

Atilgan ŞAHİN

Yüksek Lisans Tezi

KÜ 2019

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

GFRP ve ÇELİK DONATILI HİBRİT KİRİŞLERDE
DONATI SIRALAMASININ EĞİLME DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİLERİ

Atilgan ŞAHİN

ARALIK 2019

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Atılğan ŞAHİN tarafından hazırlanan GFRP ve ÇELİK DONATILI HİBRİT KİRİŞLERDE DONATI SIRALAMASININ EĞİLME DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİLERİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Orhan DOĞAN
Anabilim Dalı Başkanı

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

Dr. Öğretim Üyesi Şule BAKIRCI ER
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Dr. Öğretim Üyesi Mahmut Cem YILMAZ

Üye (Danışman) : Dr. Öğretim Üyesi Şule BAKIRCI ER

Üye :Dr. Öğretim Üyesi Eda AVANOĞLU SICACIK

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

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

Prof. Dr. Recep ÇALIN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Sevgili Annem ve Kız kardeşime...

ÖZET

GFRP ve ÇELİK DONATILI HİBRİT KİRİŞLERDE DONATI SIRALAMASININ EĞİLME DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİLERİ

ŞAHİN, Atılgan

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Şule BAKIRCI ER

Aralık 2019, 61 sayfa

FRP donatılı kompozit malzemeler son yıllarda inşaat sektöründe de yerini almıştır. FRP donatılar da bu malzemelerdendir. Korozif ve manyetik olmamaları, hafiflikleri, yüksek çekme dayanımları bu malzemeleri geleneksel çelik donatıya göre avantajlı kılmaktadır. Ancak FRP donatılar yük altında lineer davranış gösterirler ve aniden koparlar. Akma bölgeleri yoktur ve gevrek davranış gösterirler. Bu ise betonarme de istenmeyen bir durumdur. Çelik ve FRP donatıların avantajlarını bir arada kullanmak amacıyla hibrit kirişler düzenlenmektedir. Bu çalışmada 5 adet kiriş hazırlanmıştır. Bu kirişlerde beton dayanımı, kullanılan çelik ve FRP donatı çapı, donatı kesit alanı, donatıların kesit içerisindeki konumu, yük deplasman davranışı, çatlak gelişimi test edilmiştir. Deney elemanları 150 mm x 300 mm boyutlarında ve 2,05 metre boyutundadır. C30 beton sınıfı kullanılmıştır. Deneyler iki nokta yüklemeli eğilme deneyi olarak yapılmıştır. Deneysel yük deplasman eğrilerinin yanı sıra teorik yük eğrileri de elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: FRP, GFRP, Fiber Takviyeli Polimer Cam Elyaf Donatı, Betonarme Kiriş, Eğilme Davranışı.

ABSTRACT

EFFECTS OF REINFORCEMENT ARRANGEMENT ON FLEXURAL BEHAVIOR IN GFRP AND STEEL REINFORCED HYBRID BEAMS

ŞAHİN, Atılğan

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Şule BAKIRCI ER

December 2019, 61 pages

FRP materials has been placed in the construction industry in recent years. FRP reinforcements are also from this material. They are non-corrosive and magnetic, their high weight and high tensile strength make them advantageous over conventional steel reinforcement. However, FRP reinforcements be have linearly underload and rupture suddenly. They do not show yielding behaviour and they are brittle. This is an undesirable case for reinforced concrete. Hybrid beams are arranged to combine the advantages of steel and FRP reinforcement. In this study, 5 beams were prepared. Concrete strength of these beams tested, steel and FRP reinforcement used reinforcement crosssection, reinforcement crosssection, load displacement behavior, crack development. Experimental elements have 150mmx300mm cross section and 2,05 meters in length. C30 were used concrete grade. The experiments were carried out as two point load bending experiments and their behavior were examined. The experimental load displacement curves of all elements theoretical load displacement curves were obtained.

Key Words: FRP, GFRP, Fiber Reinforced Polymer, Glass Fiber Reinforced Polymer, Reinforced Concrete Beam, Flexural Behavior.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasını bana öneren ve tezimin hazırlanmasında maddi-manevi hiçbir yardımını esirgemeyen, güler yüzüyle her zaman moral veren tez yöneticisi hocam, Sayın Dr. Öğretim Üyesi Şule BAKIRCI ER 'e en kalbi duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

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

Öğrenim hayatım boyunca desteğini benden esirgemeyen; yüksek lisans dönemi boyunca beni teşvik eden ve bana moral veren annem Bediha ŞAHİN 'e ve kız kardeşim Menevşe ŞAHİN 'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vi
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ	1
1.1. FRP Malzemenin Tarihçesi.....	1
1.2. Literatür Taraması.....	3
2. DENEYSEL ÇALIŞMA	14
2.1. Deney Programı	14
2.2. Malzeme Özellikleri	21
2.2.1. Beton Özellikleri	21
2.2.2. Çelik Donatı Özellikleri	21
2.2.3. GFRP Donatı Özellikleri	22
2.3. Kirişlerin Tasarımı ve Hazırlanması	23
2.4. Yükleme, Ölçüm ve Deney Düzenegi	25
2.5. Deneyler	28
2.5.1. (Ns2S16-2G13) Numunesi Deneyi	28
2.5.2. (Ns2S16-2G13) Numunesi Yük-Deplasman İlişkisi ve Grafiği	30
2.5.3. (Ns2S16-2G10) Numunesi Deneyi	31
2.5.4. (Ns2S16-2G10) Numunesi Yük-Deplasman İlişkisi ve Grafiği	34
2.5.5. (Nd2S16-2G13) Numunesi Deneyi	34
2.5.6. (Nd2S16-2G13) Numunesi Yük-Deplasman İlişkisi ve Grafiği.....	37
2.5.7. (Nd5S10-2G13) Numunesi Deneyi	37
2.5.8. (Nd5S10-2G13) Numunesi Yük-Deplasman İlişkisi ve Grafiği.....	40
2.5.9. (Nd5S10-2G10) Numunesi Deneyi	40
2.5.10.(Nd5S10-2G10) Numunesi Yük-Deplasman İlişkisi ve Grafiği.....	43
3. TEORİK ANALİZ	44
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	51
5. SONUÇLAR	57
KAYNAKLAR	58

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

2.1.	(Ns2S16-2G13) Kiriş Detayı	16
2.2.	(Ns2S16-2G10) Kiriş Detayı	17
2.3.	(Nd2S16-2G13) Kiriş Detayı	18
2.4.	(Nd5S10-2G10) Kiriş Detayı	19
2.5.	(Nd5S10-2G13) Kiriş Detayı	20
2.6.	Hazırlanan Kalıbın Görünümü	22
2.7.	Hazırlanan Kirişin Görünümü	23
2.8.	Normal Dayanımlı Kirişlerin Beton Dökümü Öncesi Görünüşleri.....	24
2.9.	Normal Dayanımlı Kirişlerin Beton Dökümü Sonrası Görünüşleri.....	24
2.10.	Deney Yükleme Sistemi.....	26
2.11.	Deney Düzeneği	26
2.12.	Yükleme Düzeneği	27
2.13.	Kullanılan GFRP Görünümü.....	27
2.14.	(Ns2S16-2G13) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu	29
2.15.	(Ns2S16-2G13) Kirişi Çatlak Gelişimi.....	29
2.16.	(Ns2S16-2G13) Çatlak Detay Çizimi	30
2.17.	(Ns2S16-2G13) Kirişi Yük-Deplasman Grafiği	30
2.18.	(Ns2S16-2G10) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu	32
2.19.	(Ns2S16-2G10) Kirişi Çatlak Gelişimi.....	33
2.20.	(Ns2S16-2G10) Çatlak Detay Çizimi	33
2.21.	(Ns2S16-2G10) Kirişi Yük-Deplasman Grafiği	34
2.22.	(Nd2S16-2G13) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu.....	35
2.23.	(Nd2S16-2G13) Kirişi Çatlak Gelişimi	36
2.24.	(Nd2S16-2G13) Çatlak Detay Çizimi.....	36
2.25.	(Nd2S16-2G13) Kirişi Yük-Deplasman Grafiği.....	37
2.26.	(Nd5S10-2G13) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu.....	38
2.27.	(Nd5S10-2G13) Kirişi Çatlak Gelişimi	39
2.28.	(Nd5S10-2G13) Çatlak Detay Çizimi.....	39
2.29.	(Nd5S10-2G13) Kirişi Yük-Deplasman Grafiği.....	40
2.30.	(Nd5S10-2G10) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu.....	41
2.31.	(Nd5S10-2G10) Kirişi Çatlak Gelişimi	42
2.32.	(Nd5S10-2G10) Çatlak Detay Çizimi.....	42
2.33.	(Nd5S10-2G10) Kirişi Yük-Deplasman Grafiği.....	43
3.1.	Donatı Çeliği Gerilme Birim Şekil Değiştirme Grafiği	44
3.2.	FRP Gerilme Birim Şekil Değiştirme Grafiği	45
3.3.	(Ns2S16-2G10) Kirişinin Deneysel ve Teorik Grafiği	48
3.4.	(Nd2S16-2G13) Kirişinin Deneysel ve Teorik Grafiği.....	48
3.5.	(Nd5S10-2G10) Kirişinin Deneysel ve Teorik Grafiği.....	49
3.6.	(Nd5S10-2G13) Kirişinin Deneysel ve Teorik Grafiği.....	49
3.7.	(Ns2S16-2G13) Kirişinin Deneysel ve Teorik Grafiği	50
4.1.	Deney Kirişlerinin Yük-Deplasman Grafikleri	51
4.2.	Deney Kirişlerinin Yük-Çatlak Grafikleri	52
4.3.	(Ns2S16-2G10)ile(Ns2S16-2G13) Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri.....	53
4.4.	(Nd5S10-2G13)ile(Nd5S10-2G10) Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri.....	53

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

4.5.	(Nd2S16-2G13) ile(Ns2S16-2G13) Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri..54	
4.6.	(Nd5S10-2G10) ile(Ns2S16-2G10) Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri..55	
4.7.	(Nd2S16-2G13), (Nd5S10-2G13) ve (Ns2S16-2G13) Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri	55
4.8.	Tüm Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri.....	56



ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
2.1. Normal Dayanımlı Betonun Küp ve Silindir Dayanımları	21
2.2. Kirişte Kullanılan Çeliğin Mekanik Özellikleri	21
2.3. Kirişte Kullanılan Cam Elyaf Malzemenin Mekanik Özellikleri	22
3.1. Deney Kirişlerinin Donatı Alanları, Dengeli Donatı Oranı, Efektif Donatı Oranı	47



SİMGELER DİZİNİ

β_1	Eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğu dönüştürme katsayı. 28 MPa beton basınç dayanımına kadar 0.85 kullanılır. Beton basınç dayanımı 28 MPa 'dan büyük ise her 7 MPa için 0.05 azaltılır, minimum değeri 0.65 alınır.
f_c	Beton basınç dayanımı
f_f	FRP donatı çekme dayanımı
f_y	Çelik akma dayanımı
f_{fu}	FRP'nin tasarım çekme dayanımı
E_f	FRP'nin elastisite modülü
E_s	Çeliğin elastisite modülü
ϵ_{cu}	Betonun ezilme şekil değiştirmesi
ρ_s	Çelik donatı oranı
ρ_f	FRP donatı oranı
ρ_{eff}	Efektif donatı oranı
$\rho_{f.b}$	Dengeli donatı oranı
n_s	Çelik donatı adeti
n_f	FRP donatı adeti
\emptyset_s	Çelik donatı çapı
\emptyset_f	FRP donatı çapı
A_s	Çelik donatı alanı
A_f	FRP donatı alanı
F_c	Basınç bölgesinde betona uygulanan bileşke kuvvet
F_s	Çekme bölgesinde çelik donatılara uygulanan bileşke kuvvet
F_f	Çekme bölgesinde FRP donatılara uygulanan bileşke kuvvet
a	Eşdeğer basınç bloğu derinliği
b	Kiriş gövde genişliği
c	Tarafsız eksen derinliği
d	Faydalı yükseklik
DF	Deformasyon faktörü
M_u	Taşıma gücü momenti
M_y	Akma momenti
\emptyset_u	Kırılmaya karşılık gelen eğrilik
\emptyset_y	Çekme donatısının akmasına karşılık gelen eğrilik
M_{cr}	Çatlama momenti
f_{ctd}	Betonun tasarım çekme dayanımı
I_g	Tüm kesit atalet momenti
h	Kiriş yüksekliği
I_{cr}	Çatlama atalet momenti
I_e	Efektif atalet momenti

f'_c	Beton basınç dayanımı
f_r	Beton kopma modülü
M_a	Servis Momenti
β_d	Azaltma katsayısı
k	Nötr eksen derinliğinin takviye derinliğine oranı
n_f	FRP donatının elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranı
n_s	Çelik donatının elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranı



KISALTMALAR DİZİNİ

FRP	Fiber Takviyeli Polimer
BFRP	Bazalt Fiber Takviyeli Polimer
GFRP	Cam Fiber Takviyeli Polimer
AFRP	Aramid Fiber Takviyeli Polimer
CFRP	Karbon Fiber Takviyeli Polimer
HSC	Yüksek Dayanımlı Beton
UHSC	Ultra Yüksek Dayanımlı Beton
RC	Betonarme
FRPRC	Fiber Takviyeli Polimer kullanılmış beton
FRHSC	Fiber Takviyeli Polimer kullanılmış beton
LVDT	Doğrusal değişken türevsel dönüştürücü

1. GİRİŞ

1.1 FRP Malzemenin Tarihçesi

FRP ürünleri reçine matrisi içerisine gömülmüş, yüksek dayanımlı liflerden oluşan kompozit malzemelerdir. Bu lifler dayanım ve rijitlik sağlar, genellikle yükün büyük bir kısmını alır. İlk zamanlarda geleneksel yapılar kullanılan çelik ön gerilmeli ve gerilme olmadan kullanılmıştır. Çelik başlangıçta betonun içindeki alkalilerin oluşturduğu korozyonu engellemek için tercih edilmiştir. Böylece durabilitesi ve dayanımı yüksek yapılar elde edilmiştir. Beton için zararlı olan agresif ortama maruz kalan birçok yapıda: Deniz yapıları, köprüler, garajlar, nem ve sıcaklık kombinasyonlarının beraber bulunduğu yapılarda kullanılır. Kloridler betonun alkanitesini azaltır ve çeliğin korozyona uğramasını engeller. Böylece deformasyon azalmasına ve hizmet ömrünün uzamasını sağlamış olacaktır. Tüm bu durumlar özellikle Kanadalı ve Japon bilim insanlarını yeni araştırmalar yapmaya sevk etmiştir.

Çelikle güçlendirilmiş yapılara alternatif olarak reçineli liflerle güçlendirilmiş ve genel olarak lif ile güçlendirilmiş polimerler (FRP) kullanılmaya başlanmıştır. Lif ile güçlendirilmiş polimerler 3'e ayrılır: Aramid lifler(AFRP), karbon lifler(CFRP), cam lifler(GFRP)'dir.

Son yıllarda FRP ile güçlendirilmiş yapıların sayısı artmaya başlamıştır. Bunun da nedeni şunlardır: Klor iyonu ve kimyasal saldırılara karşı dayanıklı olması, hafif olması, çekme dayanımının çelikten daha yüksek olması, elektromanyetik direnci, ısı ve elektrik iletkenliğinin düşük olması, korozyonu azaltmak için herhangi bir katkıya gerek olmaması, yüksek aşınma dayanımına sahip olması, korozyonun fazla olduğu yapılardaki durabilitesi yüksek olması, esnek yapıya sahip olması, iyi aderans sağlaması, hareketli yükler altında güzel sonuçlar vermesi, yüksek mukavemet/ağırlık oranı sağlaması vb. özellikler kullanımını çekici hale getirmiştir.

