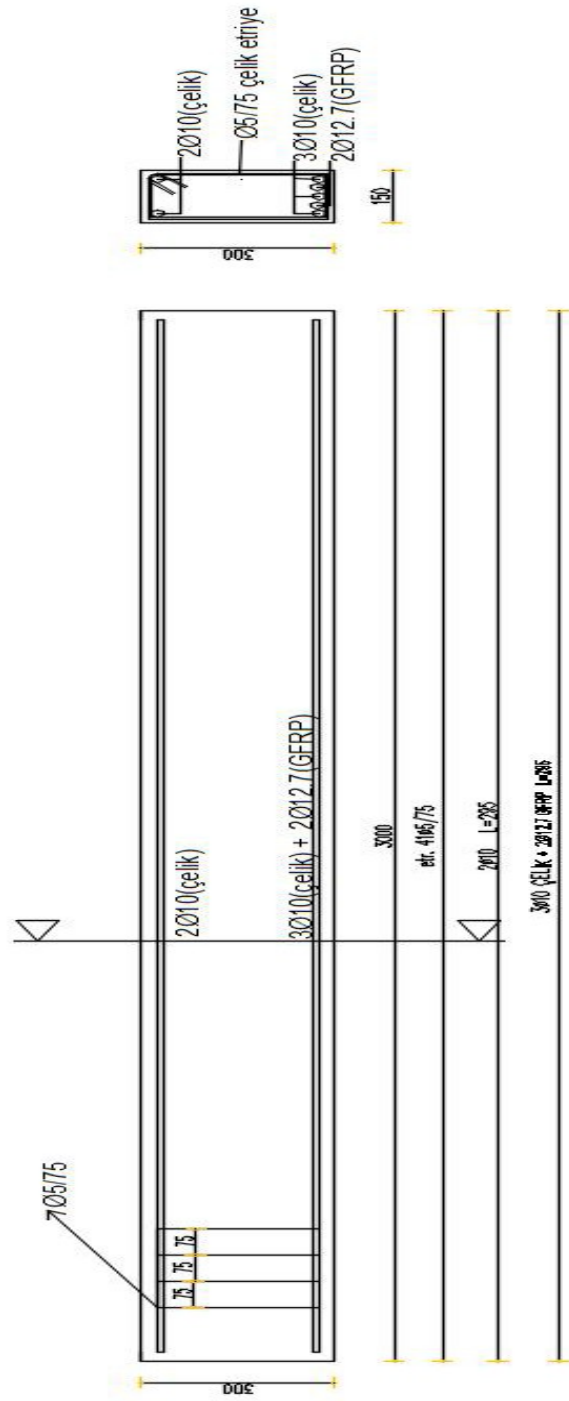
NG2S3(G12.7S10) elemanı donatı detay çizimleri

Şekil 2.2. NG2S3(G12.7S10) kiriş donatı detayı



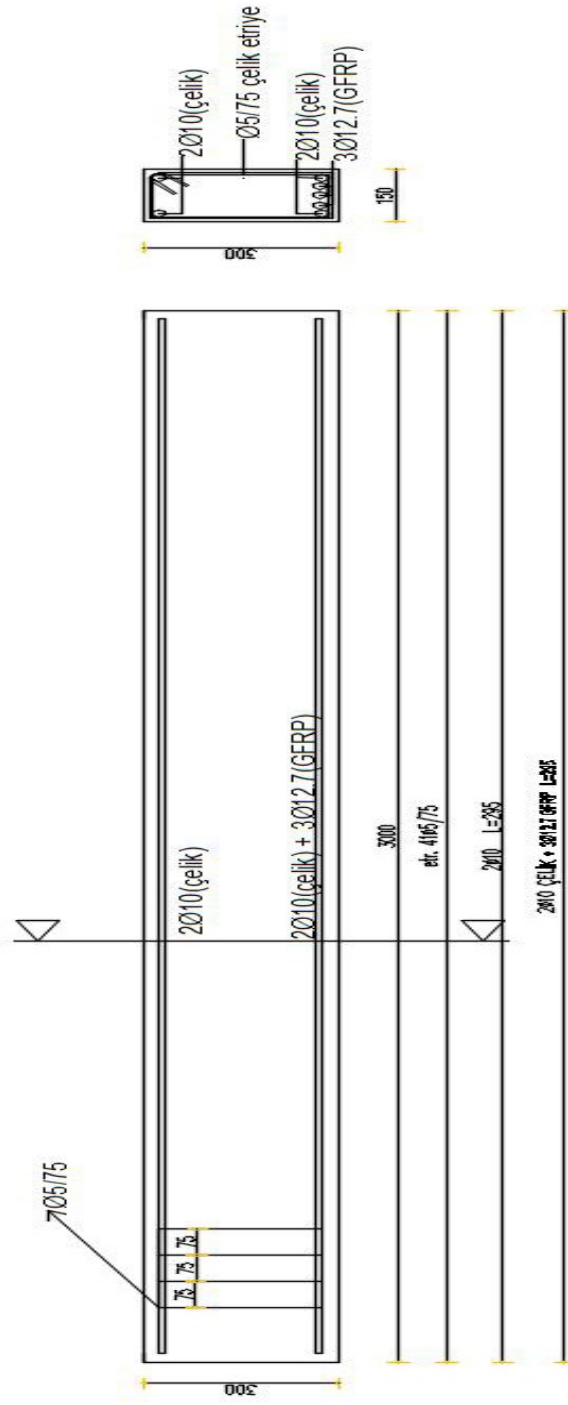
NG3S2(G12.7S10) eleman donatı detay çizimleri

Şekil 2.3. NG3S2(G12.7S10) kiriş donatı detayı



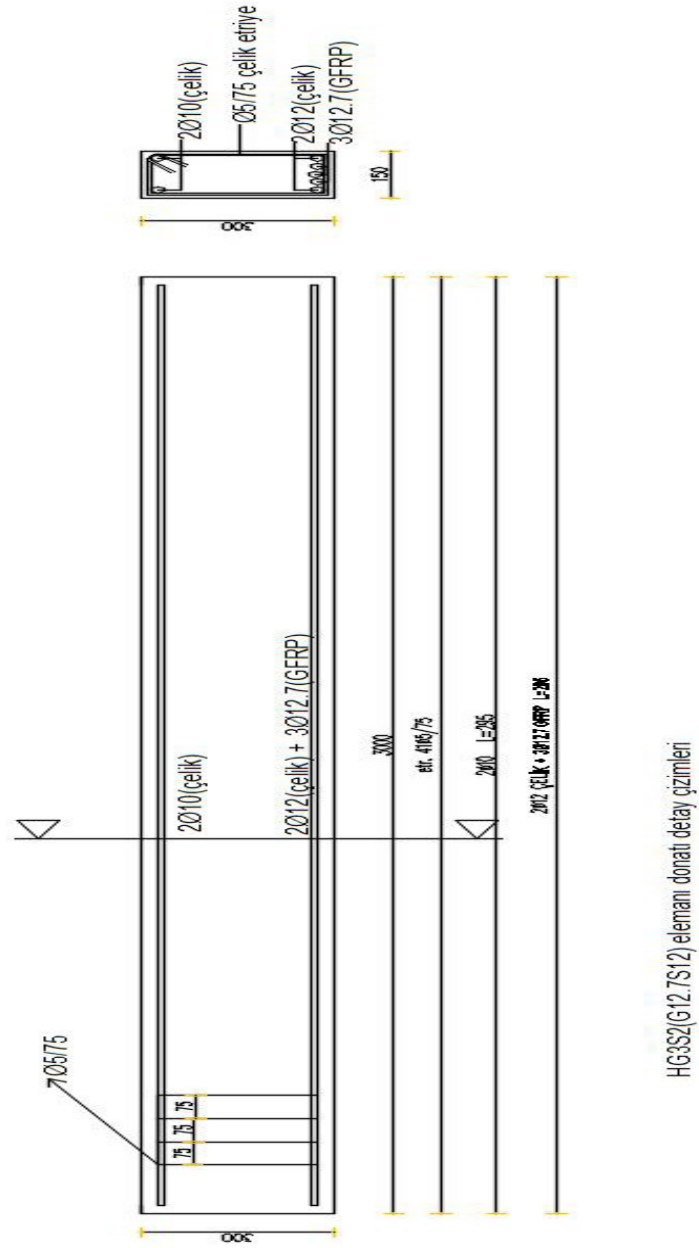
HG2S3(G12.7S10) elemanı donatı detay çizimleri

Şekil 2.4. HG2S3(G12.7S10) kiriş donatı detayı



HG3S2(G12.7S10) elemanı donatı detay çizimleri

Şekil 2.5. HG3S2(G12.7S10) kiriş donatı detayı



Şekil 2.6. HG3S2(G12.7S12) kiriş donatı detayı

2.2. Malzeme Özellikleri

Deney elemanları hazırlanırken öncelikle tüm deney elemanlarının donatıları hazırlanmıştır. Daha sonra yüksek ve normal dayanımlı beton ayrı ayrı temin edilerek

her iki gruba ait kiriş betonları dökülmüştür. Deney elemanlarının deney öncesi ve beton dökümü sonrası fotoğrafları Şekil 2.7.-Şekil 2.10. da verilmiştir. Her iki beton sınıfı içinde döküm esnasında küp numuneler alınmıştır ve basınç dayanımları Çizelge 2.2. ve Çizelge 2.3.’de verilmiştir. Normal beton, beton santralinden temin edilmiştir. Yüksek dayanımlı beton da Kırıkkale Üniversitesi kampüsünde aktif inşaatı devam etmekte olan hızlı tren şantiyesinden temin edilmiştir. Çelik ve GFRP donatılar da tek seferde temin edilmiştir. Üreticiden alınan mekanik özellikleri Çizelge 2.4.’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Yüksek dayanımlı betonun numune dayanımları

Numune No	7 Günlük		28 Günlük	
	Küp Dayanımı f_c (MPa)	Silindir Dayanımı f_c (MPa)	Küp Dayanımı f_c (MPa)	Silindir Dayanımı f_c (MPa)
1	57,80	57,80	74,6	63,41
2	57,12	57,12	71,4	60,69
3			75,1	63,83
Ortalama		57,46		62,64

Çizelge 2.3. Normal dayanımlı betonun numune dayanımları

Numune No	7 Günlük		28 Günlük	
	Küp Dayanımı f_c (MPa)	Silindir Dayanımı f_c (MPa)	Küp Dayanımı f_c (MPa)	Silindir Dayanımı f_c (MPa)
1	33,15	28,18	44,47	37,80
2	35,30	30,00	45,54	38,71
3	33,19	28,21	43,71	37,15
Ortalama		28,80		37,89

Çizelge 2.4. Kullanılan donatıların özellikleri

Malzeme	Çap (mm)	Akma Dayanımı(MPa)	Kopma Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Çelik Çekme Donatısı	12	420	500	200 000
Çelik Basınç Donatısı	10	420	500	200 000
Etriye	5	220	350	200 000
Cam Elyaf Donatı	12.7		450	35 000



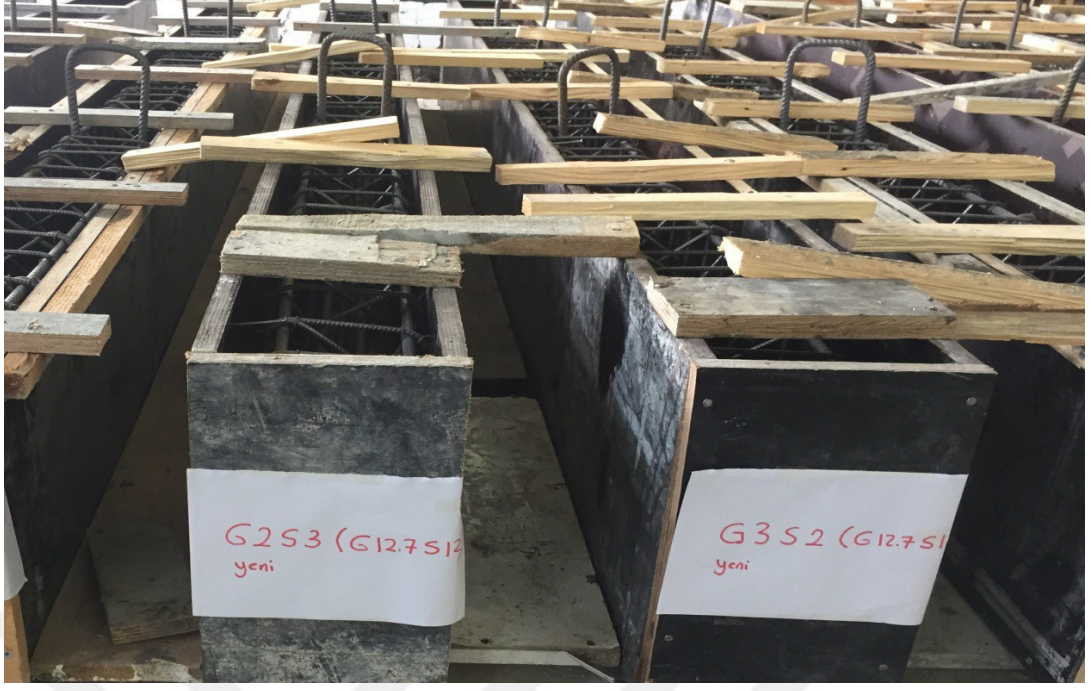
Şekil 2.7. Cam Elyaf Donatı (GFRP)



Şekil 2.8. Yüksek dayanımlı kirişlerin beton döküm öncesi kalıp durumu



Şekil 2.9. Yüksek dayanımlı kirişlerin beton döküm sonrası kalıp durumu



Şekil 2.10. Normal dayanımlı kirişlerin beton döküm öncesi kalıp durumu

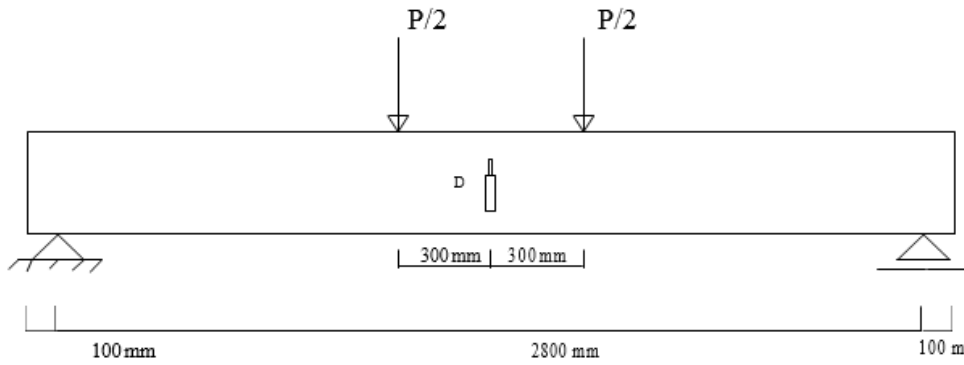


Şekil 2.11. Normal dayanımlı kirişlerin beton döküm sonrası kalıp durumu

2.3. Yük ve lm Düzeneği

Deney elemanlarının hazırlanması ve deneyleri için Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İaat Mühendisliği Yapı Mekaniği Laboratuvarı kullanılmıştır. Yüksek lisans alışması “YÜKSEK PERFORMANSLI BETON KULLANILAN HİBRİT KİRİşLERİN EğİLME DAVRANIşI” adlı BAP projesi kapsamında yürütülmüştür. Kiriş deneyleri 80 kN kapasiteli elik yükleme çerçevesinde yapılmıştır. Deney düzeneğinde yk, hidrolik bir kriko tarafından önce bir elik yükleme kirişine tek noktadan uygulanmıştır. Yükleme kirişi bir tarafı sabit ve bir tarafı kayıcı (basit) mesnetli olacak şekilde deney elemanının üzerine yerleştirilerek izostatik bir yükleme sistemi oluşturulmuştur. (şekil 2.12)

Deney elemanlarının açıklık ortasındaki sehimlerini ölçmek amacıyla LVDT (elektronik deplasman ölçer) kullanılmıştır ölçüm düzeneği ve deplasman ölçümünde kullanılan LVDT şekilde gösterilmiştir.



şekil 2.12. Yük ve ölçüm sistemi

3.DENEYLER

Çalışma kapsamında yapılan deneyler iki gruba ayrılmıştır. Birinci gruptaki deney elemanlarında normal dayanımlı beton kullanılmıştır. Kullanılan çekme donatısı türü ve çapına göre donatı oranı farklılık göstermektedir. Her iki gruptaki kirişlerin deneyleri görseller ve grafiklerle beraber yorumlanmıştır. Deney elemanlarının tümünde çelik donatı oranı cinsinden elde edilen efektif donatı oranı dengeli donatı oranının altında kalacak şekilde tasarlanmıştır. Bütün elemanlarda sırası ile ilk önce çelik donatıda akma sonra betonda ezilme ve en son olarak da GFRP donatıda kopma olması beklenmektedir.

3.1. Normal Dayanımlı Beton Kullanılan Kiriş Elemanları

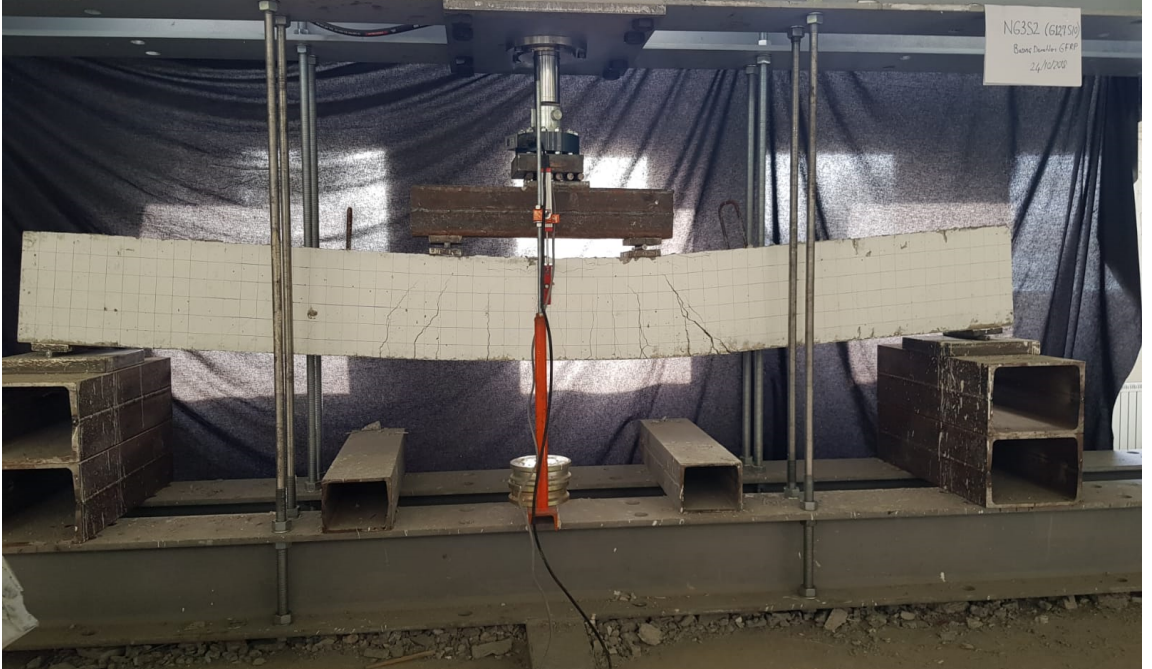
3.1.1. NG3S2 (G12.7S10) Deney Elemanı

Deney elemanının yükleme öncesi ve çatlak oluşumu başladıktan sonraki görünümleri Şekil 3.1 ve Şekil 3.2 de görülmektedir. Elemanın deneysel yük deplasman grafiği Şekil 3.3 de verilmiştir. Deney elemanında kullanılan betonun basınç dayanımı 30 MPa'dır. Deney elemanında çekme bölgesinde 3 tane cam elyaf 2 tane çelik donatı kullanılmıştır. 41 kN yük ve 4.4 mm deplasmanda 6 adet eğilme çatlakları belirlenmiştir. Bu çatlaklardan basınç yüzüne en yakın olanın mesafesi 12 cm'dir. 90 kN yük ve 24.30 mm deplasmanda eğilme çatlaklarından basınç yüzüne en yakın olanın mesafesi 4 cm olarak tespit edilmiştir. Yük 125 kN deplasman 45 mm iken donatıda kopma gerçekleşmiş ve yük aniden 97 kN seviyelerine düşmüş deplasman ise 46.5 mm'ye ulaşmıştır. Yük toparlanarak 110 kN'a çıkmıştır. Deplasman 54 mm'dir. Bu aşamada beton basınç yüzündeki ezilme belirginleşmiştir. Yük 118 kN'a çıkmış, deplasman 73 mm'ye ulaşmıştır. Bu aşamada bir kopma daha gerçekleşmiş ve yük aniden 79 kN seviyesine düşmüş, deplasman ise yaklaşık 79 mm olmuştur. Yük tekrar toparlanmış ve 92 kN'a geldiğinde aniden bir kopma daha gerçekleşmiş ve yük 47 kN seviyelerine düşmüştür. Deplasman yaklaşık 107 mm olmuştur. Yük 55 kN seviyelerine ulaşmıştır.

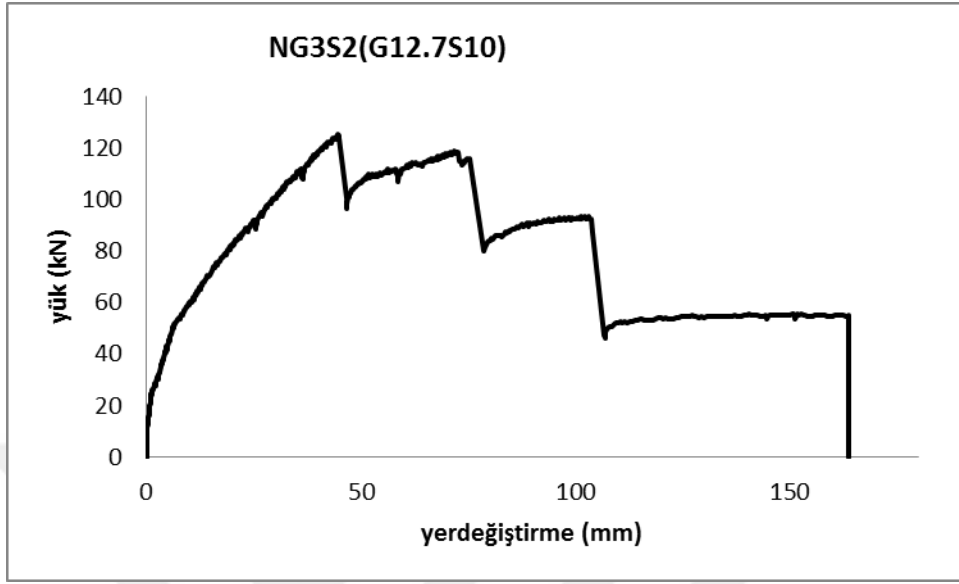
53 kN yük ve 163 mm deplasman değerinde deney güvenliği için deneye son verilmiştir.