FRP ile yeni bir yapı oluşturabildiğimiz gibi var olan yapıların onarımını da yapılabilir. FRP betonun süneklik özelliğini geliştirerek lifler doğrultusunda dayanım artışına da katkı sağlar. FRP donatısı normal betonarme çeliğine göre daha yüksek çekme dayanımının ve daha düşük elastisite modülüne sahiptir. Ayrıca kırılma

noktasına kadar lineer(doğrusal) gerilme-şekil değiştirme davranış gösterir. FRP donatıların düşük elastisite modülüne sahip olmasından dolayı yük altındayken kirişlerin rijitliklerinde çatlamalardan sonra önemli azalmalar olmaktadır. Bu durum elemanlarda kullanılabilirlik yük düzeyinde oldukça büyük deplasmanlar oluşturur. Bu bilgiler ışığında bilhassa servis yükleri altında FRP donatılı kirişlerde oluşan deformasyonların belirlenmesi önemli bir hal almaktadır. FRP donatılı betonarme kirişler, uygulanan yüklerin etkisi altında hem beton hem de FRP donatısının gevrek davranış göstermesinden dolayı sünek olmayan bir kırılma davranışı sergiler. Bundan dolayı, bu elemanların taşıma gücü kapasitelerinin gerçeğe daha yakın olarak elde edilmesi bu elemanların tasarımı için hayati önem taşır. FRP donatılı kirişlerin gevrek bir kırılma davranışın göstermesi ve bu elemanlarda büyük deplasmanlar oluşmasından dolayı özellikle son yıllarda, FRP ve çelik donatının yapı elamanı içerisinde birlikte kullanıldıkları hibrit FRP-Çelik donatılı kirişlerin eğilme etkisi altındaki analizi üzerine araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu şekilde yapılan bir tasarımla elemanın rijitliği ve sünekliği artacaktır. FRP 'nin avantajlarının olduğu gibi dezavantajları da vardır. Bunlar : Gevrek kopmadan önce akma olmaması, düşük enine dayanım göstermesi (liflerin yükleme yönü ve işaretiyle değişebilmektedir), düşük elastisite modülüne sahip olması (takviye lif tipine göre değişmektedir), ultraviyole radyasyon etkisi altında polimer reçineler ve lifler için hasar hassasiyeti göstermesi, ilk maliyetinin fazla olması ancak kullanım ömrünün fazla olması gibi sebepler sayılır. [1]

1.2 Literatür Çalışması

Dundar, Unsal ve Tanrikulu yaptığı çalışma ile mevcut 12 tane FRP ve çelik donatılı kirişin yük-deplasman deneysel sonuçları ile kendi oluşturdukları bilgisayar programındaki sonuçları karşılaştırmışlardır. Oluşturdukları bu programı 2 bölgele doğrusal çekme rijitleşmesi şeklinde bir matris yönteminden oluşmaktadır. Çekme rijitleşmesini bir matris parametresi olarak tanımlayıp bu parametreye 2 ila 25 arasında değerler atayarak çıkan sonuçlar ile yük-deplasman eğrilerini oluşturmaya çalışmışlardır. Deneysel sonuçlara en yakın veriler kirişte kullanılan donatı oranına ve donatımı elastisite modülüne göre değiştiği belirlenmiştir. Yatay taşıyıcıda yüksek elastisite modülüne sahip FRP donatısı kullanıldığında deneysel sonuca en yakın yük-deplasman davranışı sağlayan çekme rijitleşmesinin düşük seviyede kaldığını, düşük elastisite modülüne sahip FRP donatısının kullanıldığı kirişteyse rijitlik parametresinin yüksek çıktığını belirlemişlerdir. [2]

Tokgoz, Unsal, Çagatay ve Dundar yaptığı çalışmada 8 tane iki açıklıklı betonarme kirişin deneysel sonuçlarını; 2 tane GFRP ile güçlendirilmiş ve GFRP/çelik kullanılarak oluşturulan 6 tane hibrit kirişin deneysel sonuçları incelenmiştir. Sürekli kirişlere tekdüze şekilde yükleme yaptılar. Böylece yük-deplasman davranışı ve kirişin kırılma modunu belirlemeye çalışmışlardır. Ayrıca belirledikleri model ile deneysel olarak hesapladıkları yük-deplasman eğrilerini karşılaştırmışlardır. Hem GFRP hem de GFRP/çelik kullanılarak yapılan kirişlerdeki deneysel ve teorik sonuçların uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Kirişleri statik yüklemeye maruz bırakıp yük-deplasman durumunu, çatlak dağılımını ve kırılma modunu belirlemeye çalışmışlardır. GFRP ve GFRP/çelik ile oluşturulan kirişlerin farklı deformasyon kapasiteleri olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Büyük deformasyon donatı oranı küçük olan kirişlerde olmuştur. Tasarım da gerilme kuvveti ve basınç kuvvetini ölçmek için elastisite modülü ve akma dayanımı parametrelerini kullanmışlardır. Yapılan çalışmalar sonunda deneysel ve teorik değerlerin uyumlu olduğunu belirlemişlerdir. [3]

Cullazoğlu yaptığı çalışma ile FRP donatısı kullanılarak yapılan hibrit kirişlerin eğilme dayanımına etkisini araştırmış ve çeşitli ülke şartnameleri ile de kesme

dayanımlarını karşılaştırmıştır. Belirlediği bilgisayar programı ile çeşitli parametrelerin eğilme davranışına olan etkisini araştırmıştır. Bu araştırmalar sonucunda bilhassa çatlamadan önce ve sonra deneysel verilere yakın sonuçlar ortaya çıkmıştır. Kirişlerde FRP donatısı kullanılması ile ortaya çıkan deplasmanın gözle görülür şekilde azaldığı belirlenmiştir. Hibrit betonarme kirişlerde kırılma türünün denge üstü kırılma olması durumunda moment eğrilik ilişkisinin 3 kısımdan oluştuğunu belirlemiştir. FRP donatısı ile yapılan kirişlere çelik donatı(S420) kullanılmasıyla beraber kirişin gerek sünekliği gerekse de rijitliğinin arttığını gözlemlemiştir. [4]

Yinghao ve Yong yaptığı çalışmada yüksek dayanımlı betonla cam fiber takviyesi (GFRP) ve çelik donatı takviyeli hibrit kirişlerin eğilme dayanımlarını belirlemeye çalışmışlardır. Donatı tabakalarının etkisinin doğruluğunu kanıtlamak amacıyla ve hibrit kirişlerde bulunan beton yapısının tasarıma olan katkısını göstermek istemişlerdir. Hibrit kirişlerdeki eğilme dayanımını, yük-deplasman durumunu ve kirişte oluşan çatlak analizini deneysel yöntemlerle incelemesini yapmışlardır. Dört tane GFRP donatılı kirişten bir tanesini kontrol kirişi olarak referans aldılar. Takviye tabakalarını göz önüne alınan ana parametrelerden biri olarak belirlemişlerdir. Hem GFRP hem de çelik donatı kirişin dış tabakasına yakın yerleştirildiğinde eğilme momenti üzerinde en etkili sonucun alındığını gözlemlenmiştir. Hibrit kirişlerde donatı katmanındaki çatlaklar ve donatıların farklı sıralanması hibrit kirişin dayanımında önemli bir rol oynadığı belirlenmiştir. Hibrit kirişlerde donatının yerleştirildiği derinliğin artmasıyla en yüksek çatlak genişliğinin azaldığı sonucuna ulaşmışlardır [5]

Qin, Zhou ve Lau yapmış olduğu çalışmada lif takviyeli polimer (FRP) donatılı kirişleri yüksek gerilme mukavemeti ve üstün korozyon direncinden dolayı kullanmışlardır. FRP donatılı hibrit kirişlerdeki eğilme dayanımındaki donatı oranının buna olan etkisini araştırmışlardır. FRP donatısı normal betonarme çeliğine göre daha sünek davranış gösterir. Bu özelliğinden yararlandıkları zaman kirişlerin dayanımı ve sünekliğini artırdığını sonucuna vardıkları için FRP ve betonarme çeliğinin beraber kullanılması gerektiğine karar vermişlerdir. Gerek FRP donatısı gerekse de betonarme çeliği hibrit kirişlerde süneklik ve dayanımda farklı davranış

gösterirler. FRP ve betonarme çeliği arasındaki A_f / A_s donatı oranı yapılan hibrit tasarımında dayanım ve süneklik arasındaki dengeyi doğrudan etkiler. Yaptıkları bu çalışmada gerek denge altı gerekse de denge üstü donatılardaki eğilme durumlarını 3D sonlu elemanlar modeli kullanarak modellemişlerdir. Gerekli donatı oranı sağlanırsa istenen dayanım ve süneklik performansının elde edilebileceğini ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada toplam 15 tane FRP 'den oluşan hibrit bir sistemi 3D doğrusal olmayan sonlu eleman modeli kullanılarak modellemişlerdir. Gözlem ve tahmin sonuçlarını karşılaştırmak için simülasyon programında 6 model kullanılmıştır. Deneysel ve simülasyon sonuçlarında %10'dan daha az fark ortaya çıkmıştır. Bulgulara göre A_f / A_s oranının 1 ile 2,5 arasında tasarlanmasının uygun olduğunu belirlemişlerdir. Yaptıkları araştırma sonucunda FRP ile güçlendirilmiş hibrit tasarımı yüksek yük taşıma ve iyi bir duktilite gözlenmiştir. [6]

Hawileh yaptığı çalışmada 3 boyutlu sonlu elemanlar (FE) modeli kullanarak çelik ve AFRP çubuklardan oluşan hibrit kirişlerin orta açıklığında oluşan deplasmanı tahmin etmeye çalışmıştır. Geliştirilen bu model ile takviye çubukları ile beton yüzeyi arasındaki aderans ilişkisini incelemiştir. Bu model RC üyeleri gibi yük taşıma kapasitesinin tahmini ve kırılma davranışını doğru şekilde vermiştir. Ayrıca AFRP çubuk boyut etkisi, aderans davranışı, FRP tipi ve beton basınç kuvvetinin performansa olan etkisini incelemiştir. FRP ve çeliğin beraber kullanıldığı hibrit kirişten 3 boyutlu doğrusal olmayan FE modeli kullanarak toplam 21 adet numune üzerinde çalışma yapmıştır. Orta açıklıktaki deplasman değerinin deneysel ve teorik değerlerini karşılaştırmak için 6 model kullanılmıştır. RC kiriş numunelerinde AFRP çubuk boyut etkisi, aderans durumu ve beton basınç dayanım performansını araştırmak için 15 model kullanmıştır. Test sonucu ile tahmin edilen değer %10 'dan daha az sapma vermiştir. Yük taşıma kapasitesi 10, 12 ve 14 mm olan AFRP çubuklar 8 mm boyutunda olan çubuktan yaklaşık olarak sırasıyla %24.84, %39.92 ve %40.40 artış göstermiştir. Kirişlerin sünekliği 10, 12 ve 14 mm olan AFRP çubuklar 8 mm boyutunda olan çubuktan yaklaşık olarak sırasıyla %4.02, %6.32 ve %26.49 azalış göstermiştir. Farklı FRP tiplerinin kiriş numunelerinde farklı değerler vermiştir. CFRP ve çeliğin oluşturduğu hibrit kirişin GFRP, AFRP ve çelik çubuklar kullanarak yapılan kirişlerden daha iyi sonuçlar vermiştir. [7]

Suzan ve Hilal yaptıkları çalışmada fiber takviyeli polimer ve çelik takviyeli hibrit kirişleri doğrusal olmayan sonlu eleman modeliyle incelemişlerdir. Çalışmada GFRP ve CFRP olmak üzere iki farklı fiber takviye kullanmışlardır. 'ANSYS' sonlu eleman programı kullanılarak kirişin nihai yük taşıma kapasitesini, oluşan deplasmanı ve çatlak düzenini belirlemeye çalışmışlardır. ANSYS programından çıkan sonuçların deneysel veriler ile uyumlu olduğu belirlenmiştir. GFRP/çelik hibrit kirişinde ilk çatlak başlangıcında ve çelik veriminde artışlar olduğu gözlenmiştir. Ayrıca dayanım, süneklik ve çatlak sonrasında yük taşımasında iyileşmeler olduğu sonucuna varılmıştır. CFRP/çelik hibrit kirişlerinde ise çatlak başlangıcı ve çatlak ilerlemesinde iyi sonuçlar ortaya çıkmıştır. GFRP/CFRP ile yapılan hibrit kirişlerde donatının altta ve üstte olması süneklik, dayanıma gibi özelliklere etki eden parametreler olduğu gözlemlenmiştir. [8]

Lau ve Pam yaptığı çalışmada FRP ve çelik donatının bulunduğu 12 tane hibrit betonarme kirişe deneysel yükleme yapmış ve eğilme etkisi altındaki davranışını izlemişlerdir. Geleneksel inşaat donatısıyla FRP beraber kullanıldığı zaman süneklikte ciddi iyileşmeler olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca yapılan çalışmalar sonucunda ACI 440.1R-15 e göre FRP donatılı hibrit kirişler için ideal bulunan donatı oranının yaklaşık %25 oranında azaltılabileceği belirlenmiştir. FRP numunelerinde kullanılan etriyelerin kanca değerlerinin yapı elemanı üzerindeki etkisini de kontrol etmişlerdir. Kanca büküm derecesi 135° olan kirişlerin kanca derecesi 90° olan kirişlere göre daha duktül olduğu gözlemlenmiştir. [9]

Kara, Ashour ve Köroğlu yaptıkları çalışmada FRP ve normal çeliğin birlikte bulunduğu hibrit kirişlerdeki eğriliği, deplasmanı ve moment kapasitesini belirlemek amacıyla nümerik(sayısal) bir metot oluşturmuşlardır. İlk olarak kesit analizi tahmini yaparak kirişteki deplasman ve moment kapasitesinin bulunduğu moment-eğrilik ilişkisini araştırmışlardır. Değişen donatı miktarlarına bağlı değişik kırılma modlarını ortaya koymuşlardır. Bunlar çelik donatının akma olmadan önce veya sonrasında FRP donatının kırılması veya betonun çökmesidir. Yapılan çalışmalar sonucunda teorik ve deneysel verilerin birbiriyle eğrilik, moment kapasitesi ve sehim tahminleri birbirine uygun olduğu belirlenmiştir. FRP ilave edilmiş kirişlerin normal kirişlere göre süneklik ve rijitlik artışı olmuştur. Literatürde elde edilen deneysel

verilerin arasındaki karşılaştırmalar ve öngörülen eğrilik, moment kapasitesi ve deplasman tahminleri FRP/çelik içerikli hibrit kirişler ile uyum gösterdiğini ortaya çıkarmışlardır. NSM /FRP çubuklar ile güçlendirilmiş betonarme kirişler için önerilen moment kapasitesi içinde iyi sonuçlar vermiştir. Oluşan deplasmanları BİSCHOFF ile karşılaştırılmıştır. GFRP takviyeli betonarme kirişlerde ilk çatlağın başlamasından sonra CFRP takviyeli betonarme kirişlere kıyasla rijitliklerinde azalma olduğu gözlemlenmiştir. [10]

Qu, Zhang ve Huang birlikte yaptığı çalışmada cam elyaf takviyeli (GFRP) ve çelik donatının birlikte kullanıldığı dayanım ve süneklik artışı bilgisinden yararlanmışlardır GFRP destekli hibrit kirişlerde eğilme etkisini araştırmışlardır. Ayrıca kendi oluşturdukları bir model ile kirişlerin yük-deplasman durumunu ve taşıyacağı nihai yük değerlerini belirlemeye çalışmışlardır. Belirledikleri 8 kiriş üzerinde deneysel çalışmalar yapıp bunları belirledikleri model ile karşılaştırmışlardır Yaptıkları çalışmadan donatı oranı ve GFRP 'nin çeliğe oranını incelemişlerdir. Deneysel ve teorik bulgulardaki hibrit GFRP/çelik betonarme kirişlerin sapma ve çatlak genişliği yeterince tahmin edilebilir olduğu belirlenmiştir. GFRP ilavesiyle betonarme kirişin eğilme dayanımının arttığı gözlemlenmiştir. Nihai sonuç değerini tahmin etmek için etkili donatı oranı önemli bir parametredir. Hibrit GFRP/çelik takviyeli kirişlerde yük-deplasman durumu için 3 faza ayırmışlardır. İkinci ve üçüncü faz etkili donatı oranının artırılması eğilme dayanımını artırdığını gözlemlenmişlerdir. Çelik takviyesi ile kirişte sünekliğin arttığı belirlenmiştir. Çeşitli yük değerlerinde yük-deplasman değerini tahmin etmeye çalışmışlardır TS modeli ile Nayal ve Rasheed mevcut yük-deplasman değerlerini tahmin etmeye çalışmışlardır. Bischoff 'un ileri sürdüğü etkin atalet momenti modeli yardımıyla hesaplanan deplasman değerinin yükün kullanılabilirlik yük seviyesinde olduğundan gerçek değere yakın olduğunu fakat yük bu seviye değerinin geçtiği zaman ve taşıma gücüne yaklaştığı zaman değişik sonuçlar çıktığı belirlenmiştir. [11]

Almusallam, Elsanadedy, Al-Sallaoum ve Alsayed yaptığı çalışmada NSM çubuklarının eğilme kapasitelerini eski haline getirilmesi ya da artırılması için RC kirişlerinde deneysel ve teorik çalışmaları incelemişlerdir. NSM çubuklarındaki çalışılan parametreler GFRP 'ye karşı çelik ve NSM oranının etkisini incelemek için

sekizer adet iki grup halinde olacak şekilde 16 kiriş kullanmışlar. Birinci grubun iki kirişine 3 tane çelik donatı takviyeli numune oluşturmuşlardır. İkinci gruptan 2 kirişe 3 tane GFRP çubuğu takviyesi yapılarak numune sonuçlarını karşılaştırmışlar. ACI 440.1R-06 şartnamesi rehberliğinde ACI 318-11 yardımıyla kirişin yük kapasitesini tahmin etmeye çalışmışlardır. Teorik kontrolü ise doğrusal olmayan sonlu eleman (FE) kullanıldığı LS-DYNA yazılımı kullanılarak hesaplamışlardır. NSM ve GFRP kullanılmasıyla kirişin yük kapasitesini artırmıştır. Epoksi harcı ile ekilen NSM çubukları için yeterli ankraj yapılması halinde aderans daha iyi olmuştur. Ayrıca iyi ankraj ile kirişin yük kapasitesinde artış da yapılabilir olduğu belirlenmiştir. NSM donatı oranı arttıkça hem kiriş eğilme kapasitesi hem de dayanım artmıştır. Yüksek oranda NSM çubuğu ilave edilmesi ile deplasman ve süneklik enerjisinde azalmalar olmuştur. [12]

Khorasani, Esfahani ve Sabzi yapmış olduğu deneysel çalışmada GFRP çubukların takviyesiyle oluşan betonarme kirişlerdeki eğilme davranışı, deplasman ve çatlama özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada 20 tane kiriş uzunluğu 2200 mm ve kiriş en kesiti 250 mm olan kirişler kullanılmıştır. Sonuçlara göre donatı miktarının artırılması sonucunda yük kapasitesindeki artış ve orta açıklıkta oluşan deplasman azalmaları olmuştur. Ayrıca küçük çaplı enine donatı oranı yük taşıma kapasitesinde önemli artışlar gözlenmiştir. Test parametresi olarak enine donatıların miktarı ve düzenlemesiyle gerilme miktarında oluşan durumları belirlemeye çalışmışlardır. Düşük ve yüksek eğilme donatı oranları olan tüm kirişlerde artan donatı miktarı yük taşıma kapasitesinde önemli artışlar sağlamıştır. Ayrıca küçük çaplı donatı kullanılmasıyla birlikte yük taşıma kapasitesini artırmada güçlü bir etkiye sahiptir. Beton ve çubuklar arasındaki yapışma davranışı (aderans) toplam alan sabit kalmak şartıyla daha küçük çaplı ancak daha fazla sayıda çubuk kullanılmasıyla çatlak genişliği ve yük taşıma kapasitesinde artış olmuştur. Ortalama deneysel kirişlerin taşıma kapasitesi için öngörülen donatı oranı düşük kirişlere göre biraz fazla olduğu sonucuna ulaşmışlardır. [13]

Marana, Manalo, Benmokrane, Karunasena, Mendis, Nguyen yaptığı çalışmada cam elyaf takviyeli (GFRP) ve çelik donatının bulunduğu eğilme davranışını incelemişlerdir. 7 tane polimer betonlu kirişte farklı oranlarda tasarlanıp dört nokta

statik eğilme testi yapılmıştır. Güçlendirme oranının artmasıyla kirişin tüm performansı da artmıştır. Üstte çelik çubuk olması ve altta GFRP çubuk olması beton çatlamasına ve dayanıma etki ettiğini gözlemlemişlerdir. Test edilen geo-polimer betonlu hibrit kirişler normal betonlu hibrit kirişlere göre daha iyi eğilme momenti vermiştir. ACI 440.1R-15 hem de CSA S806-12 kullanarak servis yükü altında bükülme dayanımı ve orta açıklıktaki deplasmanı tahmin etmeye çalışmışlardır. GFRP/çelik hibrit kirişlerin süneklik, enerji tüketimi ve kullanılabilirliğinde iyileşmeler olmuştur. Çelik çubuklar konumları nedeniyle statik açıdan daha düşük güç sağladığı kabul edilir. Yalnız GFRP çubukların olduğu hibrit kirişlerin eğilme-moment kapasitesi diğer kirişlere göre %15'e varan artış göstermiştir. Beton dayanımının 45 MPa 'dan daha büyük olması şartıyla GFRP çubukların miktarını artırmak iyi sonuçlar vermiştir. Çünkü yüksek dayanımlı beton GFRP çubukların yüksek çekme dayanımı göstermesine yardım etmiştir. Bu çalışmalarını ile yeni birçok çalışmaya ipucu verecek bilgiler ortaya koymuşlardır. [14]

Zhu, Cheng, Gao, Neaz ve Li yaptığı çalışmada FRP çubuk takviye edilmiş yüksek mukavemetli beton(FRHSC) kirişlerin eğilme davranışını incelemişlerdir. 12 adet kirişte 4 noktada eğilme altındaki davranışı araştırılmıştır. FRHSC tabakasının kalınlığının etkilerinin çelik lifin kırılma seviyesi ve FRP donatılarına etkilerini gözlenmiştir. Kırılma modu, eğilme kapasitesi deplasmanı, çatlak genişliği ve kirişlerdeki süneklik durumunu araştırılmıştır. FRP çubukları kullanılan kirişlerde çatlak genişliğinde azalmalar olduğu belirlenmiştir. FRP çubukların kullanıldığı betonarme kirişlerde optimum FRHSC tabaka kalınlığı toplam derinliğin 0.57 katıdır. FRP çubuklarıyla yapılan FRHSC kirişlerin etkili atalet momentlerini tahmin etmeye çalışmışlardır. FRHSC kalınlığı ve çelik lif seviyesi eğilme kapasitesi için oldukça fazla öneme sahip değildir. Fakat FRP ile güçlendirilmiş FRHSC kirişlerindeki eğilme kapasitesi kısmen FRHSC kirişlerinden daha önemlidir. FRHSC tabaka kalınlığı çelik lifin kırılma seviyesi ve FRP 'yi artırmak deplasman azalması, çatlak genişliği ve çatlak yayılmasında azalmalar sağlamıştır. Büyük deplasman ve çatlak genişliğinin azalmasında gerilme bölgesine çelik liflerin eklenmesinin katkısının olduğunu belirlenmiştir. Kirişin orta açıklığındaki deplasmanı geliştirdikleri metot ile hesaplayıp bunu deneysel veriler ile karşılaştırmışlardır.[15]

Goldston, Remennikov, Salah, Sheikh yaptığı çalışmada yüksek dayanımlı ve ultra dayanımlı kirişlerin statik ve basınç yüklemesi altındaki davranışını incelemişlerdir. Toplamda 12 adet kiriş tasarlanmış ve deneye tabii tutulmuştur. Altı tane kiriş statik yüklemeye maruz bırakılmıştır. Yüksek dayanımlı betonda statik yüklemeye GFRP-RC kirişlerinin yük taşıma kapasitesini, deplasmanı ve çatlak genişliği gibi durumlarını incelemişlerdir. Diğer altı kirişe ise çeşitli seviyelerde basınç yüklemesi yapılarak davranışını gözlemlenmiştir. Yaptıkları deney sonucunda aşırı donatı oranından dolayı betonda ezilme meydana gelmiştir. Üç nokta yükleme deneyinde yük ortasındaki deplasman bi-lineer davranış göstermiştir. Yüksek dayanımlı ve ultra yüksek dayanımlı GFRP-RC kirişlerinin üç nokta eğilme deneyine tabii tutulduğunda yük taşıma kapasitesi, deplasman ve çatlak durumunun tümünü etkilediği sonucuna varmışlardır.[16]

Tommaso, Marco yaptığı çalışmada GFRP çubuğu olan 9 adet çubuğa kısa süreli çekme testi ve 17 adetine ise uzun süreli çekme testi uygulamışlardır. Uzun süreli yükleme testlerinde 1000 ile 2000 saat boyunca gevşeme ve sünme testlerine tabii tutmuşlardır. İlk uygulanan basınç uygulamasında yeni gevşeme ve sünme fonksiyonlarının oluştuğunu gözlemlenmiştir. Bu fonksiyon farklı basınç seviyelerinde donatı çubuklarının gevşeme kayıplarının uzun vade elde edileceği sonucuna varmışlardır. Deney güvenilirliği için çok sayıda uzun süreli yükleme testi yapmışlardır. Uzun süreli testlerde GFRP çubuklarının başlangıç baskı değerlerinin $0.6f_f$ değerini aşmadığı ve GFRP 'nin güç ve elatisite modülünü etkilemediğini gözlemlenmiştir. İlk uygulanan $0.8f_f$ 'lik baskının iki test için kabul edildiğinde çubukta 8 saatten daha kısa sürede başarısız olduğunu gözlemlenmiştir.[17]

Reda, Sharaky, Ghanem, Seleem, Sallam yaptığı çalışmada cam elyaf takviyeli polimer çubukların uçlarını bozulma veya NSM FRP 'nin bağlanmaması ve beton kaplamanın ayrılmasını engellemek için 45° ve 90° açılarda bükmüşlerdir. Böylece kirişlerin yük taşıma kapasitesinin arttığı sonucuna varmışlardır. GFRP çubuklarda karşılaştırma yapmak için farklı uzunluklarda deney yapmışlardır. Test sonuçları göstermiş ki GFRP çubuklarının bükülmüş olması beton örtüsünün ayrılmasını önleyerek kirişin taşıma kapasitesini artırdığı sonucuna varmışlardır. NSM çubukları ile olan kiriş, donatı bükümü 45° derecelik açı ile olan kiriş, donatı bükümü 90°

derecelik olan kirişlerin yük taşıma kapasitesi kontrol kirişine göre yaklaşık olarak sırasıyla %177, %201, %185 daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Donatı bükümünün 45° olan kirişlerin 90° olan kirişlere göre daha sünek davranış gösterdiğini belirlemişlerdir.[18]

Abdelkarım, Ahmed, Mohamed, Benmokrane yaptığı çalışmada cam elyaf takviyeli normal ve yüksek dayanımlı kirişlerde eğilme altında güç, deformasyon ve dayanım süresi gibi parametreleri incelemişlerdir. En kesiti 200mm*300mm ve uzunluğu 2700 mm olan kirişler üzerinde çalışma yapmışlardır. 8 adet kirişte iki noktalı eğilme deneyi yapmışlardır. 4 kirişte dayanımı 35 MPa olan normal beton diğer 4 kirişte ise dayanımı 65 MPa olan yüksek dayanımlı beton kullanmışlardır. GFRP oranı %0.38 ile %1.63 olan 12 mm, 16 mm, 20 mm ve 25 mm olan çubuklar kullanmışlardır. 7 kirişte beton ezilmesi olurken 8 kirişte FRP 'nin koptuğunu gözlemlemişlerdir. Yüksek dayanımlı kirişler normal dayanımlı kirişlere göre daha sünek davranış göstermiştir. Elde ettikleri sonuçların CSA S806-12 ve ACI 440-15 yönetmeliklerine çok yakın sonuçlar vermiştir. Deneysel verileri ile tahmin ettikleri değerler %80 den fazla doğru sonuç vermiştir. GFRP ile güçlendirme çubuğunun oranının artışı moment-deplasman üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu görmüşlerdir. GFRP donatı oranı artışı veya beton dayanımı artışı çatlakların azalmasına etki ettiğini belirlemişlerdir.[19]

Liu, Y. Zhou, J. Zhou, Zhang, Jin, Zheng, Fan yaptığı çalışmada GFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin (GRCBs) tasarımı, üretimi ve testini yapmışlardır. Referans olarak belirledikleri kiriş ise GFRP ile benzer rijitliğe sahip çelik çubuklu kirişler (SRCBs) kullanılarak tasarımı, üretimi ve testini yapmışlardır. Patlama anında GRCB 'lerin SRCB 'lerden daha az yer değiştirme yaptıklarını belirlemişlerdir. Bunun sebebi ise çelik çubuklar plastik deformasyona uğrarken GFRP 'li çubuklar hala elastik davranış gösteriyor olmaları sonucuna ulaşmışlardır. GRCB kirişlerin daha yüksek patlama direnci göstermiştir. GRCB kirişleri uzun elastik deformasyon göstermiştir. SRCB kirişleri ise mükemmel-plastik davranış göstermiştir. Elastikiyet GRCB kirişlerinin yük kapasitesini artırırken SRCB kirişlerinin yük kapasitesini sınırladığını gözlemlemişlerdir. Yakındaki patlamalardaki kirişlerde seyrek çatlaklar, yoğun çatlaklar, potansiyel dağılma ve dağılma gibi değişik zarar modları

belirlemişlerdir. GRCB kirişleri SRCB kirişlerine göre daha mükemmel patlama direnci gösterdiği sonucuna varmışlardır.[20]

Gribniak ,Rimkus ,Torres ,Hui yaptığı çalışmada en kesit boyutu, donatı boyutu, güçlendirme oranı, kaplama derinliği gibi parametrelerin etkilerini görmek için deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında birden fazla çubuğun ankrajı için özel bir ekipman oluşturmuşlardır. Çelik ve GFRP ile güçlendirilmiş 16 tane numune üzerinde çalışmışlardır. Bunların 8 tanesinde farklı en kesitli numune kullanılmıştır. GFRP çubuklarla güçlendirilmiş çoklu deney düzeneğinde betondaki çatlama ve deformasyonu belirlemeye çalışmışlardır. Benzer eksenel sertliği olan çelik ve GFRP çubukların olduğu numuneler aynı deformasyon aralığı ve aynı çatlak gelişimi gösterdiğini görmüşlerdir. Eşdeğer eksenel sertlikte gerilme elemanlarında çatlak aralığında beton geometrisine ve kaplama derinliğine bağlı olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Çatlakları incelemek için dijital görüntü korelasyon sistemi kullanılarak monitöre aktarım yapmışlardır. Donatı sertliğinin azalması nihai deformasyonun artmasına neden olduğunu gözlemlemişlerdir. [21]

Escórcio, M. França, yaptığı çalışmada korozyona uğrayan çubukların uzun vadede onarım ve iyileştirmesini yapmak için bir teknik oluşturmuşlardır ve bu tekniği deneysel olarak açıklamaya çalışmışlardır. İki farklı donatı oranına sahip GFRP çubuklarının olduğu kirişler ile orijinal kirişleri karşılaştırmışlardır. Çelik ve korozyona dayanıklı GFRP çubuklarla üretilmiş RC kirişlerin gerilme yüzeylerinin rehabilite edilmesini amaçlamışlardır. Kirişlerin eğilme kapasitesi, kırılma modu, deplasmanı, çatlak durumu, kirişin ortasındaki çatlak genişliği gibi parametreleri incelemişlerdir. Tahmin edilen değerler ACI.1R-06 yönetmeliğine göre olumlu sonuçlar vermiştir. Rehabilite edilen kirişler olası korozyon durumunda direnç göstermiştir. Amaçlanan hem deplasman hem de nihai yük kapasitesi orijinal kirişe benzer sonuçlar vermiştir. [22]

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

- 1- Japon Standardı (JSCE) [23]
- 2- Kanada Standardı (CSA S806-12) [24]
- 3- Amerikan Standardı (ACI 440.1R-15) [25] 'tir.