Şekil 3.1. NG3S2 (G12.7S10) elemanı deneyi



Şekil 3.2. NG3S2 (G12.7S10) elemanı çatlak oluşumu



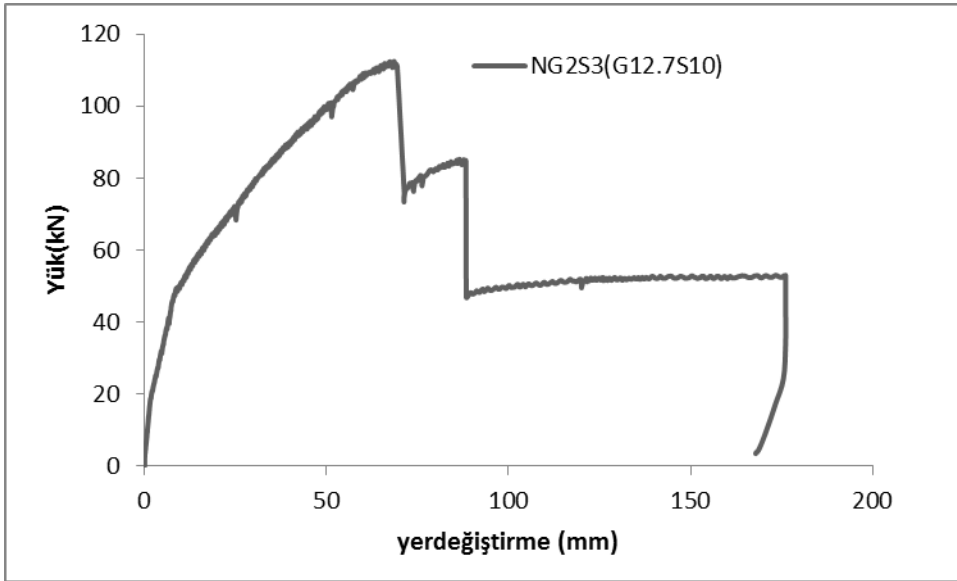
Şekil 3.3. NG3S2 (G12.7S10) elemanı yük deplasman grafiği

3.1.2. NG2S3 (G12.7S10) Deney Elemanı

Deney elemanının yükleme öncesi görünümü Şekil 3.4’de görülmektedir. Elemanın deneysel yük deplasman grafiği Şekil 3.5 de verilmiştir. Deney elemanında kullanılan betonun basınç dayanımı 30 MPa’dır. Deney elemanında çekme bölgesinde 2 tane cam elyaf 3 tane çelik donatı kullanılmıştır. 40 kN yük ve 6.60 mm deplasmanda 8 tane eğilme çatlakı gözlenmiştir. Bu çatlakların boyu kiriş ortasına ulaşmıştır. 70 kN yükte deplasman 23 mm’ye ulaşmıştır. Eğilme çatlaklarından basınç yüzüne en yakın olanın mesafesi 5 cm’dir. 100 kN yük ve yaklaşık 51 mm deplasmanda kabuk betonunun kabarmaya başladığı belirlenmiştir. Yük yaklaşık 112 kN deplasman 70 mm civarındayken donatıda kopma olmuş ve yük aniden 74 kN’a düşmüştür. Sonra toparlanarak 87 kN’a çıkmıştır. Deplasman 88 mm’dir. Bu aşamada tekrar donatıda kopma olmuş ve yük 43 kN seviyelerine düşmüştür. Yük tekrar bir miktar toparlanmıştır. 53 kN yük ve yaklaşık 176 mm deplasman değerinde deneye son verilmiştir.



Şekil 3.4. NG2S3 (G12.7S10) deney elemanı



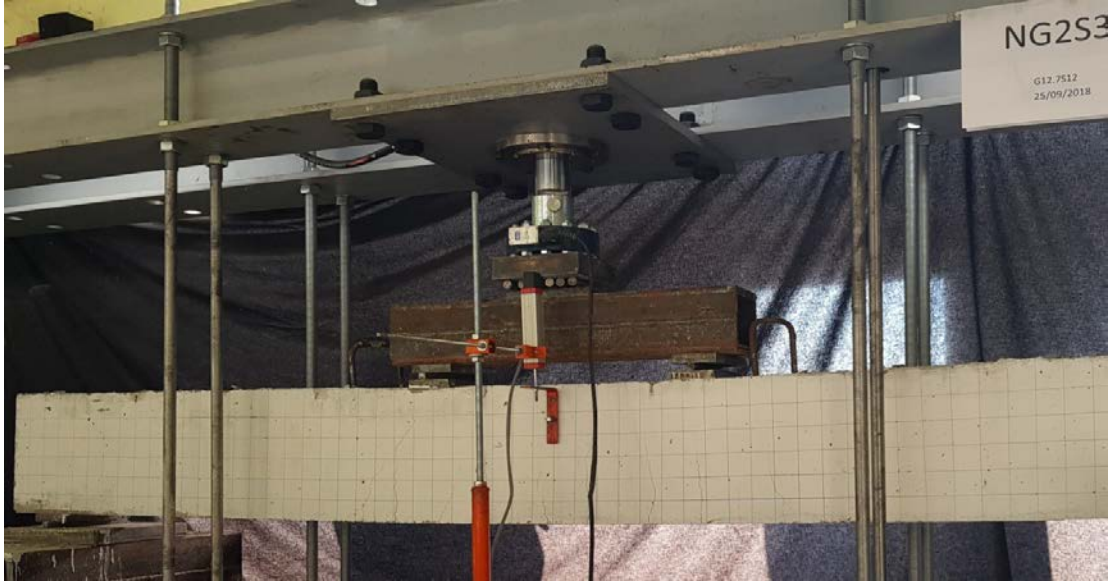
Şekil 3.5. NG2S3 (G12.7S10) elemanı yük-deplasman grafiği

3.1.3. NG2S3 (G12.7S12) Deney Elemanı

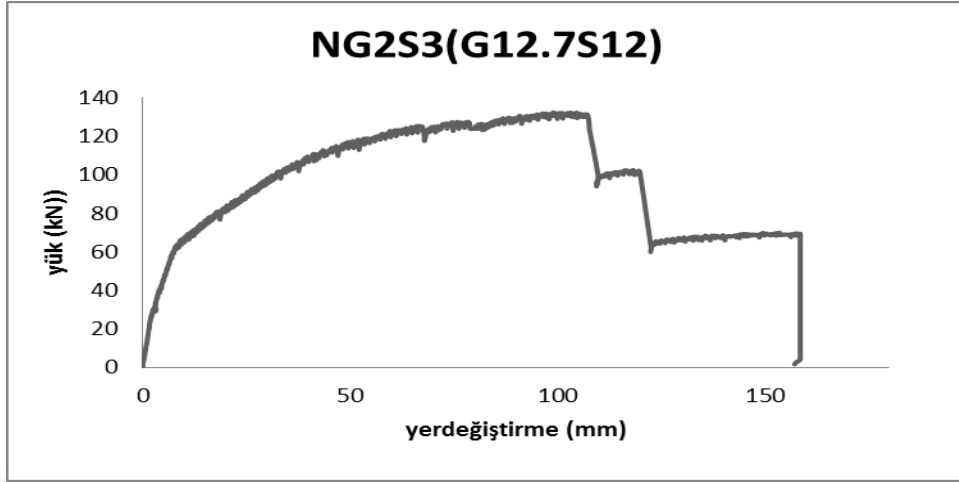
Deney elemanının yükleme öncesi ve ilk çatlaklar oluşmaya başladıktan sonraki görünüşleri Şekil 3.6 ve Şekil 3.7 de görülmektedir. Elemanın deneysel yük deplasman grafiği Şekil 3.8 de verilmiştir Deney elemanında kullanılan betonun basınç dayanımı 30 MPa'dır. Deney elemanında çekme bölgesinde 2 tane cam elyaf 3 tane çelik donatı kullanılmıştır. 42 kN yük ve 4.47 mm deplasmanda kirişte 3 adet kılcal düzeyde ana eğilme çatlakları belirlenmiştir. 80 kN yük ve 18.5 mm deplasman değerinde 10 adet eğilme çatlakları gözlenmiştir. Bu çatlaklardan basınç yüzüne en yakın olanın mesafesi yaklaşık 7 cm'dir. Yük 117 kN ve deplasman 52 mm'ye ulaştığında kabuk betonunda kabarma başlamıştır. 124 kN'da iki yük mesnedi arasında kabuk betonu iyice kabarmıştır. Yük 132 kN'a ulaştığında deplasman 102 mm'dir. Bu aşamada donatıda kopma gerçekleşmiştir. Yük aniden 130 kN'dan 94 kN'a düşmüştür. Ardından 102 kN'a kadar bir miktar toparlamış ve deplasman yaklaşık 120 mm iken yine bir kopma gerçekleşmiş ve yük değeri 60 kN seviyelerine kadar düşmüştür. Daha sonra yükte pek artış olmamış, artan deformasyonla kiriş yük taşımaya devam etmiştir. Yaklaşık 70 kN yük ve 160 mm deplasmanda deney güvenliği için deneye son verildi. Cam elyaf donatılar koptuktan sonra geriye çelik donatılar kalmıştır. Bundan sonraki davranış da çelik donatılı betonarme kirişlerin yük deplasmanı gibi olmuştur.



Şekil 3.6. NG2S3 (G12.7S12) elemanı deneyi

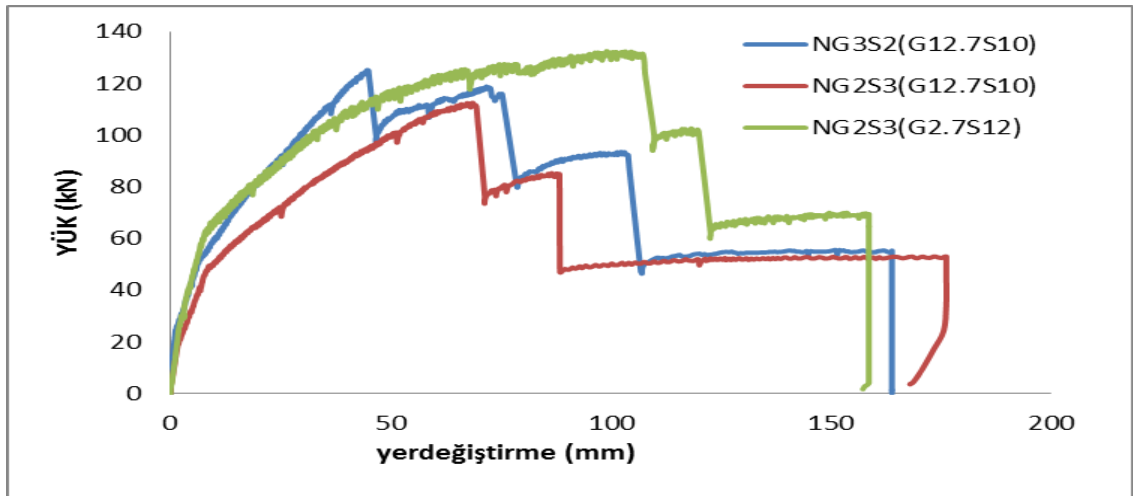


Şekil 3.7. NG2S3 (G12.7S12) elemanı çatlak oluşumu



Şekil 3.8. NG2S3 (G12.7S12) elemanı yük deplasman grafiği

Normal dayanımlı elemanların yük deplasman grafikleri kendi aralarında incelendiğinde yaklaşık olarak çelik donatıda akma olana kadar kadar yük deplasman eğrilerinin eğimlerinin birbirine yakın olduğu, çelik donatı miktarının artışıyla ilk kopma anındaki deplasman değerinin arttığı görülmektedir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Normal dayanımlı elemanların birleştirilmiş yük deplasman grafikleri