2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1 Deney Programı

Yapılan deneysel çalışmada; 150 mm eninde, 300 mm yüksekliğinde dikdörtgen kesitli, 2050 mm uzunluğunda 5 adet betonarme kiriş hazırlanmıştır. Betonarme kirişlerin C30 beton sınıfı kullanılarak kirişler hazırlanmıştır. Kirişlere dökülen betonun laboratuvar ortamında 7 ve 28 günlük dayanımlarını belirlemek için 15x15 cm küp numuneler alınmıştır. Tüm kirişlerde basınç donatısı olarak 2 adet 10 mm çapında (2Ø10) nervürlü çelik donatı, etriye olarak 5 mm çapındaki 75 mm aralıkta (Ø5/75) çelik donatı kullanılmıştır. Çekme donatısı olarak, çelik ve cam lif takviyeli polimer (GFRP) malzeme, farklı donatı oranlarında hibrit olarak kullanılmıştır. Kirişlerdeki değişken parametreler; beton dayanımı, çekme donatısı sıralaması, çelik çekme donatı sayısı ve oranıdır.

Kirişler isimlendirilirken sırasıyla, beton dayanımı (N: Normal Dayanımı), çekme bölgesindeki çelik donatı sayısı, çekme bölgesindeki çelik donatı çapı, cam donatı adedi ve cam donatı çapı gösterilmiştir.

Deneylerde kullanılan kiriş numunelerinin isimleri ve açıklamaları şöyledir:

Ns2S16-2G13: Normal Dayanımlı, çekme bölgesinde tek sırayla 2 adet 13 mm çapında GFRP donatı, 2 adet 16 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

Ns2S16-2G10: Normal Dayanımlı, çekme bölgesinde tek sırayla 2 adet 10 mm çapında GFRP donatı, 2 adet 16 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

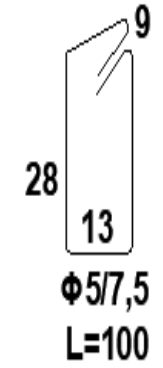
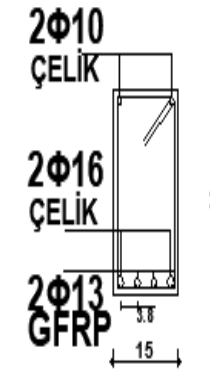
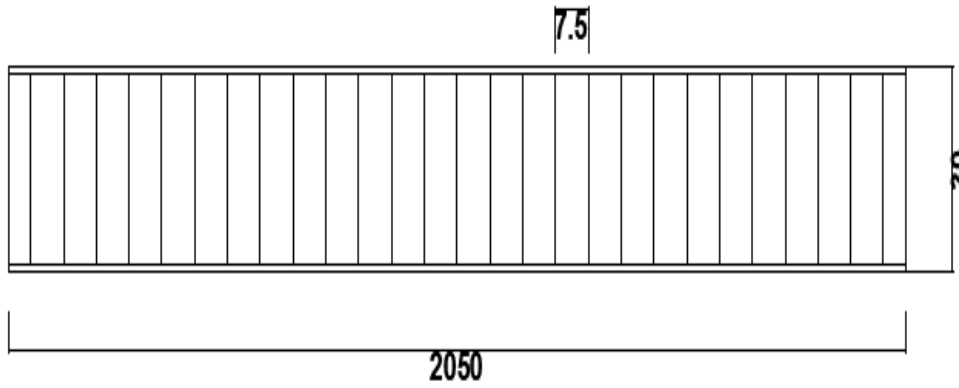
Nd2S16-2G13: Normal Dayanımlı, çekme bölgesinde çift sırayla 2 adet 13 mm çapında GFRP donatı, 2 adet 16 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

Nd5S10-2G13: Normal Dayanımlı, çekme bölgesinde çift sırayla 2 adet 13 mm çapında GFRP donatı, 5 adet 10 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

Nd5S10-2G10: Normal Dayanımlı, çekme bölgesinde çift sırayla 2 adet 10 mm çapında GFRP donatı, 5 adet 10 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

Ns2S16-2G13

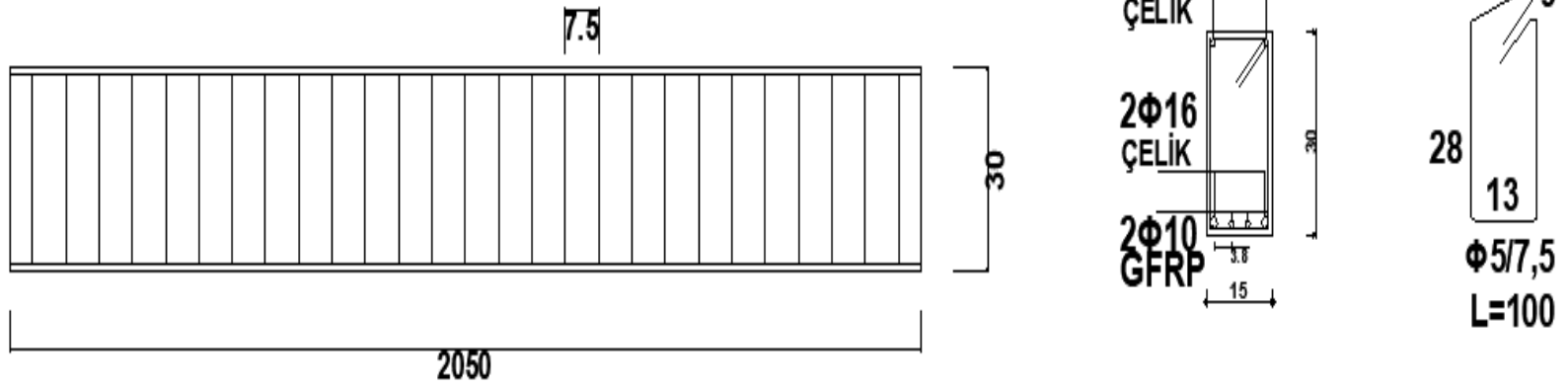
150/300



Şekil 2.1. (Ns2S16-2G13) Kiriş Detayı

Ns2S16-2G10

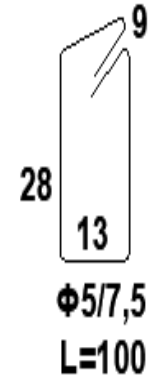
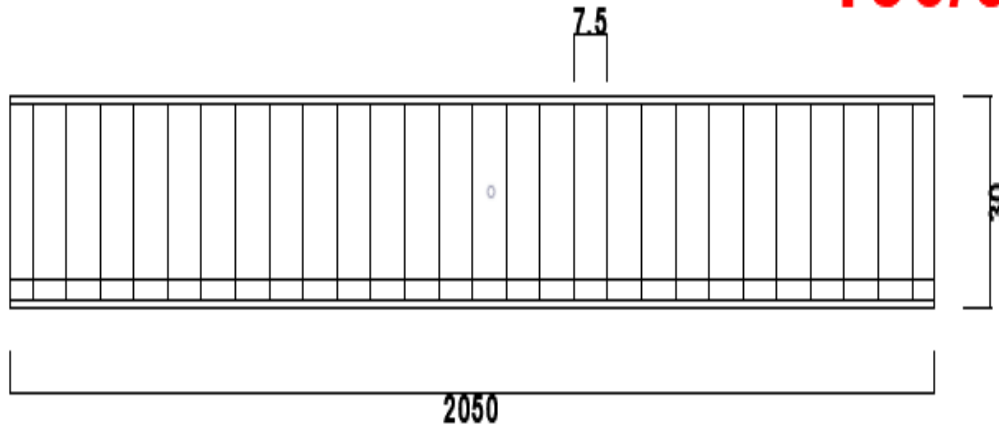
150/300



Şekil 2.2. (Ns2S16-2G10) Kiriş Detayı

Nd2S16-2G13

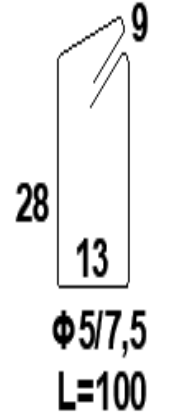
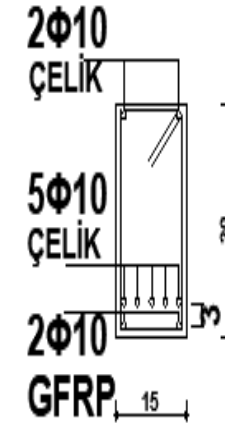
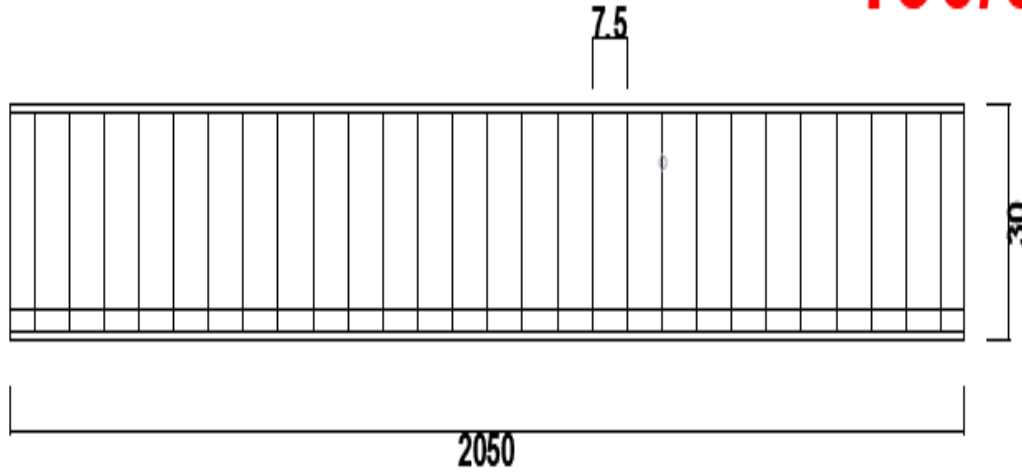
150/300



Şekil 2.3. (Nd2S16-2G13) Kiriş Detayı

Nd5S10-2G10

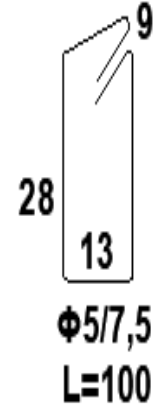
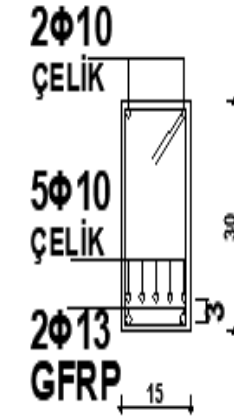
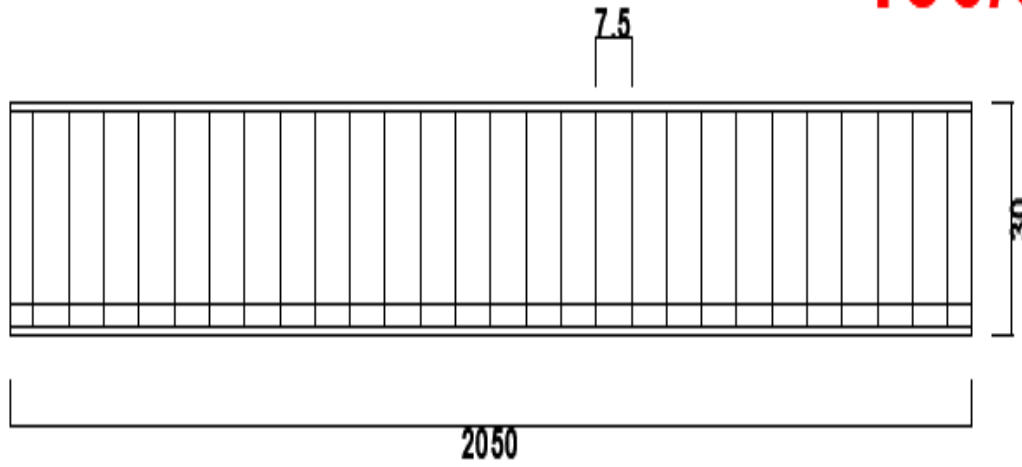
150/300



Şekil 2.4. (Nd5S10-2G10) Kiriş Detayı

Nd5S10-2G13

150/300



Şekil 2.5. (Nd5S10-2G13) Kiriş Detayı

2.2 Malzeme Özellikleri

2.2.1 Beton Özellikleri

Deneylelerdeki altı kirişte de normal dayanımlı beton kullanılmıştır. Kullanılan normal dayanımlı beton özellikleri Çizelge 2.1. de belirtilmiştir.

Çizelge 2.1. Normal Dayanımlı Betonun Küp ve Silindir Dayanımları

	Numune No	Numune Boyutu (mm X mm)	Küp Basınç Dayanımı (MPa)	Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	Ortalama Silindir Basınç Dayanımı (MPa)
7 günlük	1	150 X 150	36,938	31,397	31,573
	2	150 X 150	37,636	31,991	
	3	150 X 150	36,862	31,333	
28 günlük	4	150 X 150	46,832	39,807	40,041
	5	150 X 150	48,564	41,279	
	6	150 X 150	45,928	39,039	

2.2.2. Çelik Donatı Özellikleri

Kirişlerde kullanılan çelik donatılar S420 çeliğidir. S420 çeliği mekanik özellikleri Çizelge 2.2. de gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. Kirişte Kullanılan Çeliğin Mekanik Özellikleri

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

2.2.3 GFRP Donatı Özellikleri

BFRP malzeme özellikleri, laboratuvardaki imkanların yetersiz olmasından dolayı test edilememiş olup, katalogdan alınmıştır. Mekanik özellikler Çizelge 2.3. de gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Kirişte Kullanılan Cam Elyaf Malzemenin Mekanik Özellikleri

Malzeme	Kopma Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Cam Elyaf	450	35.000



Şekil 2.6. Hazırlanan Kalıbın Görünümü



Şekil 2.7. Hazırlanan Kirişin Görünümü

2.3 Kirişlerin Tasarımı Ve Hazırlanması

150 x 300 x 2050 mm ölçülerinde hazırlanan kalıplara, daha önceden hazırlanan kiriş donatılar yerleştirilmiştir. Kiriş donatılar hazırlanırken GFRP donatısı adet ve çap oranlarını değişik kombinasyonlar ile yerleştirilmiştir. Daha sonra hazırlanan C30 beton dökümü gerçekleştirilmiştir. Beton dökülmeden kirişlerin son hali aşağıdaki gibidir.



Şekil 2.8. Normal Dayanımlı Kirişlerin Beton Dökümü Öncesi Görünüşleri



Şekil 2.9. Normal Dayanımlı Kirişlerin Beton Dökümü Sonrası Görünüşleri

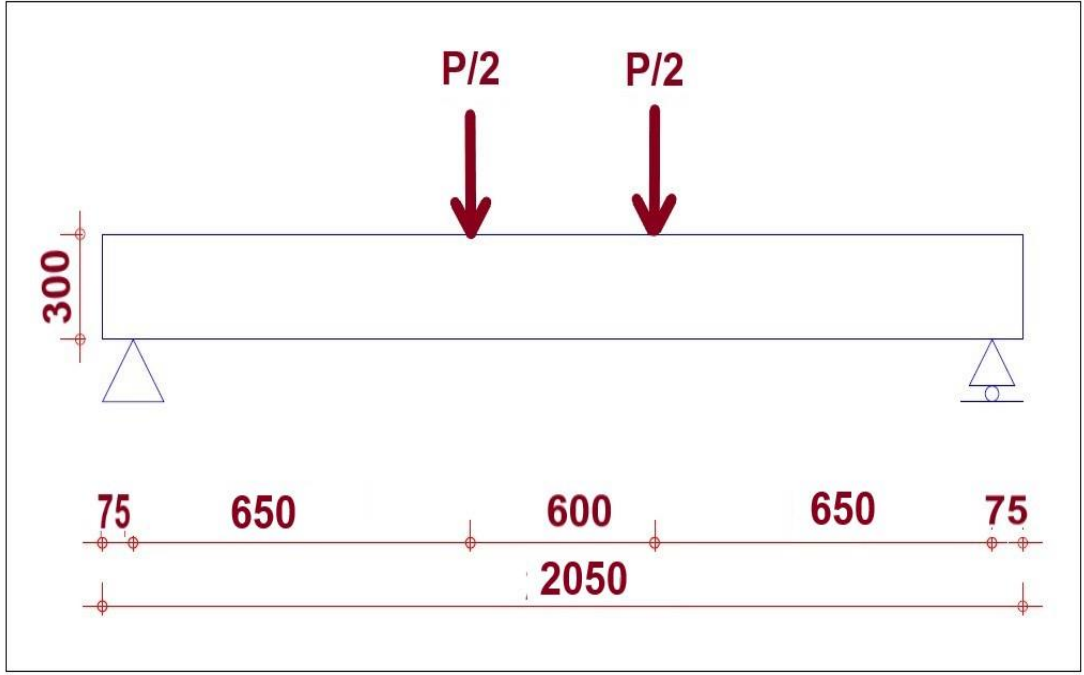
2.4 Yükleme, Ölçüm Ve Deney Düzenegi

Üretilen kirişler üzerinde dört noktali eğilme deneyi yapılmıştır. Hazırlanan betonarme kiriş numunesi bir taraftan sabit mesnetli, diğeri taraftan kayıcı mesnetli olmak üzere iki mesnet üzerine yerleştirilmiştir. Mesnetler, betonarme kirişin uç noktalarından 75 mm içeride olacak, 1900 mm açıklık kalacak şekilde ayarlanıp yerleştirme işlemi yapılmıştır. Daha sonra yerleştirilen betonarme kiriş üzerine, yine bir taraftan sabit mesnetli, diğeri taraftan kayıcı mesnetli olacak şekilde, 13,50 X 13,50 kutu kesitli 80 cm uzunluğunda çelik yükleme kiriş yerleştirilmektedir. Çelik kiriş, yükleme kirişi veya yük dağıtma kirişi olarak kirişe üst tarafta iki noktadan yükleme yapmak için yerleştirilmiştir. Çelik kiriş üzerine, 2 cm çapında, 15 cm uzunluğunda, 6 adet çelik dolu kesitli silindirler yerleştirilir. Bu silindirler üzerine yükleme plakası, onun üzerine de yük hücresi yerleştirilir. Yük hücresi üzerinde, yüklemeyi sağlayabilmek için hidrolik kriko bulunmaktadır.

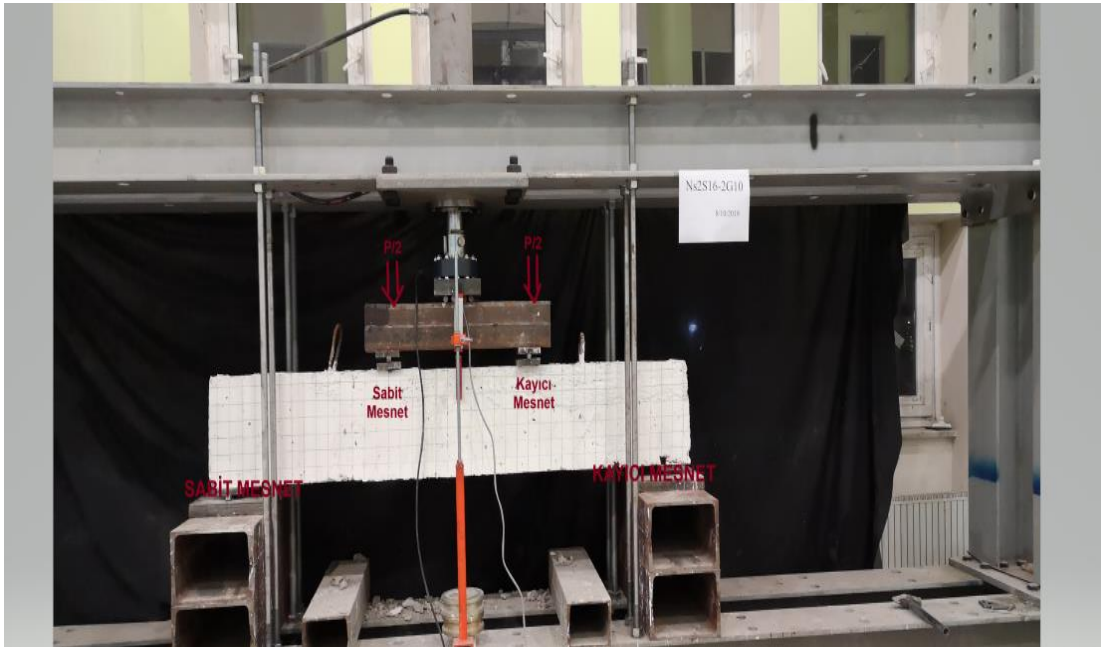
Kiriş orta noktasına, elektronik deplasman ölçer (LVDT) takılmaktadır. Bu cihaz yatay yönde hareket etmeyecek şekilde sabitlenir ve bu cihaz yardımı ile kiriş orta noktasında meydana gelen düşey deplasman ölçülür. Bu ölçümler bilgisayar programı yardımıyla elektronik ortama atılmıştır.

Kiriş numunesi üzerindeki çatlakların daha iyi görünmesi amacıyla beyaz renge boyanmıştır ve beşer santimetrelik karelaj ile işaretlenmiştir. Bu karelajın oluşturulmasının sebebi, kirişe gelen yüklerin oluşturduğu çatlakların analizini hızlı bir şekilde yapmaktır.

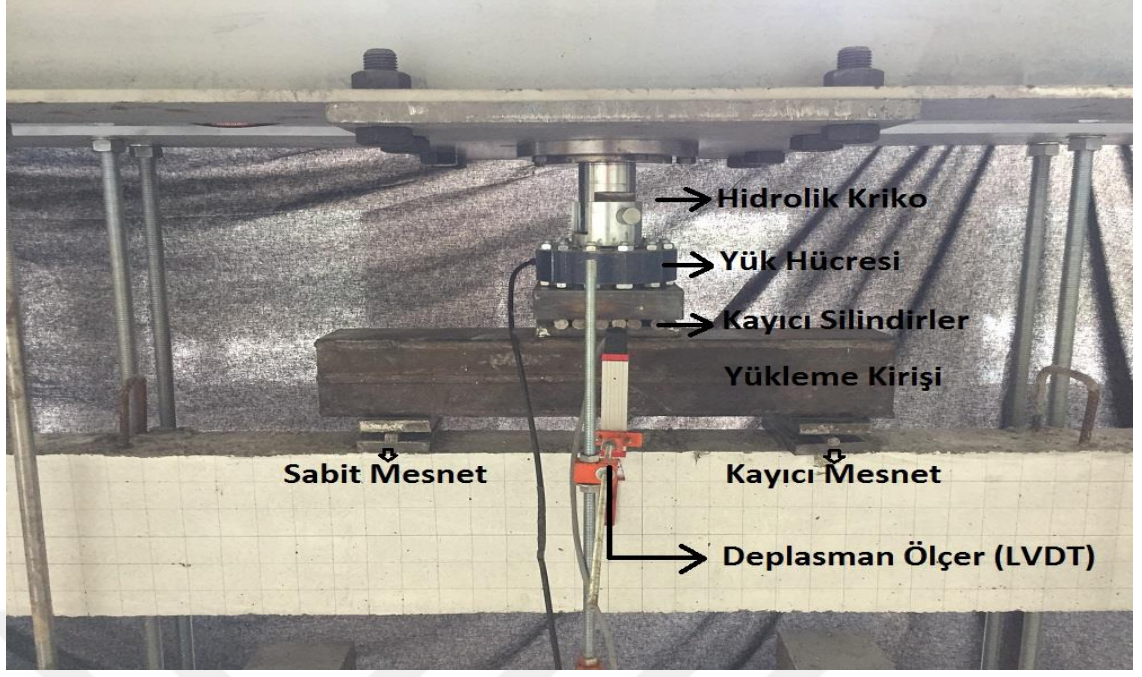
Yük hücresi ve LVDT 'den alınan elektronik veriler bilgisayar ortamında, sayısal hale dönüştürülür. Elde edilen veriler kullanılarak yük- deplasman eğrileri çizilir.



Şekil 2.10. Deney Yükleme Sistemi



Şekil 2.11. Deney Düzenegi



Şekil 2.12. Yükleme Düzenegi



Şekil 2.13. Kullanılan GFRP Görünümü

2.5 Deneyler

2.5.1. (Ns2S16-2G13) Numunesi Deneyi

Basınç bölgesinde 2 adet 10 mm çapında çelik donatı, çekme bölgesinde 2 adet 13 mm çapında GFRP donatı ve 2 adet 16 mm çapında çelik donatı bulunan, 5 mm çapındaki çelik etriyelerin kiriş boyunca 7,5 cm ara ile yerleştirildiği, normal dayanımlı betonun kullanıldığı kiriş elemanı; dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur.

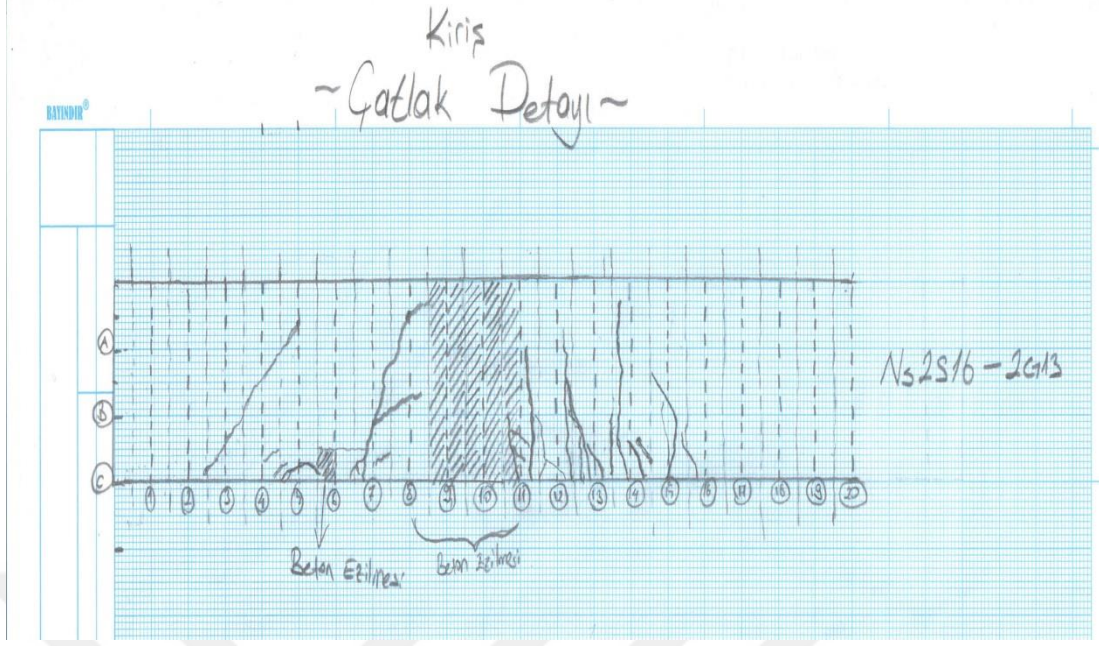
Yük değeri 30 kN, deplasman değeri 1,37 mm 'yi gösterdiğinde, 2 tane eğilme çatlağı meydana gelmiş olup, çatlakların 1 mm 'den küçük olduğu ölçülmüştür. Yük değeri 90 kN, deplasman değeri 3,12 mm 'yi gösterdiğinde, basınç yüzüne en yakın eğilme çatlağı 5 cm mesafededir. Yük değeri 137 kN iken çatlak ölçümü yapıldığında çatlakların halen 1 mm'nin altında olduğu ve sabit mesnete yakın bölgede beton yüzeyinde ezilme olduğu gözlemlenmiştir. Yük değeri 151 kN ve deplasman değeri 4,85 mm olduğu sırada sol mesnete yakın bölgede ezilmeler olmuştur. Yük değeri 200 kN ve deplasman değeri 13,69 mm iken çatlak genişliğinin 1 mm' den fazla olduğu belirlenmiştir. En büyük eğilme çatlağının basınç yüzeyine mesafesi ise 3 cm gözlenmiştir. Donatının kopması sonucu 244 kN'dan 177 kN'a düşmüştür.. İki yük noktası arasındaki donatıda burkulma olduğu için yük değeri 185 kN'dan 177 kN'a düşmüştür. Yük değeri 79 kN ve deplasman değeri 156,7 mm olduğu zaman deney güvenliği için krikodaki yük yavaş yavaş boşaltılarak deneye son verilmiştir.