3.2 Yüksek Dayanımlı Beton Kullanılan Kiriş Elemanları

3.2.1 HG2S3 (G12.7S10) Deney Elemanı

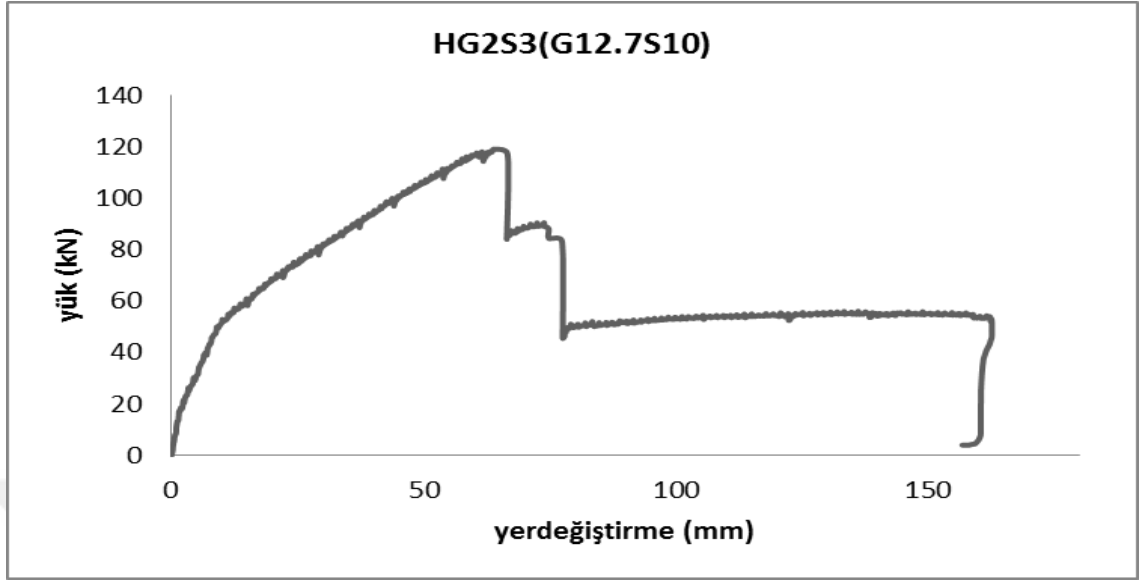
Deney elemanının yükleme öncesi ve deney sonrası görünüşleri Şekil 3.10 ve Şekil 3.11 de görülmektedir. Elemanın deneysel yük deplasman grafiği Şekil 3.12 de verilmiştir. Deney elemanında kullanılan betonun basınç dayanımı 60 MPa'dır. Deney elemanında çekme bölgesinde 2 tane cam elyaf 3 tane çelik donatı kullanılmıştır. 20 kN yük ve 2.43 mm deplasmanda eğilme çatlakları kirişin ortasına kadar ilerlemiştir. 40 kN yük değerinde deplasman 6.80 mm olmuştur. Eğilme çatlakları basınç yüzüne 9 cm yaklaşmış durumdadır. 70 kN yük değerinde deplasman 21.48 mm olarak belirlenmiştir. Bu aşamada halâ 9 adet eğilme çatlağı görülmektedir. 80 kN yük ve 29 mm deplasmanda eğilme çatlakları basınç yüzüne 3 cm yaklaşmış durumdadır. 115 kN yük ve 57 mm deplasmanda basınç bölgesindeki betonda ezilmeler gözlenmiştir. Yük 117 kN deplasman 62 mm iken donatıda kopma gerçekleşmiş ve yük 86 kN'a düşmüştür. Yük 89 kN'a çıktıktan kısa bir süre sonra aniden 48 kN seviyelerine düşmüştür. Yük 55 kN seviyelerine kadar toparlanmıştır. 54 kN yük ve 162 mm deplasman değerinde deney güvenliği için deneye son verilmiştir.



Şekil 3.10. HG2S3 (G12.7S10) elemanı deneyi



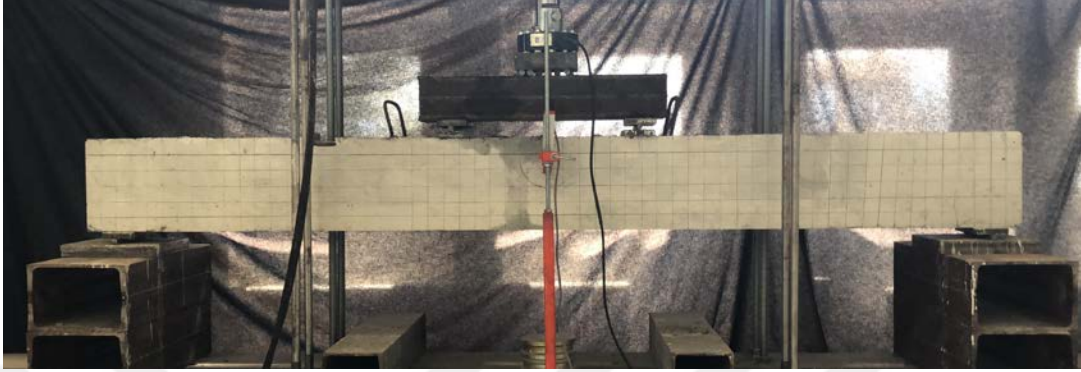
Şekil 3.11. HG2S3 (G12.7S10) elemanı deney sonu



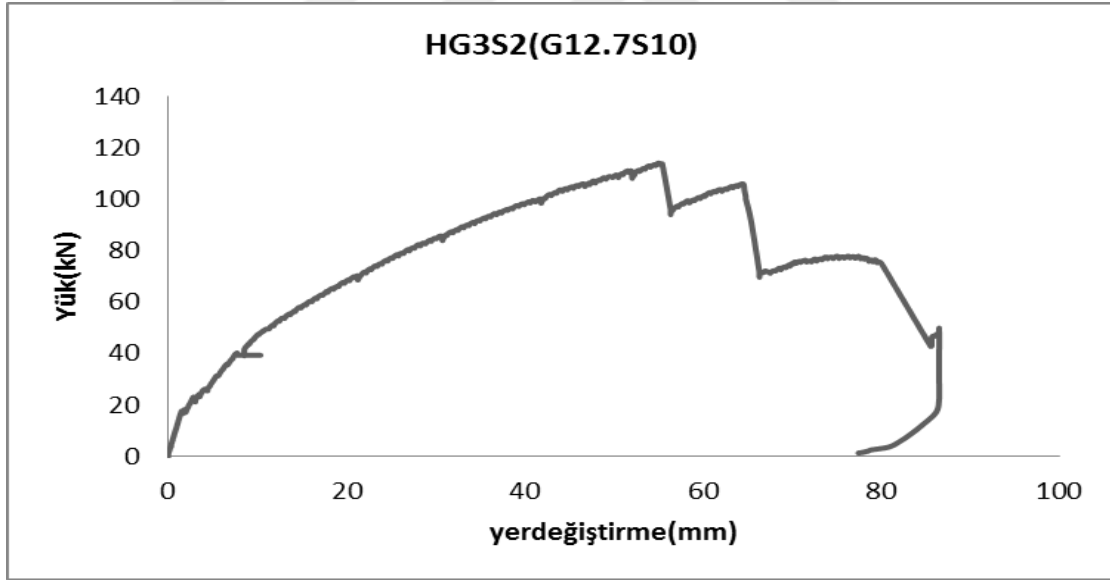
Şekil 3.12. HG2S3 (G12.7S10) elemanı yük deplasman grafiği

3.2.2 HG3S2 (G12.7S10) Deney Elemanı

Deney elemanının yükleme öncesi görünümü Şekil 3.13 de görülmektedir. Elemanın deneysel yük deplasman grafiği Şekil 3.14 de verilmiştir. Deney elemanında kullanılan betonun basınç dayanımı 60 MPa'dır. Deney elemanında çekme bölgesinde 3 tane cam elyaf 2 tane çelik donatı kullanılmıştır. 40 kN yük ve 7.72 mm deplasmanda 10 tane eğilme çatlakları belirlenmiştir. Eğilme çatlaklarından basınç yüzüne en yakın olanın mesafesi 8 cm'dir. 70 kN yük değerinde deplasman 21.2 mm'ye ulaşmıştır. Yük 100 kN deplasman 41.73 mm'ye ulaştığında kabuk betonunda ezilme görülmemiştir. Yük 111 kN deplasman 52 mm'ye ulaştığında kabuk betonunda çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir. Yük 114 kN deplasman 55 mm'ye ulaştığında donatıda kopma olmuş ve yük aniden 95 kN'a düşmüştür. Daha sonra yükte bir toparlanma olmuş yaklaşık 106 kN'a kadar çıkmıştır. Yük aniden 71 kN seviyesine düşmüştür. Kabuk betonunda ezilme olduğu belirlenmiştir. Yük 77 kN'a kadar çıkmış sonra aniden yeni kopma ile 42 kN seviyesine düşmüştür. Bu aşamada deplasman 86 mm civarındadır. 48 kN yük 86 mm deplasman değerinde deneye son verilmiştir.