Şekil 2.14. (Ns2S16-2G13) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu



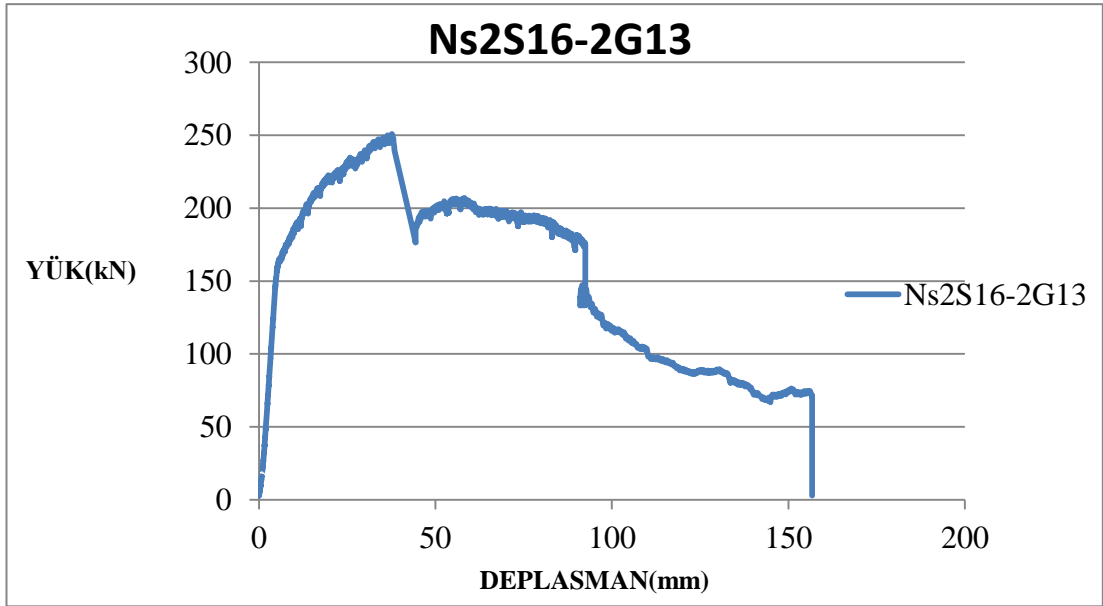
Şekil 2.15. (Ns2S16-2G13) Kirişi Çatlak Gelişimi



Şekil 2.16. (Ns2S16-2G13) Çatlak Detay Çizimi

2.5.2 (Ns2S16-2G13) Numunesi Yük- Deplasman İlişkisi ve Grafiği

Deney başlangıcından, deney sonuna kadar kaydedilen yük-deplasman değeri ile oluşturulan grafik Şekil 2.17 de verilmiştir.



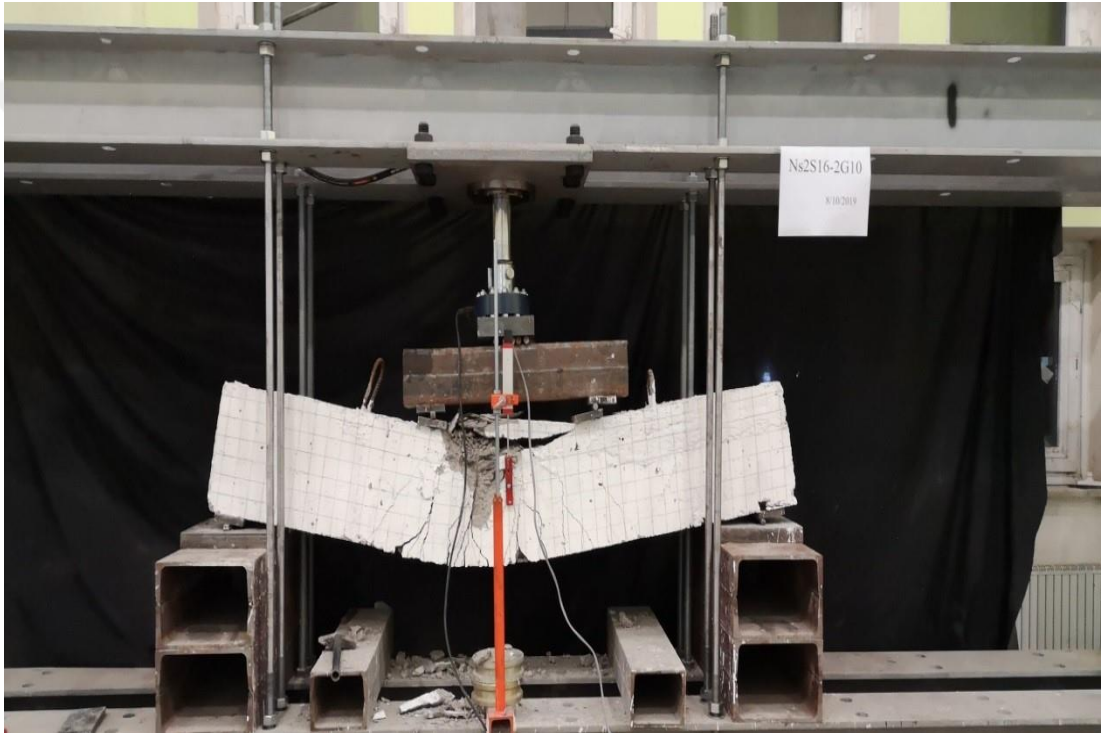
Şekil 2.17. (Ns2S16-2G13) Kirişi Yük- Deplasman Grafiği

2.5.3. (Ns2S16-2G10) Numunesi Deneyi

Basınç bölgesinde 2 adet 10 mm çapında çelik donatı, çekme bölgesinde 2 adet 10 mm çapında GFRP donatı ve 2 adet 16 mm çapında çelik donatı bulunan, 5 mm çapındaki çelik etriyelerin kiriş boyunca 7,5 cm ara ile yerleştirildiği, normal dayanımlı betonun kullanıldığı kiriş elemanı; dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur.

Kiriş hidrolik kriko ile yüklenmeye başlanmış, yük ve deplasman verileri kaydedilmiş olup, deney esnasındaki değişimler gözlemlenmiştir. Yük değeri 6,72 kN ve deplasman değeri 0,18 mm'dir. Çatlak genişlik değeri 1 mm'den küçüktür. Yük değeri 30kN ve deplasman değeri 1,16 mm'dir. Çatlak genişlik değeri 1 mm'den küçüktür. Yük değeri 50kN ve deplasman değeri 2,34 mm'dir. Çatlak genişlik değeri 1 mm'den küçüktür. Yük değeri 60 kN, deplasman değeri 2,73 mm'yi gösterdiğinde, 2 adet eğilme çatlakı meydana gelmiş olup, çatlaklardan basınç yüzüne en yakın olanı 15 cm mesafededir. Ölçülen çatlak genişliği 1 mm küçüktür. Yük değeri 100 kN, deplasman değeri 4,45 mm 'yi gösterdiğinde, sol mesnete yakın 2 tane kesme çatlakı ve 6 tane eğilme çatlakı meydana gelmiştir. Yük değeri 110 kN deplasman değeri 4,92 mm'yi gösterdiğinde, sol mesnete yakın bölgede oluşan kesme çatlakı basınç yüzeyine 5 cm uzaklıktadır. Yük değeri 180 kN, deplasman değeri 11,4 mm'yi gösterdiğinde, ölçülen çatlak genişliği 1 mm'dir. Yük değeri 200 kN ve deplasman değeri 16,40 mm gösterdiğinde ölçülen çatlak genişliği 1,5 mm'dir. Yük değeri 205 kN ve deplasman değeri 18,7 mm gösterdiği zaman ölçülen çatlak genişliği 2,5 mm'dir. Ayrıca sol mesnete yakın basınç bölgesindeki kabuk betonunda ezilme meydana geldi. Yük değeri 208 kN ve deplasman değeri 22 mm'yi gösterdiği sırada yük değeri 165 kN 'a düştü. Bu yük değerinde ölçülen çatlak genişliği ise 3 mm'dir. Yük değeri 212 kN ve deplasman değeri 24,60 mm gösterdiği ölçülen çatlak genişliği 3,5 mm'dir. Ayrıca kabuk betonu kabarmıştır ve yük değeri 212 kN 'dan 190 kN 'a düşmüştür. Bu yük değerinden sonra LVDT bağlandığı noktada beton ezilmesi oluşmuştur. LVDT okuması için tekrar kirişin yaklaşık 9 cm aşağısından yeni bir bağlantı deliği açılmıştır. Daha sonra LVDT resetlemesi yapılmıştır. Yük değeri 178 kN ve deplasman değeri 42,6mm'yi gösterdiğinde basınç bölgesindeki

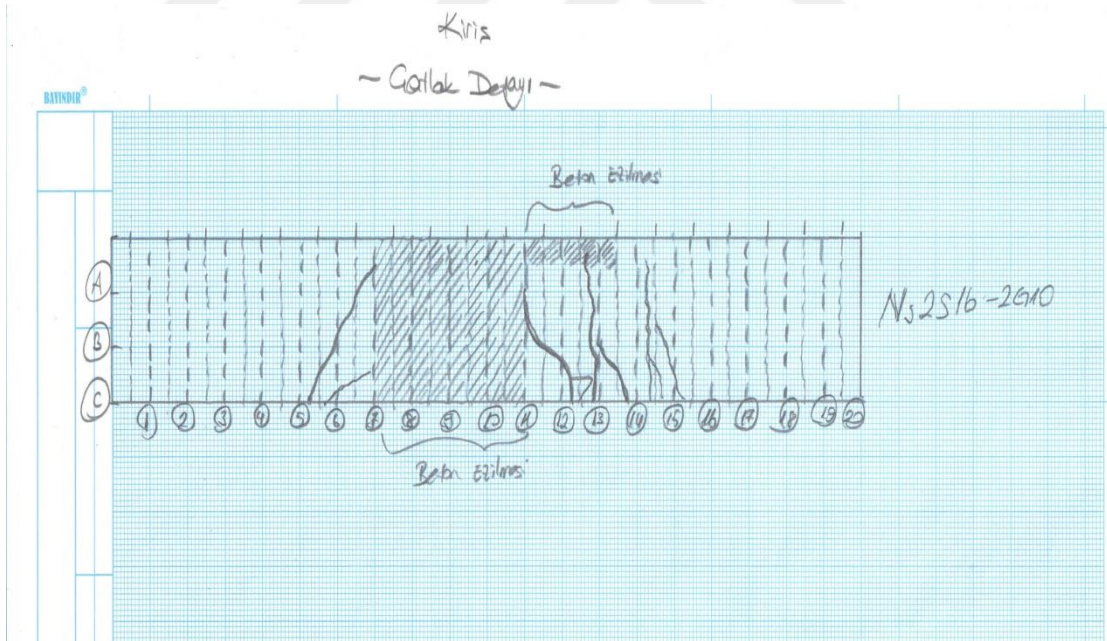
beton kabarması artmıştır. Bu yük değerinde ölçülen çatlak genişliği 3,5 mm'dir. Yük değeri 182 kN ve deplasman değeri 52.6 mm gösterdiğinde ölçülen çatlak genişliği 4 mm'dir. Yük değeri 113 kN ve deplasman değeri 109,6 mm gösterdiğinde oluşan çatlak genişliği 7 mm'ye ulaşmıştır. Deney düzeneğindeki kiriş daha fazla yük almadığı için deney güvenliği için krikodaki yük yavaşça boşaltılarak deneye son verilmiştir.



Şekil 2.18. (Ns2S16-2G10) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu



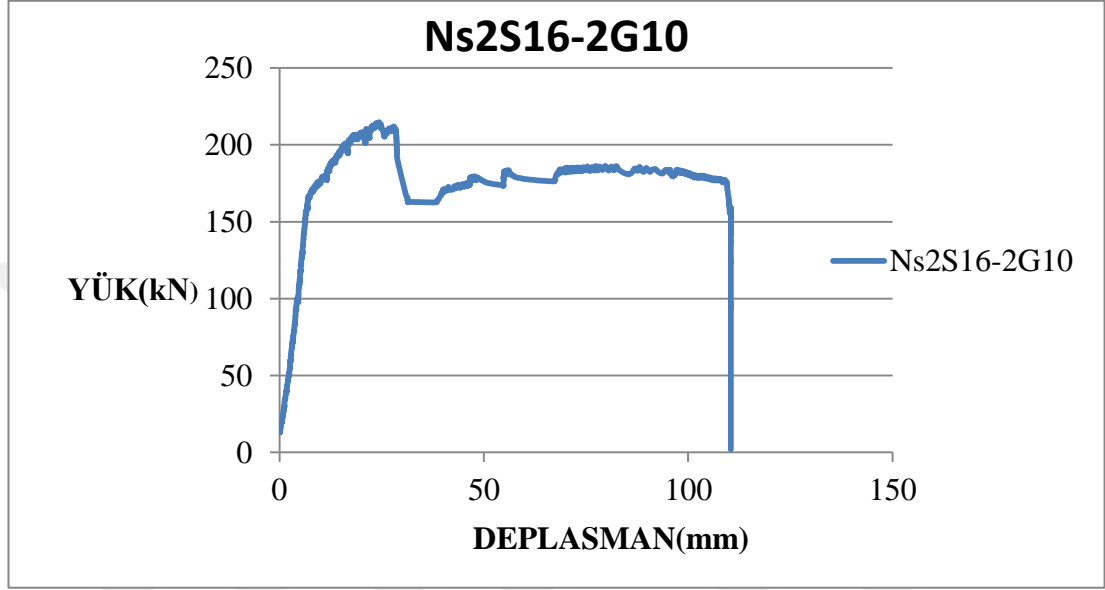
Şekil 2.19. (Ns2S16-2G10) Kirişi Çatlak Gelişimi



Şekil 2.20. (Ns2S16-2G10) Kirişi Çatlak Detay Çizimi

2.5.4 (Ns2S16-2G10) Numunesi Yük- Deplasman İlişkisi ve Grafiği

Deney başlangıcından, deney sonuna kadar kaydedilen yük-deplasman değeri ile oluşturulan grafik Şekil 2.21 de verilmiştir.



Şekil 2.21. (Ns2S16-2G10) Kirişi Yük- Deplasman Grafiği

2.5.5 (Nd2S16-2G13) Numunesi Deneyi

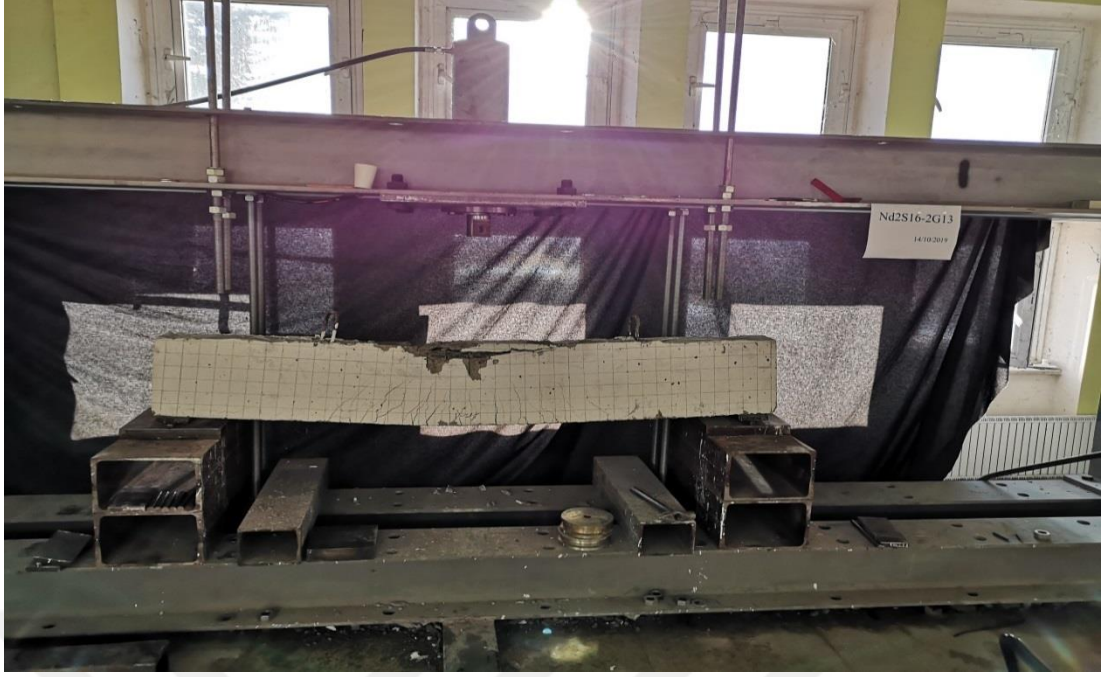
Basınç bölgesinde 2 adet 10 mm çapında çelik donatı, çekme bölgesinde 2 adet 13 mm çapında GFRP donatı ve 2 adet 16 mm çapında çelik donatı bulunan, 5 mm çapındaki çelik etriyelerin kiriş boyunca 7,5 cm ara ile yerleştirildiği, normal dayanımlı betonun kullanıldığı kiriş elemanı; dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur.

Kiriş hidrolik kriko ile yüklemeye başlanmış, yük ve deplasman verileri kaydedilmiş olup, deney esnasındaki değişimler gözlenmiştir. Yük değeri 0,43 kN, deplasman 0,03 mm olarak kaydedilmiştir. Yük değeri 87 kN, deplasman 4,94 mm gösterdiğinde sol mesnete yakın 2 adet kesme çatlak oluşmuştur. Yük değeri 120 kN, deplasman 6,72 mm gösterdiğinde 12 adet eğilme çatlak belirlenmiştir. En

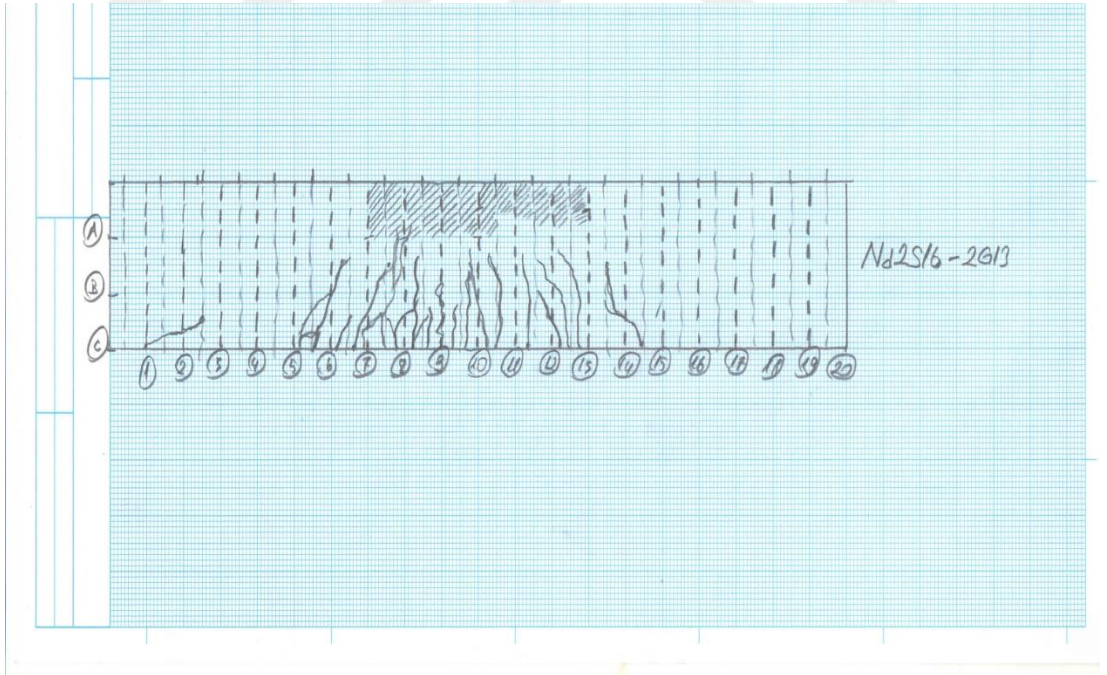
yakın eğilme çatlakları basınç yüzeyine 15 cm mesafededir. Çatlak genişliği 1 mm'nin altındadır. Yük değeri 180 kN, deplasman 13,27 mm olduğunda ölçülen çatlak genişliği 0,5 mm'dir. Yük değeri 200 kN, deplasman 24,84 mm olduğunda çatlak genişliği 1 mm'ye yaklaşmıştır. En yakın eğilme çatlakları basınç yüzeyine 8 cm uzaklıktadır. Bu aşamada 14 adet eğilme çatlakları gözlenmiştir. İki yük noktası arasında kabuk betonunda kabarmalar belirginleşmiştir. Donatı kopmasına bağlı olarak yük değeri 227 kN 'dan 195 kN 'a düştüğü sırada deplasman 45 mm ölçülmüştür. Ayrıca bu yük değerinde ölçülen çatlak genişliği 1,5 mm'dir. Yine donatı kopması sonucu 203 kN 'dan 168 kN 'a düştüğünde deplasman 72,92 mm gözlenmiştir. Bu yük değerinde ölçülen çatlak genişliği 4 mm'dir. Bu değerden sonra LVDT ölçümü almadığı için resetleme yapılmıştır. Tekrar yükleme yapıldığında LVDT doğru okuma yapamayacağı görüldüğü için yük değeri 169,4 kN, deplasman 118,27 mm olduğunda deney güvenliği için krikodaki yük yavaşça boşaltılarak deneye son verilmiştir.



Şekil 2.22. (Nd2S16-2G13) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu



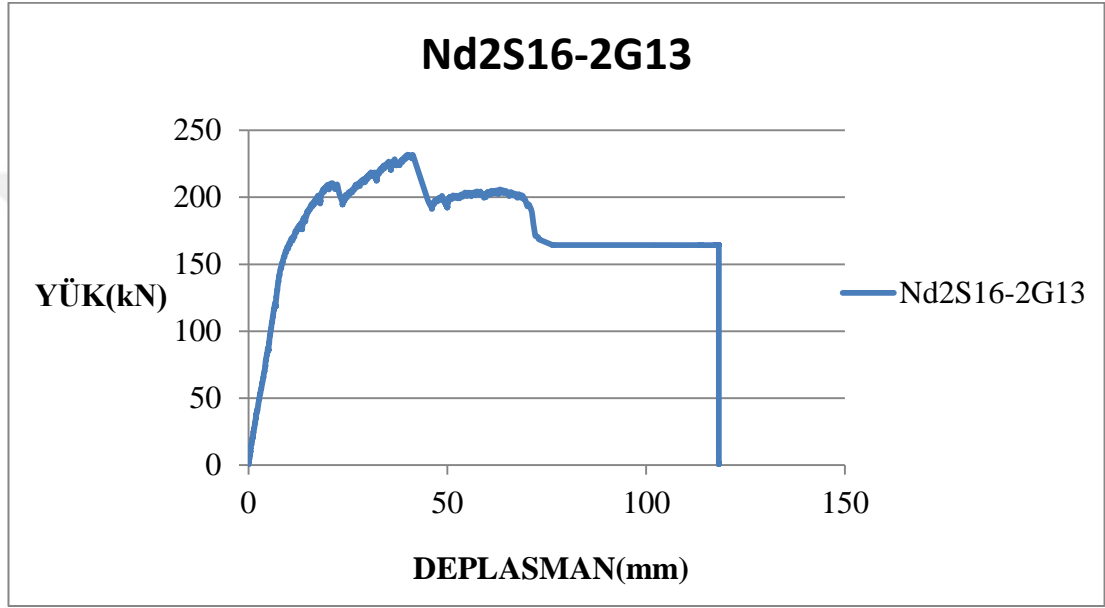
Şekil 2.23. (Nd2S16-2G13) Çatlak Gelişimi



Şekil 2.24. (Nd2S16-2G13) Çatlak Detay Çizimi

2.5.6 (Nd2S16-2G13) Numunesi Yük- Deplasman İlişkisi ve Grafiği

Deney yüklemeye başladıktan, deney sonuna kadar kaydedilen yük-deplasman değeri ile oluşturulan grafik Şekil 2.25 de verilmiştir.



Şekil 2.25. (Nd2S16-2G13) Kirişi Yük- Deplasman Grafiği

2.5.7. (Nd5S10-2G13) Numunesi Deneyi

Basınç bölgesinde 2 adet 10 mm çapında çelik donatı, çekme bölgesinde 2 adet 13 mm çapında GFRP donatı ve 5 adet 10 mm çapında çelik donatı bulunan, 5 mm çapındaki çelik etriyelerin kiriş boyunca 7,5 cm ara ile yerleştirildiği, normal dayanımlı betonun kullanıldığı kiriş elemanı; dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur.

Kiriş hidrolik kriko ile yüklenmeye başlanmış, yük ve deplasman verileri kaydedilmiş olup, deney esnasındaki değişimler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Yük 3 kN iken deplasman 0,025 mm ölçülmüştür. Yük 60,6 kN ve deplasman 3,14

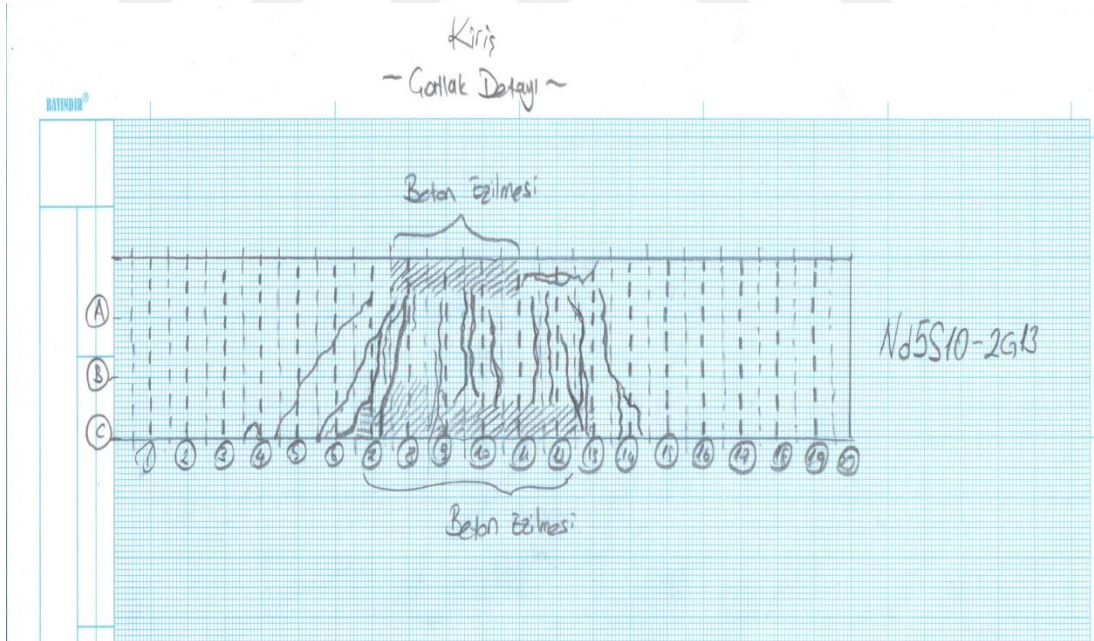
mm'yi gösterdiğinde 3 eğilme çatlak oluşmuştur. Ölçülen çatlak genişliği ise 1 mm'nin altındadır. Yük 100 kN ve deplasman 5,46 mm olduğunda en yakın eğilme çatlak basınç yüzeyine 12 cm mesafededir. 10 adet eğilme çatlak ve sol mesnete yakın 2 adet kesme çatlak oluşmuştur. Ölçülen çatlak genişliği halen 1 mm'nin altındadır. Yük 122 kN ve deplasman 7 mm olduğunda sol mesnete yakın kesme çatlak basınç yüzeyine 5 cm mesafededir. 12 adet eğilme çatlak oluşmuştur. Ölçülen çatlak genişliği 0,5 mm'dir. Yük 180 kN ve deplasman 19,53 mm olduğunda basınç bölgesindeki betonda kabarmalar olmuştur. Ölçülen çatlak genişliği 1 mm'dir. Yük 210 kN 'dan 120 kN 'a düştüğü sırada deplasman 48 mm'dir. Bu anda çekme yüzündeki kabuk beton ezilerek dökülmüştür Ölçülen çatlak genişliği 2,5 mm'dir. Donatı kopmasından dolayı yük 165 kN 'dan 114 kN 'a düştüğünde oluşan deplasman 88 mm'dir. Ölçülen çatlak genişliği 4 mm'dir. Yük 144 kN ve deplasman 105,34 mm olduğunda ölçülen çatlak genişliği 5 mm'dir. Deney güvenliği için krikodaki yük yavaş yavaş boşaltılarak deneye son verilmiştir.



Şekil 2.26. (Nd5S10-2G13) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu



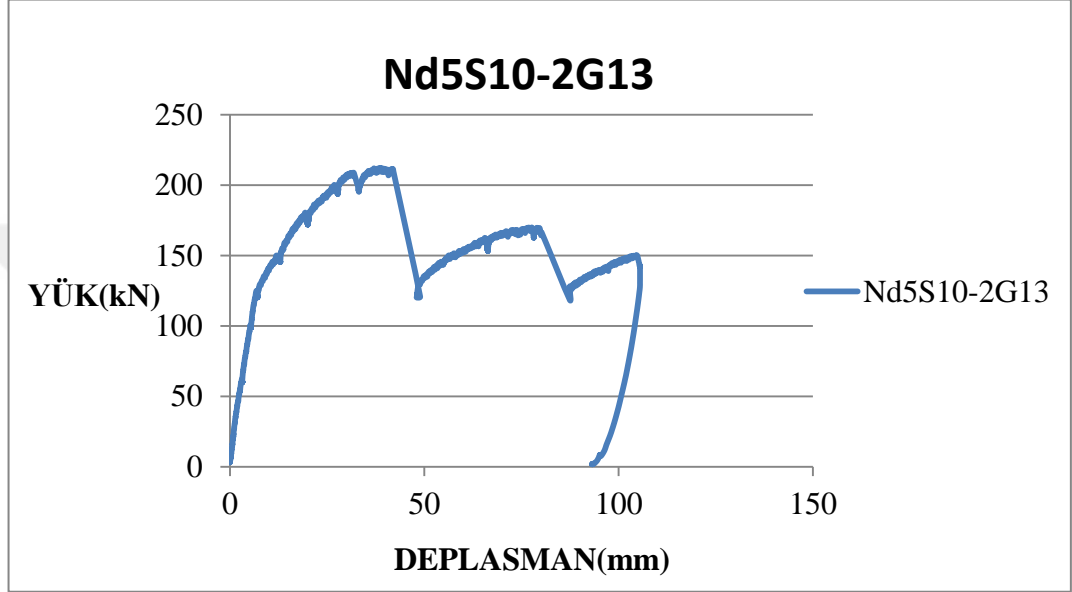
Şekil 2.27. (Nd5S10-2G13) Çatlak Gelişimi



Şekil 2.28. (Nd5S10-2G13) Çatlak Detay Çizimi

2.5.8. (Nd5S10-2G13) Numunesi Yük- Deplasman İlişkisi ve Grafiği

Deney başlangıcından, deney sonuna kadar aktarılan yük-deplasman değerleri ile grafik çizildiğinde, Şekil 2.29 daki grafik elde edilmiştir.



Şekil 2.29. (Nd5S16-2G13) Kirişi Yük- Deplasman Grafiği

2.5.9. (Nd5S10-2G10) Numunesi Deneyi

Basınç bölgesinde 2 adet 10 mm çapında çelik donatı, çekme bölgesinde 2 adet 10 mm çapında GFRP donatı ve 5 adet 10 mm çapında çelik donatı bulunan, 5 mm çapındaki çelik etriyelerin kiriş boyunca 7,5 cm ara ile yerleştirildiği, normal dayanımlı betonun kullanıldığı kiriş elemanı; dört noktalı eğilme testine tabi tutulmuştur.