Şekil 3.13. HG3S2 (G12.7S10) elemanı deneyi



Şekil 3.14. HG3S2 (G12.7S10) elemanı yük deplasman grafiği

3.2.3 HG3S2 (G12.7S12) Deney Elemanı

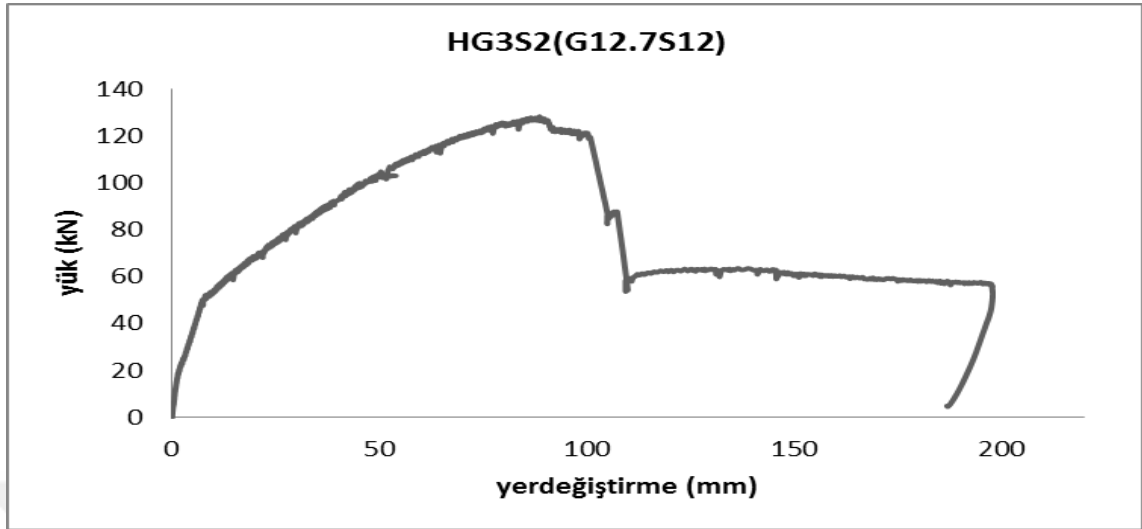
Deney elemanının yükleme öncesi ve deney sonrası görünüşleri Şekil 3.15 ve Şekil 3.16 da görülmektedir. Elemanın deneysel yük deplasman grafiği Şekil 3.17 de verilmiştir. Deney elemanında kullanılan betonun basınç dayanımı 60 MPa'dır. Deney elemanında çekme bölgesinde 3 tane cam elyaf 2 tane çelik donatı kullanılmıştır. 49 kN yük değerinde deplasman 7.38 mm olarak belirlenmiştir. Eğilme çatlaklarından sol taraftaki çatlak basınç yüzüne 10 cm mesafededir. Bu aşamada 8 tane eğilme çatlağı gözlenmiştir. 60 kN yük ve 14.23 mm deplasmanda eğilme çatlaklarından basınç yüzüne en yakın olanları 8 cm mesafededir. 79 kN yükte deplasman 29 mm olarak belirlenmiştir. Eğilme çatlaklarından basınç yüzüne en yakın olanı 5 cm mesafededir. Yük değeri 100 kN ve deplasman değeri 46.86 mm iken sol yük mesnedi bölgesindeki kabuk betonunda hafif ezilme gözlenmiştir. Yük 115 kN ve deplasman 12.54 mm'ye ulaştığında basınç bölgesindeki kabuk betonunda ezilme iyice belirginleşmiştir. 125 kN yük ve 29 mm deplasmanda sağ bölgede kesme çatlağı genişliğinin artmış olduğu belirtilmiştir. Yük 127 kN'a kadar çıkmıştır. Ardından 120 kN az bir miktar düşmüştür. Daha sonra donatıda kopmanın etkisiyle yük 85 kN seviyelerine düşmüştür. Deplasman 105 mm'dir. Daha sonra tekrar bir kopma gerçekleşmiş ve yük yaklaşık 54 kN'a düşmüştür. Deplasman 110 mm seviyelerindedir. Ardından yük az miktar toparlanarak 63 kN olmuştur. Bu asamadan sonra yükte bir artış gözlenmemiş deformasyon artarak kiriş yük taşımaya devam etmiştir. 54 kN yük ve yaklaşık 198 mm deplasmanda deney güvenliği için deneye son verilmiştir.



Şekil 3.15. HG3S2 (G12.7S12) elemanı deneyi

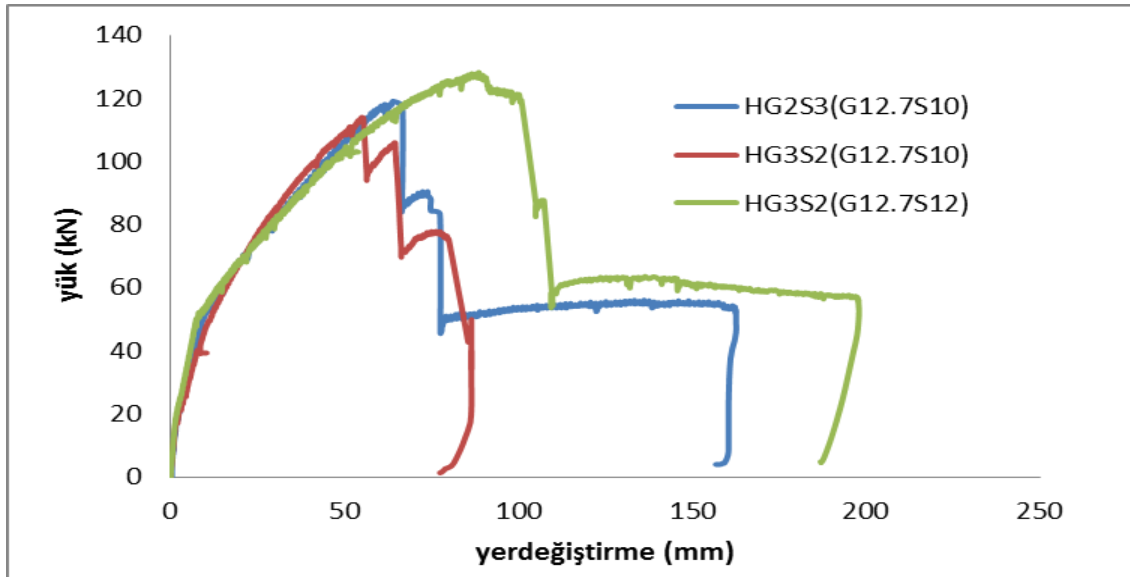


Şekil 3.16. HG3S2 (G12.7S12) deney sonu



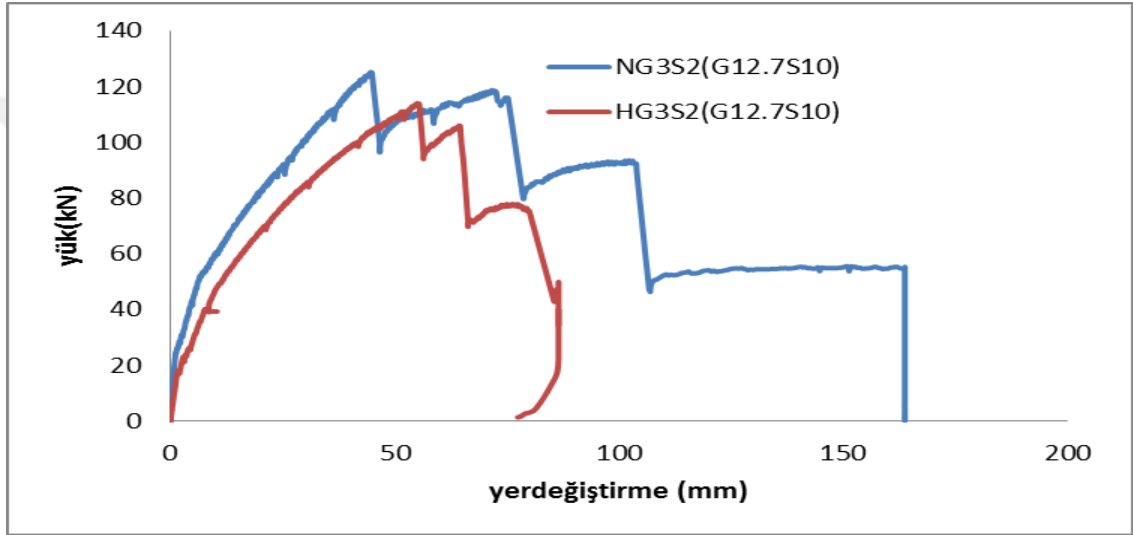
Şekil 3.17. HG3S2 (G12.7S12) elemanı yük deplasman grafiği

Yüksek dayanımlı elemanların yük deplasman ilişkileri kendi aralarında değerlendirildiğinde cam elyaf donatı sayısının ve çelik donatı çapının arttığı HG3S2 (G12.7S12) elemanında en büyük yük kapasitesine ulaşıldığı belirlenmiştir (Şekil 3.18)



Şekil 3.18. Yüksek dayanımlı elemanların birleştirilmiş yük deplasman grafikleri

Efektif donatı oranları aynı olan beton sınıfları farklı olan NG3S2 (G12.7S10) ve HG3S2 (G12.7S10) elemanları karşılaştırıldığında beton dayanımındaki artışın eğilme davranışı altındaki kirişlerde kapasiteyi belirgin oranda etkilemediği gözlenmiştir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. NG3S2 (G12.7S10) ve HG3S2 (G12.7S10) elemanları yük deplasman eğrileri

4.TEORİK ANALİZ

FRP donatılı kirişler de eğilme etkisinde çelik donatılı kirişlere göre çatlak sayısının ve çatlak genişliklerinin fazla olduğu bilinmektedir. Bunun nedeni FRP donatının yüksek kopma dayanımına karşın elastisite modülünün küçük olmasıdır. FRP donatılı kirişler göçmeye kadar lineer bir davranış gösterirler ve akma olmaksızın taşıma kapasitesine ulaşırlar ve nedenele FRP donatılı eğilme elemanlarının basınç kontrollü davranış göstermesi tercih edilir. Yüksek dayanımlı beton kullanılması FRP donatıların yüksek mukavemet özelliklerinin daha iyi kullanılmasına izin verir ve çatlamış kesitin rijitliğini artırır.

Yüksek mukavemetli beton kullanılması, FRP donatıların yüksek mukavemet özelliklerinin daha iyi kullanılmasına izin verir ve çatlamış kesitin rijitliğini artırabilir, ancak normal dayanımlı betona kıyasla yüksek dayanımlı betonun daha gevrek olması, eğilme şekil değiştirme kapasitesini azaltır.[1]

FRP donatılı kesitlerin dayanımı hesaplanırken yapılan kabuller şunlardır:

- 1- FRP donatı ve betondaki birim şekil değiştirmeler tarafsız eksene uzaklığı ile orantılıdır. (yüklemeden önce düzlem olan kesitler düzlem kalır)
- 2- Betonun en büyük birim şekil değiştirmesi 0.003 kabul edilir.
- 3- Betonun çekme dayanımı ihmal edilir.
- 4- FRP donatı göçmeye kadar doğrusal elastik davranış sergiler.
- 5- Beton ve FRP arasında tam uyum olduğu kabul edilir.

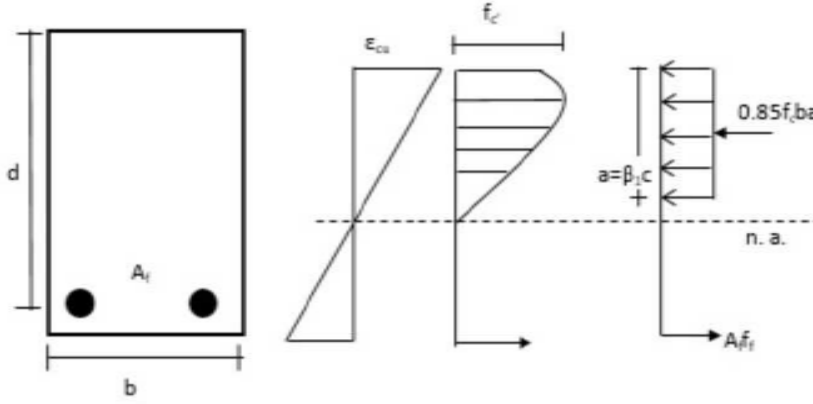
4.1. FRP Donatılı ve Hibrit Donatılı Betonarme Kirişlerin Taşıma Gücü Hesabı

ACI 440.1R-15 yönetmeliğinde FRP donatı oranı ve dengeli donatı oranının hesaplanması için denklem (4.1) ve denklem (4.2) kullanılmaktadır. Donatı oranı (ρ_f), dengeli donatı oranı (ρ_{fb}), ile gösterilmiştir. [1]

$$\rho_f = \frac{A_f}{b \cdot d} \quad (4.1)$$

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (4.2)$$

Kesitte kullanılan FRP donatı oranı dengeli FRP donatı oranından büyükse ($\rho_f > \rho_{fb}$) ise göçme betonun ezilmesi ile başlar. Taşıma gücü anında eşitteki gerilme dağılımı şekilde görülmektedir.



Şekil 4.1. Kesitteki gerilme dağılımı

$$M_n = A_f f_f (d - \frac{a}{2}) \quad (4.3)$$

$$a = \frac{A_f f_f}{0.85 f_c b} \quad (4.4)$$

$$f_f = \sqrt{\left(\frac{E_f \varepsilon_{cu}}{4}\right)^2 + \frac{0.85 \beta_1 f_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu}} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu} \leq f_{fu} \quad (4.5)$$

FRP donatı ve çelik donatının beraber kullanıldığı hibrit kirişler için efektif donatı oranı (ρ_{eff}) ve dengeli donatı oranı $\rho_{eff,b}$ sırası ile denklem 4.6 ve denklem 4.7 ile hesaplanmaktadır.

$$\rho_{eff} = \frac{E_s A_s + E_f A_f}{E_c b d} \quad (4.6)$$

$$\rho_{eff,b} = 0.85 \beta_1 \frac{f_c}{f_y} \frac{E_s \varepsilon_{cu}}{f_y + E_s \varepsilon_{cu}} \quad (4.7)$$

Hibrit kirişlerin tasarımı FRP donatı taşıma gücüne erişmeden önce çelik donatının aktığı kabulüne göre yapılmaktadır. Tarafsız eksenin derinliği çekme ve basınç bölgesindeki kuvvetlerin eşitliğinden faydalanarak hesaplanmaktadır (Denklem 4.8). Betonun birim şekil değiştirmesi 0,003 alınarak çekme bölgesindeki donatıların birim şekil değiştirmesi hesaplanmaktadır. Aynı seviyedeki çelik ve FRP donatının eşit şekil değiştirme yaptığı kabulü ile donatılardaki birim şekil değiştirmeler hesaplanır (ε_f , ε_s).

Hedef tasarımda çelik donatı akma birim şekil değiştirmesine ulaştığında FRP donatının henüz kopma birim şekil değiştirmesine ulaşmadığı kabul edilir.

$$F_c = F_s + F_f \quad (4.8)$$

$$F_c = 0.85 f_c b a \quad (4.9)$$

$$F_s = A_s f_y \quad (4.10)$$

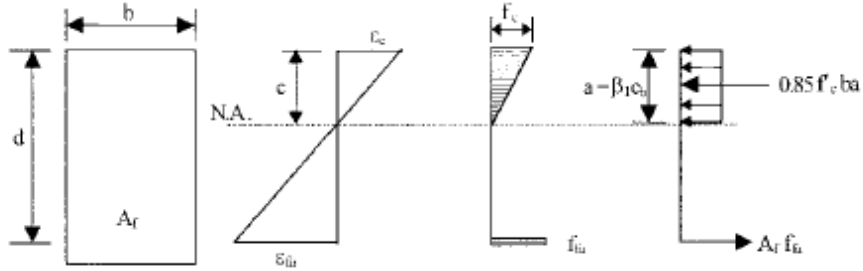
$$F_f = A_f f_f \quad (4.11)$$

ACI-318 dikdörtgen gerilme bloğu kabulü ile FRP çekme gerilmesi (f_f) denklem 4.12 ile hesaplanır. Tasarımda hedeflenen sünek davranışa ait taşıma kapasitesi (M_n) denklem 4.13 ile hesaplanır .[28]

$$f_f = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{A_s f_y}{A_f} + E_f \varepsilon_{cu} \right)^2 + \left(0.85 \frac{\beta_1 f_c}{\rho_f} - \frac{A_s f_y}{A_f} \right) E_f \varepsilon_{cu} - \frac{1}{2} \left(\frac{A_s f_y}{A_f} + E_f \varepsilon_{cu} \right)} \leq f_{fu} \quad (4.12)$$

$$M_n = (\rho_s f_y + \rho_f f_f) \left(1 - 0.59 \frac{\rho_s f_y + \rho_f f_f}{f_n} \right) b d^2 \quad (4.13)$$

Eğer $\rho_{eff} < \rho_{fb}$ ise göçme anında beton henüz kopma birim uzamasına ulaşmamıştır ve dikdörtgen gerilme bloğu yaklaşımı kullanılamaz.



Şekil 4.2. Denge altı tasarım

Denge altı tasarlanmış kiriş kesitinin taşıma gücü hesabında betonun birim uzaması ve tarafsız eksen derinliğinin bilinmemesi problemi karmaşık hale getirir. Çözümü kolaylaştırmak için beton kopma birim uzamasına ulaştığı anda FRP donatının da kopma birim uzamasına eriştiği kabul edilir ve taşıma gücü hesabı aşağıda verine denklemlere (Denklem 4.14-4.15) göre hesaplanır.

$$M_n = (A_f f_{fu} + A_s f_{fy}) \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (4.14)$$

$$c_b = \left(\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} \right) d \quad (4.15)$$

Hibrit kirişlerin eğilme davranışlarını konu alan çalışmalar incelendiğinde kesitteki donatı oranını FRP donatıya dönüştürerek elde edilen donatı oranının dengeli donatı oranı ile kıyaslandığı çalışmalar olduğu gibi [17-18], donatı oranının çelik donatı oranına dönüştürüldüğü çalışmalarda mevcuttur [29]. Bu yöntemde kullanılan etkili donatı oranı ve dengeli donatı oranı ile ilgili formüller Denklem 4.16 ve 4.17’de verilmiştir.

$$\rho_{eff} = \rho_s + \rho_f \frac{E_f}{E_s} \quad (4.16)$$

$$\rho_{fb} = 0.85 \beta_1 \frac{f_c}{f_y} \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_y} \quad (4.17)$$

Deney elemanlarına ait etkili donatı oranları ve dengeli donatı oranları Çizelge 4.1. de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney elemanları donatı oranları

Deney elemanı	A _s (mm ²)	A _f (mm ²)	s(%)	f(%)	eff(%)	f,b(%)
NG2S3(G12.7S10)	235,62	253,35	0,561	0,603	0,667	2,9847
NG3S2(G12.7S10)	157,08	380,03	0,374	0,905	0,532	2,9847
NG2S3(G12.7S12)	339,29	253,35	0,808	0,603	0,913	2,9847
HG2S3(G12.7S10)	235,62	253,35	0,561	0,603	0,667	4,6429
HG3S2(G12.7S10)	157,08	380,03	0,374	0,905	0,532	4,6429
HG3S2(G12.7S12)	226,19	380,03	0,539	0,905	0,697	4,6429

Çizelge 4.1. de görüldüğü gibi bütün deney elemanları denge altı olarak tasarlanmıştır. Etkili donatı oranının çelik donatıya dönüştürüldüğü bu yöntemde efektif donatı oranının dengeli donatı oranından küçük olması durumunda ilk önce çelik donatı akacak sonra beton ezilecektir. Kuvvetlerin dengesi ve ACI 440[1]da önerilen dikdörtgen gerilme bloğu yaklaşımı kullanılarak FRP donatıdaki kuvvet ve taşıma gücü anındaki moment taşıma kapasitesi denklem 4.18 ve denklem 4.19 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f_{FRP} = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{A_s f_y}{A_{FRP}} + E_{FRP} \varepsilon_{cu} \right)^2 + \left(0.85 \frac{\beta_1 f_c}{\rho_{FRP}} - \frac{A_s f_y}{A_{FRP}} \right) E_{FRP} \varepsilon_{cu} - \frac{1}{2} \left(\frac{A_s f_y}{A_{FRP}} + E_{FRP} \varepsilon_{cu} \right)} \leq f_{fu} \quad (4.18)$$

$$M_n = (A_{FRP} f_{FRP} + A_s f_y) \left(1 - 0.59 \frac{\rho_{FRP} f_{FRP} + \rho_s f_y}{f_c} \right) d \quad (4.19)$$

Kiriş 4 nokta yüklemesi altında test edilmiştir. Bu nedenle deneylerden ve teorik hesaplardan elde edilen moment değerlerinden Denklem 4.20 kullanılarak taşıma gücüne moment değerlerine karşılık gelen kuvvet değerleri hesaplanmıştır. Denklem 4.20’de L: mesnetler arasındaki net açıklık, a:kuvvetler arasındaki uzaklığı göstermektedir. Çizelge 4.2.’de kirişlerin deneysel ve teorik taşıma gücü momentleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

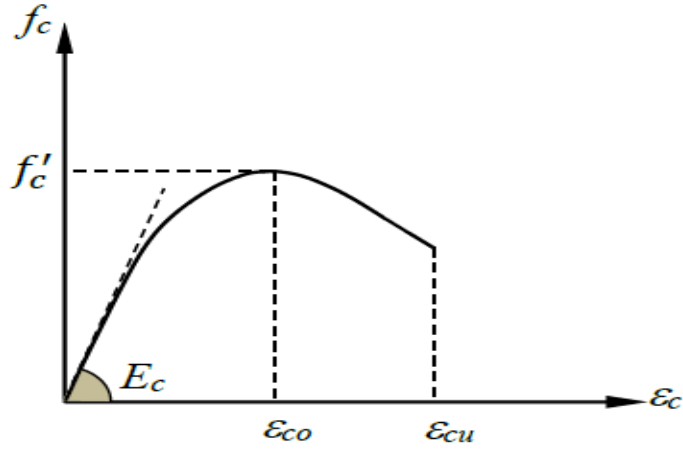
$$P_n = \frac{4M_n}{L-a} \quad (4.20)$$

Çizelge 4.2. Deney elemanlarının teorik ve deneysel taşıma gücüne karşılık gelen

Eleman	Pu(Teorik) (kN)	Pu(deneysel) (kN)	Pu(teorik)/Pu(deneysel)
NG2S3(G12.7S10)	90,07	112	0,80
NG3S2(G12.7S10)	93,3	125	0,75
NG2S3(G12.7S12)	101,6	132	0,77
HG2S3(G12.7S10)	105,3	119	0,88
HG3S2(G12.7S10)	112	114	0,98
HG3S2(G12.7S12)	118,1	128	0,92

Teorik taşıma gücü hesapları %77 ile %98 arasında değişen oranlarla deneysel taşıma gücü değerlerine yaklaşmıştır.

Çalışmada hibrit donatılı kirişlerin yük deplasman ilişkilerini belirlemek için moment eğrilik grafikleri ve ACI 440-1R-15’da önerilen efektif atalet momenti formülü kullanılmıştır. Moment eğrilik grafikleri elde edilirken betonun gerilme birim deformasyon ilişkisi Hognestead Beton modeli ile tanımlanmıştır. Hognestad beton modelinde $\varepsilon_{CO}=0,002$ ve $\varepsilon_{cu}=0,003$ kullanılmıştır. [1]

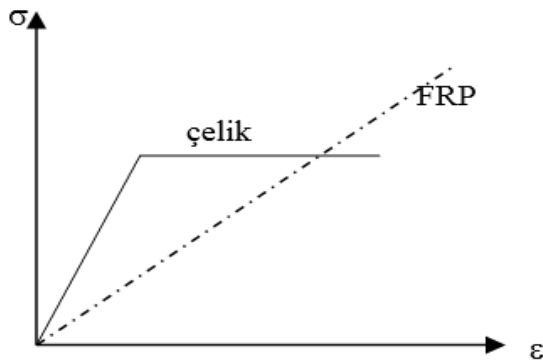


Şekil 4.3. Hognestad beton modeli

$$f_c = f'_c \left(\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_{co}} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^2 \right) \quad \epsilon_c \leq \epsilon_{co} \quad (4.21)$$

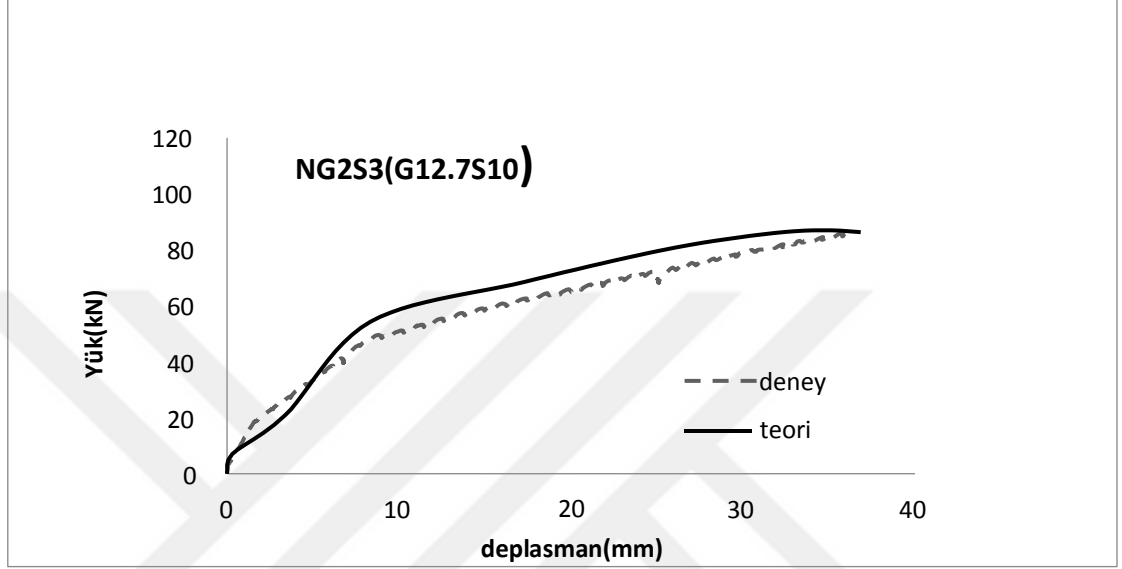
$$f_c = f'_c \left[1 - 0,15 \left(\frac{\epsilon_c - \epsilon_{co}}{\epsilon_{cu} - \epsilon_{co}} \right) \right] \quad \epsilon_{co} \leq \epsilon_c < \epsilon_{cu} \quad (4.22)$$

Betonun çekme dayanımı dikkate alınmamıştır. Çelik donatının ve FRP donatının gerilme birim deformasyon ilişkileri Şekil 4.4. de gösterildiği gibi kullanılmıştır.

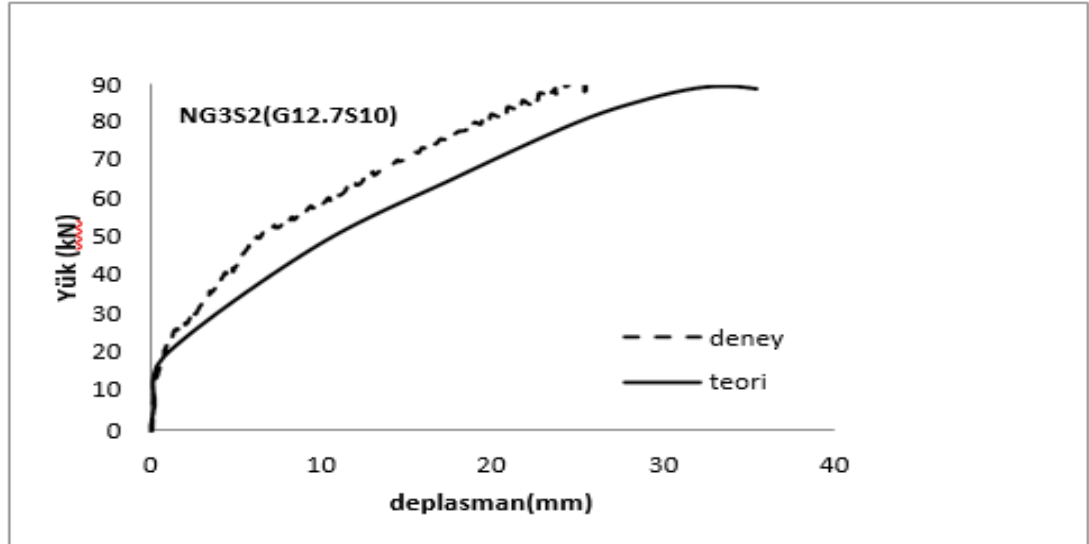


Şekil 4.4. Çelik ve FRP donatı gerilme birim şekil değiştirme ilişkileri

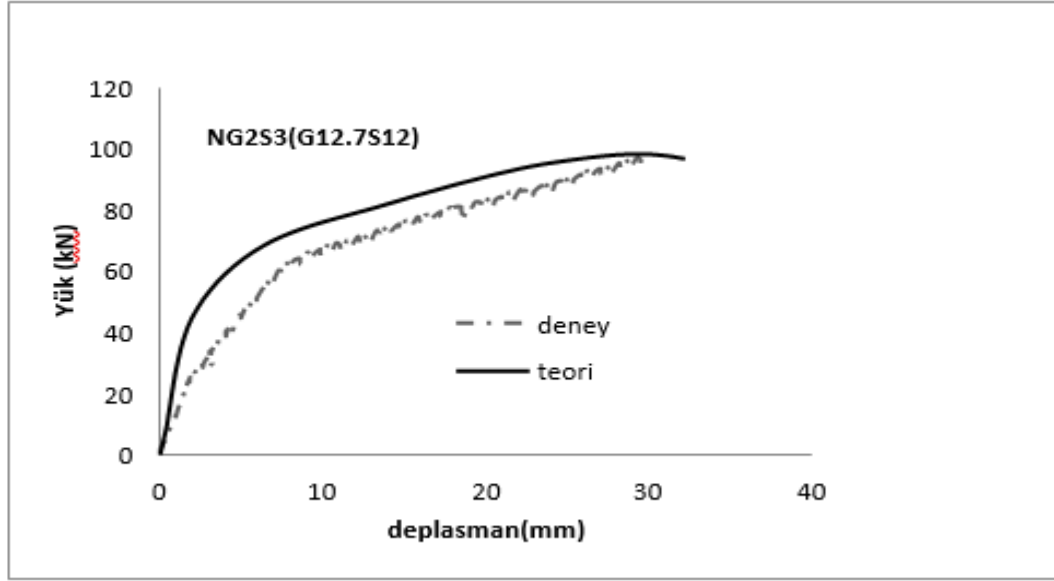
Şekil 4.5. - Şekil 4.10. arasında teorik taşıma gücüne kadar deneysel yük deplasman eğrileri ile teorik yük deplasman eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



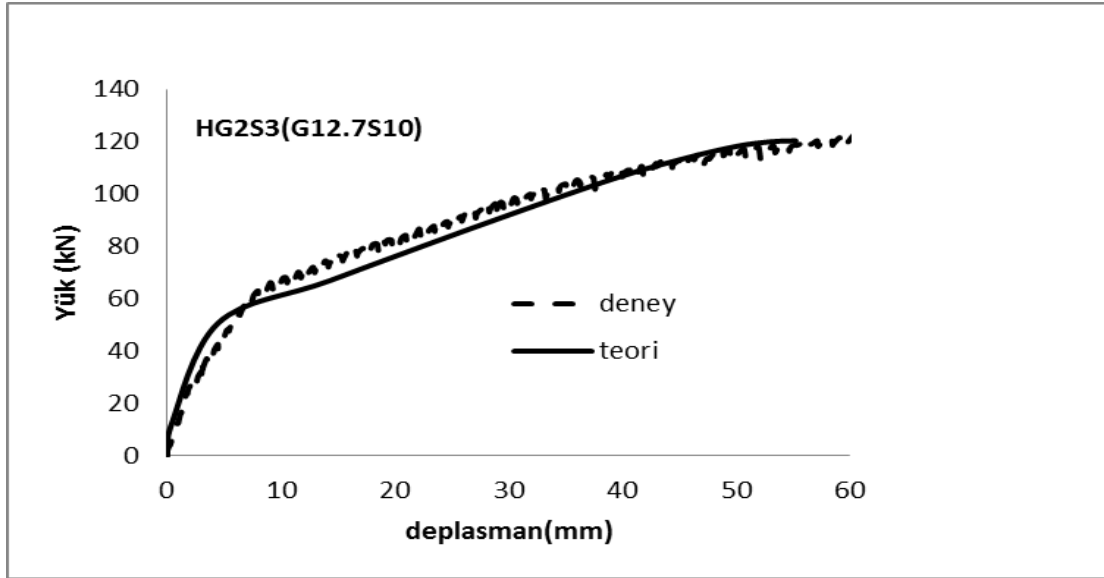
Şekil 4.5. NG2S3(G12.7S10) Elemanının deneysel ve teorik yük-deplasman grafiği



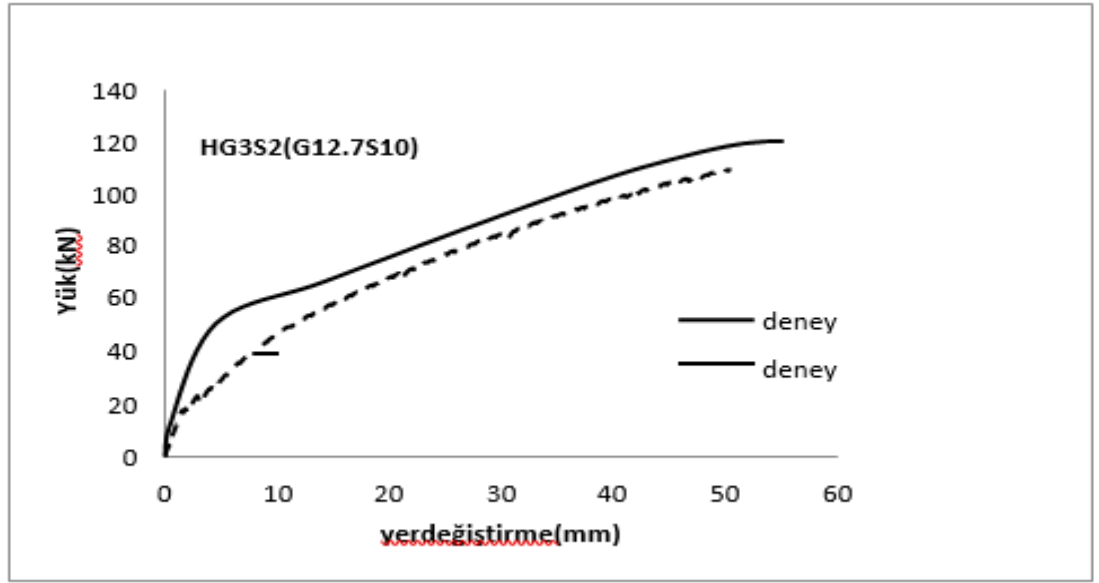
Şekil 4.6. NG3S2(G12.7S10) Elemanının deneysel ve teorik yük-deplasman grafiği



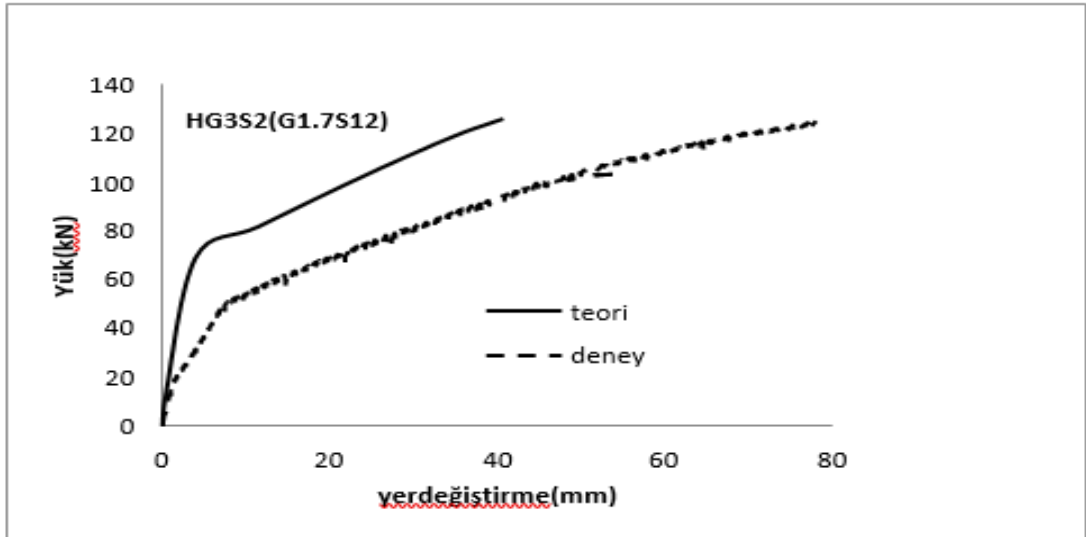
Şekil 4.7. NG2S3(G12.7S12) Elemanının deneysel ve teorik yük-deplasman grafiği



Şekil 4.8. HG2S3(G12.7S10) Elemanının deneysel ve teorik yük-deplasman grafiği



Şekil 4.9. HG3S2(G12.7S10) Elemanının deneysel ve teorik yük-deplasman grafiği



Şekil 4.10. HG3S2(G12.7S12) Elemanının deneysel ve teorik yük-deplasman grafiği

Şekil 4.5-4.10 de teorik taşıma gücü değerlerine kadar yük deplasman grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 4.10. da verilen HG3S2 elemanı dışındaki elemanlarda yük deplasman değerleri arasındaki ilişkinin kabul edilebilir yakınlıkta olduğu söylenebilir. Çizelge 4.3.'de teorik taşıma gücü yüklerinde elde edilen teorik ve deneysel deplasman değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Çizelgeden de görüldüğü gibi normal dayanımlı beton kullanılan deney elemanlarında teorik deplasmanlar deneysel deplasmanlara yakın ya da üzerinde iken, yüksek dayanımlı beton kullanılan elemanlarda teorik deplasmanlar deneysel deplasmanlardan küçük çıkmıştır ve bu fark en fazla HG3S2(G12.7S12) elemanında artmıştır.yüksek dayanımlı beton kullanılan deney elemanlarında teorik ve deneysel deplasman değerleri arasındaki bu farkın kullanılan beton modelinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.3. Deney elemanlarının teorik taşıma gücüne karşılık gelen deneysel ve teorik deplasman değerleri

Deney elemanı	Teorik Deplasman δ_{teorik} (mm)	Deneysel Deplasman δ_{deneysel} (mm)	$\delta_{\text{teorik}}/\delta_{\text{deneysel}}$
NG2S3(G12.7S10)	37	37	1
NG3S2(G12.7S10)	35,5	25,7	1,4
NG2S3(G12.7S12)	32	30	1,1
HG2S3(G12.7S10)	55	57	0,96
HG3S2(G12.7S10)	46	55	0,84
HG3S2(G12.7S12)	45	85	0,53

5. SONUÇLAR

Çatlaklar en büyük momentin olduğu uzunluk boyunca çekme bölgesinde oluşmaya başlamış ve basınç bölgesine doğru ilerlenmiştir. Yükle birlikte çatlak sayısı ve genişliği artmıştır. Deney elemanlarında çatlaklar en üst basınç lifine ulaşmış ve betonda meydana gelen ezilme ile göçme gerçekleşmiştir.

Tüm deney elemanlarında çatlak oluşumu başladıktan sonra rijitlik azalmış ve kirişler daha fazla deplasman yapmaya başlamıştır.

Rijitlikteki azalma normal dayanımlı hibrit kirişlerde yüksek dayanımlı hibrit kirişlere oranla daha fazladır.

Normal betonlu hibrit kirişlerde GFRP donatı oranının artması ile çatlak oluşumu ile meydana gelen rijitlikteki azalma miktarında düşüş görülmüştür.

Tüm elemanlar için teorik ve deneysel taşıma gücü değerleri arasında %77-98 arasında değişmektedir.

Deney elemanlarının moment eğrilik grafiklerinden elde edilen yük deplasman eğrileri ile deneylerden elde edilen yük deplasman eğrileri teorik taşıma gücüne kadar bir eleman dışında uyumludur. Teorik taşıma kapasitesine karşılık gelen deplasman değerleri normal dayanımlı beton kullanılan deney elemanları için son derece uyumlu iken yüksek dayanımlı beton kullanılan kirişlerde deplasman değerleri farklıdır. Teorik hesaplarda kullanılan beton modelinin buna neden olabileceği düşünülmektedir. Beton dayanımındaki artışın kirişlerin taşıma güçleri açısından karşılaştırıldığında sonuçları çok fazla etkilemediği görülmüştür.

Efektif donatı oranı aynı beton dayanımı farklı olan kiriş elemanların yük deplasman

eğrileri incelendiğinde beton dayanımındaki artışın kiriş deplasmanı azalttığı gözlemlenmiştir.

Her iki deney grubunda da efektif donatı oranındaki artış eğilme dayanımı arttırmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar hazırlanan deney elemanları ile sınırlıdır daha genel sonuçlar için ilave çalışmalar yapılmalıdır.



KAYNAKÇA

- [1] ACI Committee 440, Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars, American Concrete Institute, Farmington Hills (MI), 2015.
- [2] Chakib Kassem, Ahmed Sabry Farghaly and Brahim Benmokrane, Evaluation of Flexural Behavior and Serviceability Performance of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars. Journal of Composites for Construction Asce. 15 (5),: 682-695, 2011.
- [3] Razaqpur, A.G., Spadea, S., Shear Strength of FRP Reinforced Concrete Members with Stirrups. Journal of Composite for Construction. 19 (1), 1-15, 2015.
- [4] Rami A. Hawileha, Hayder A. Rasheedb , Jamal A. Abdallaa , and Adil K. Al-Tamimia, Behavior of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded hybrid fiber reinforced polymer systems. Materials & Design. 53, 972- 982, January 2014.
- [5] Lapko A., Urbanski M., Experimental and Theoretical Analysis of Concrete Beams Reinforced With Basalt Rebar. Archives of Civil and Mechanical Engineering. 15 (1), 223-230, January 2015.
- [6] Barris C., Torres L., Turon A., Baena M., Catalan A., An experimental study of the flexural behaviour of GFRP RC beams and comparison with prediction models. Composite Structures. 91 (3), 286-295, 2009.
- [7] Alsayed, S.H. Flexural behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars. Cement and Concrete Composites vol:20 1-11, 1998

- [8] Huanzi Wang, Abdeldielil Belarbi, Ductility characteristics of fiber-reinforced concrete beams reinforced with FRP rebars. *Construction and Building Materials*, 26 (5), 2391-2401, 2011.
- [9] Fatih Cullazoğlu, FRP Donatılı Betonarme Kirişlerin Eğilme ve Kesme Etkisi Altındaki Analizi. Yüksek Lisans Tezi Niğde Üniversitesi, Niğde, 2014.
- [10] İlker Fatih Kara, Ashraf F. Ashourb, Mehmet Alpaslan Köroğlu, Flexural behavior of hybrid FRP/steel reinforced concrete beams. *Composite Structures*. 129(1), 111-121, 2015.
- [11] Doo-Yeol Yoo, Nemkubar Banthia, Young-Soo Yoon, Flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars. *Engineering Structures*, vol:111, 246-262, 2016.
- [12] Denvind Lau, Hoat Joen Pam, Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams. *Engineering Structures*. 32(12), 3857-3865, 2010.
- [13] Issa, M.S. Metwally, I.M. Elzeiny, S.M. Influence of fibers on flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars, *Engineering Structures*. 33(5) 1754-1763, 2011.
- [14] Marek Urbanski, Andrzej Lapko, Andrzej Garbacz, Investigation on concrete beams reinforced with basalt rebars as an alternative of conventional R/C structures. *Procedia Engineering*. Vol:57, 1183-1191, 2013.
- [15] İsmail ÜNSAL, Cengiz DÜNDAR, A. Kamil TANRIKULU ‘Çekme rijitleşmesinin FRP ve çelik donatılı betonarme kirişlerin yük-deplasman davranışı üzerindeki etkisi’ *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31 (1), 429-439, 2016

- [16] İsmail ÜNSAL, Serkan TOKGÖZ, İsmail H. ÇAĞATAY, Cengiz DÜNDAR, Hibrit Donatılı Basit Mesnetli Betonarme Kirişlerin Yük- Deplasman Davranışının İncelenmesi. Ç.Ü. Müh. Mim. Fak. Dergisi, 33(2), 445-55, 2018
- [17] Refai, A.E., Abed, F., Al-Rahmani, A., Structural Performance Serviceability of Concrete Beams Reinforced with Hybrid (GFRP and steel) bars. Construction and Building Materials, vol: 96, 518-529, 2015.
- [18] Qin, R., Zhou, A., Lau, D., Effect of Reinforcement Ratio on the Flexural Performance of Hybrid FRP Reinforced Concrete Beams, Composites Part B, vol:108, 200-209, 2017.
- [19] Saleh Hamed Alsayed Flexural behavior of concrete beams reinforced with-GFRP bars” Cement and Concrete Composites, vol:20, 1-11, 1998
- [20] Jingming Cai, Jinlong Pan , Xiangming Zhou, Flexural behavior of basalt FRP reinforced ECC and concrete beam, Construction and Building Materials, vol: 142 423–430, 2017
- [21] Jun-Mo Yang, Kyung-Hwan Min, Hyun-Oh Shin, Young-Soo Yoon, Effect of steel and synthetic fibers on flexural behavior of high-strength concrete beams reinforced with FRP bars. Composites: Part B vol:43, 1077–1086, 2012.
- [22] Ilker Fatih Kara, Ashraf F. Ashour, Cengiz Dunder, Deflection of concrete structures reinforced with FRP bar, Composites: Part B vol:44, 375–384, 2013.
- [23] Suzan A.A. Mustafa, Hilal A. Hassan, Behavior of concrete beams reinforced with hybrid steel and FRP composites, HBRC Journal <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2017.01.001>

- [24] Kinga Brózdaa, Jacek Selejdaka, Peter Kotešb, The analysis of beam reinforced with FRP bars in bending. *Procedia Engineering* vol:192 64 – 68, 2017.
- [25] Haitang Zhu, Shengzhao Cheng, Danying Gao, Sheikh M. Neaz , Chuanchuan Li, Flexural behavior of partially fiber-reinforced high-strength concrete beams reinforced with FRP bars. *Construction and Building Materials* vol:161 587– 597, 2018.
- [26] Doo-Yeol Yoo, Nemkumar Banthia, Young-Soo Yoon, Predicting service deflection of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP bars, *Composites Part B: Engineering*, Vol:99, Pages 381-397, 2016.
- [27] Denvind Lau, Hoat Joen Pam, “Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams”, *Engineering Structures*, 32(12), 3857-3865, 2010
- [28] ACI 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete*, 2014
- [29] Wenjun Qu; Xiaoliang Zhang; and Haiqun Huang, Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Hybrid GFRP and Steel Bars, *Journal of Composites for Construction* ASCE, DOI: 10.1061/_ASCE_CC.1943- 5614.0000035, 2009.