Kiriş hidrolik kriko ile yüklenmeye başlanmış, yük ve deplasman verileri kaydedilmiş olup, deney esnasındaki değişimler bilgisayara aktarılmıştır. Yük 4,35 kN iken deplasman 0,05 mm olarak kaydedilmiştir. Yük 60 kN ve deplasman 1,95 mm olduğunda 6 adet eğilme çatlakları oluşmuştur. Bu çatlaklardan en yakını basınç

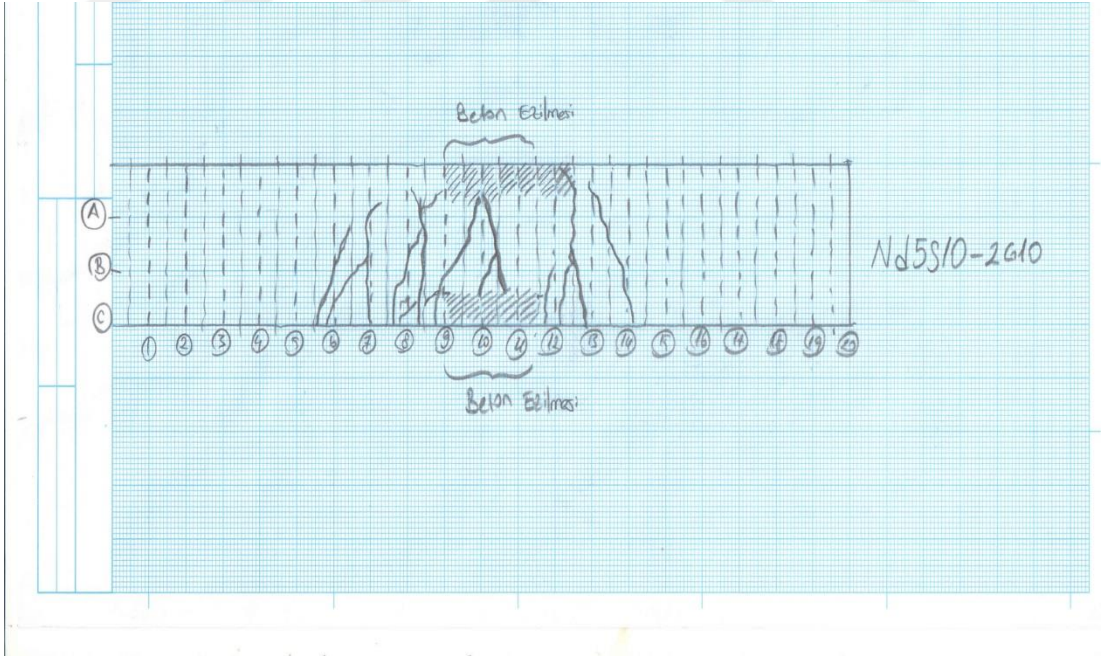
yüzeyine yaklaşık olarak 10 cm mesafededir. Ölçülen çatlak genişliği 1 mm'nin altındadır. Yük 100 kN ve deplasman 3,40 mm olduğunda 9 adet eğilme çatlağı ve sağ mesnete yakın 1 adet kesme çatlağı oluşmuştur. Ölçülen çatlak genişliği halen 1 mm'nin altındadır. Yük 180 kN ve deplasman 8,24 mm olduğunda ölçülen çatlak genişliği 0,5 mm'dir. Yük 191 kN ve deplasman 11,7 mm olduğunda ölçülen çatlak genişliği 1,5 mm'dir. Yük değeri 203 kN 'dan 197 kN 'a düştüğünde deplasman değeri 17,86 mm'dir. İki yük noktası arasındaki kabuk betonunda kabarmalar oluşmuştur. Ölçülen çatlak genişliği 2,5 mm'dir. Yük değeri 213 kN 'dan 192 kN 'a düştüğünde deplasman 33,10 mm'dir. Ölçülen çatlak genişliği 3,5 mm'dir. Yük değeri 200 kN 'dan 180 kN 'a düştüğünde deplasman 38,4 mm'dir. Ölçülen çatlak genişliği 4,5 mm'dir. Yük 192 kN ve deplasman 50,3 mm'dir. Ölçülen çatlak genişliği 6 mm'dir. Yük 180 kN ve deplasman 55,4 mm'yi gösterdiğinde krikodaki yük yavaşça boşaltılarak deneye son verilmiştir.



Şekil 2.30. (Nd5S10-2G10) Kirişi Yükleme Sonrası Durumu



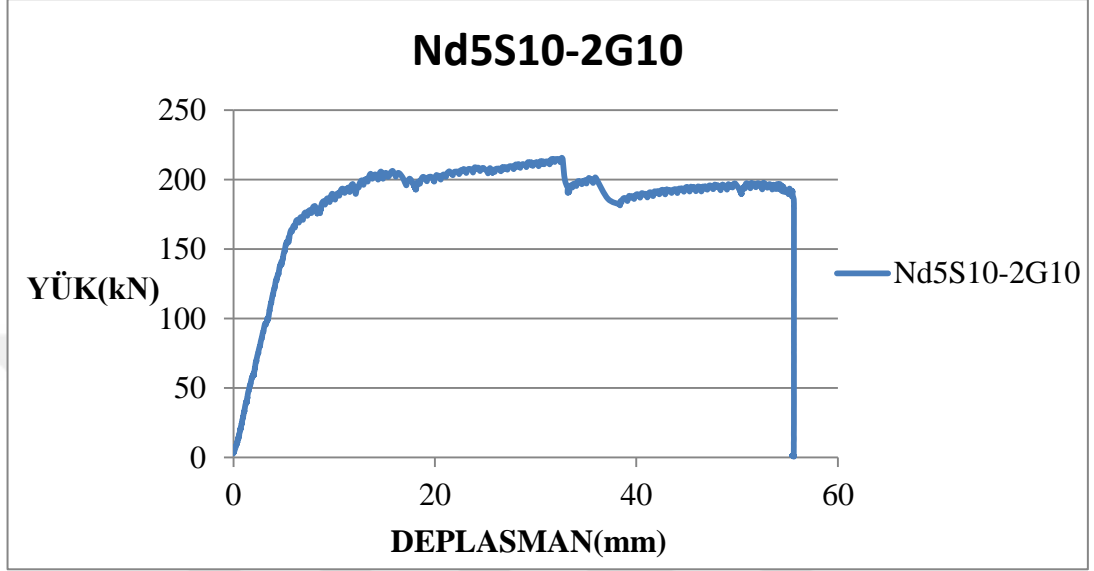
Şekil 2.31. (Nd5S10-2G10) Çatlak Gelişimi



Şekil 2.32. (Nd5S10-2G10) Çatlak Detay Çizimi

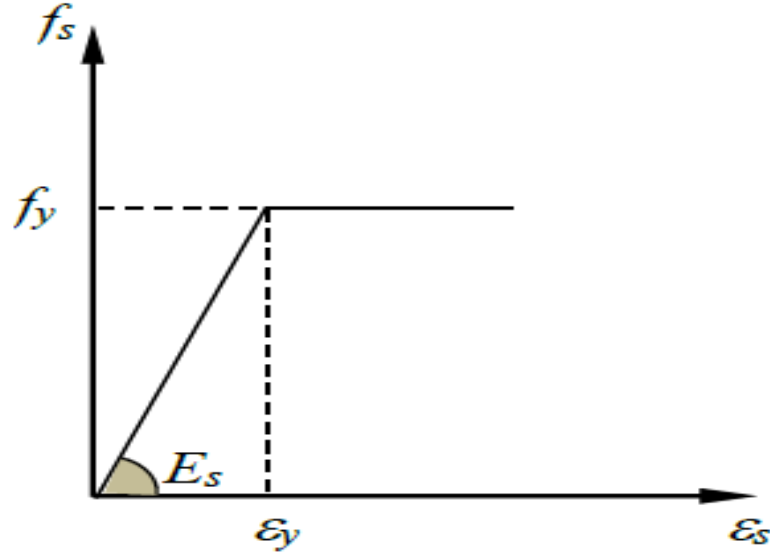
2.5.10 (Nd5S10-2G10) Numunesi Yük- Deplasman İlişkisi ve Grafiği

Deney başlangıcından, deney sonuna kadar aktarılan yük-deplasman değerleri ile grafik çizildiğinde, Şekil 2.33'deki grafik elde edilmiştir.



Şekil 2.33. (Nd5S10-2G10) Kirişi Yük- Deplasman Grafiği

3. TEORİK ANALİZ



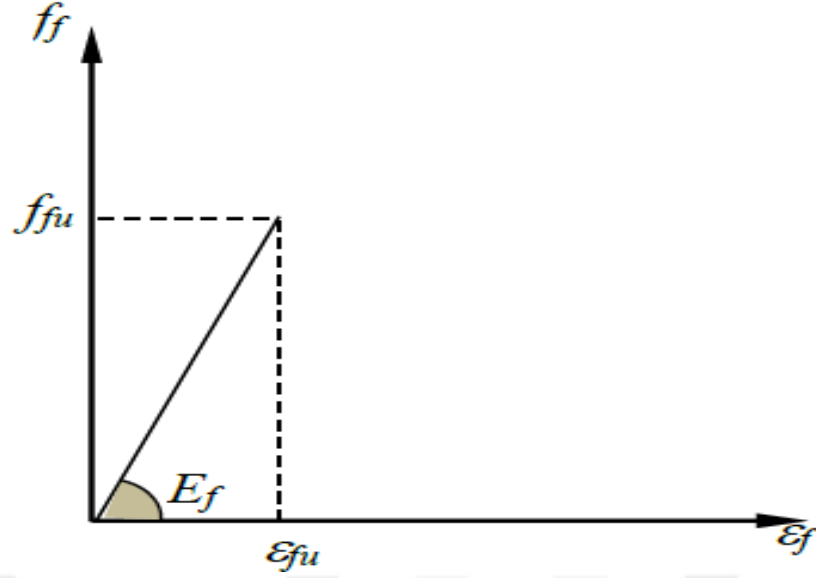
Şekil 3.1. Donatı Çeliği Gerilme Birim Şekil Değiştirme Grafiği

Çeliğin gerilme birim şekil değiştirme ilişkisi için elasto-plastik malzeme modeli kullanılmış ve aşağıdaki eşitlik ile tanımlanmıştır.

$$f_s = \epsilon_s E_s \quad \epsilon_s < \epsilon_{sy} \quad (1)$$

$$f_s = f_y \quad \epsilon_s \geq \epsilon_{sy} \quad (2)$$

FRP donatının gerilme birim şekil değiştirme ilişkisindeki eşitlikte f_f FRP donatıdaki gerilmeyi, ϵ_f birim boy değişimini, f_{tu} ile kopma dayanımını gösterilmektedir.



Şekil 3.2. FRP Gerilme Birim Şekil Değişirme Grafiği

Moment- Eğrilik ilişkisinin ve taşıma gücü kapasitenin hesaplanmasında kullanılan yöntemde basınç bölgesindeki beton 50 şeride ayrılmıştır ve Hognestad Beton modeli kullanılarak her bir şeridin ağırlık merkezine karşılık gelen birim şekil değişirme ve gerilmeler hesaplanmıştır.

Yöntem 6 adımda şu şekilde sıralanabilir:

- 1- Basınç bölgesindeki beton 50 tane parçaya bölünmüştür. (Bu sayı artırılıp azaltılabilir.)
- 2- Basınç bölgesinde en dış lifteki beton için birim kısalma değeri seçilmiştir.
- 3- Tarafsız eksenin derinliği için bir kabul yapılmıştır ve yatay kuvvet dengesinin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir.
- 4- Yatay kuvvet dengesi sağlandıktan sonra basınç ve çekme bölgesindeki donatı seviyelerindeki birim boy değişimleri ve kuvvetleri hesaplanmıştır.
- 5- Moment ve eğrilik hesaplanmıştır
- 6- Beton birim kısalması için yeni bir değer seçilerek 2. ve 5. adımlar tekrarlanmıştır.

Basınç bölgesindeki birim kısalma 0.003 değerine karşılık gelen moment taşıma kapasitesi (M) ve buna karşı gelen eğrilik (K) hesaplandıktan sonra etkili eğilme rijitliği değeri EI_{eff} hesaplanmıştır.

$$EI_{eff} = \frac{M}{K} \quad (3)$$

Her bir momente karşılık gelen yük değeri hesaplanmıştır. Denklemden a mesnet ile uygulanan yük arasındaki uzaklığı göstermektedir.

$$P = \frac{2M}{a} \quad (4)$$

Eğilme rijitliği ve yük değeri hesaplandıktan sonra her bir yük seviyesine karşılık gelen deplasman değeri aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$\delta = \frac{PL}{48EI_{eff}} (4L^2 - 3a^2) \quad (5)$$

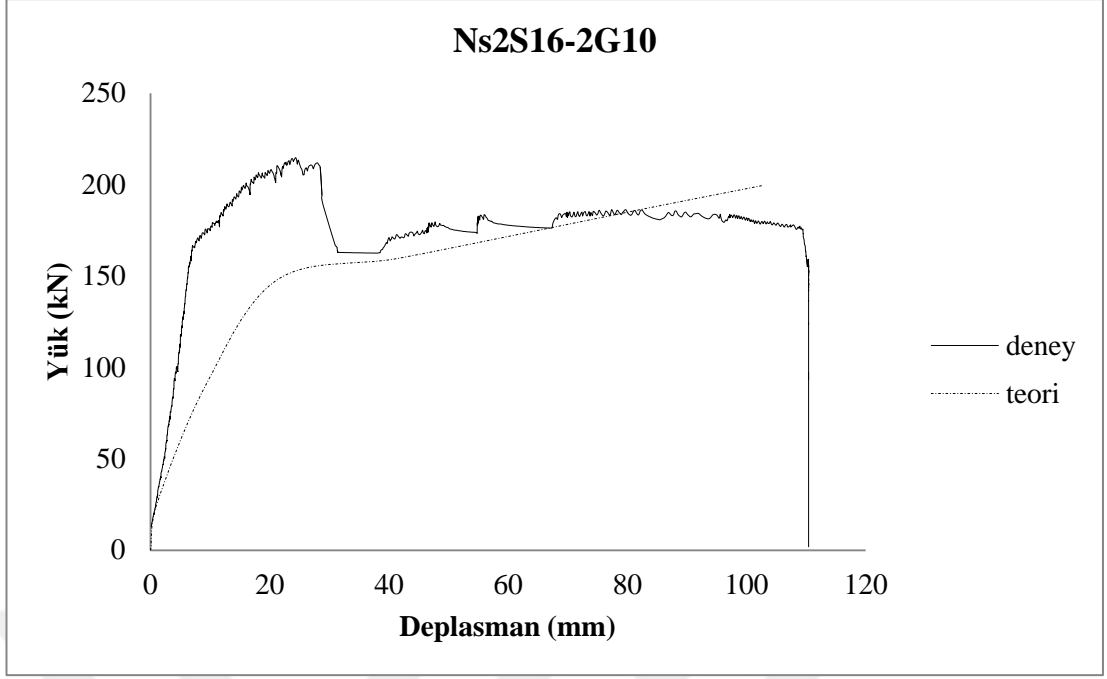
Çalışmada kullanılan deney elemanlarının donatı oranları Çizelge 3.1. de gösterilmiştir. Hibrit kirişlerde etkili donatı oranı, çelik donatı oranının (ρ_s) FRP donatı oranına dönüştürülmesi ile elde edilmiştir. Hibrit kirişler etkili donatı oranı (ρ_e), dengeli donatı oranından (ρ_{fb}) büyük olacak şekilde donatılandırılmıştır.

$$\rho_e = \rho_s \frac{f_y}{f_{fu}} + \rho_f \quad (6)$$

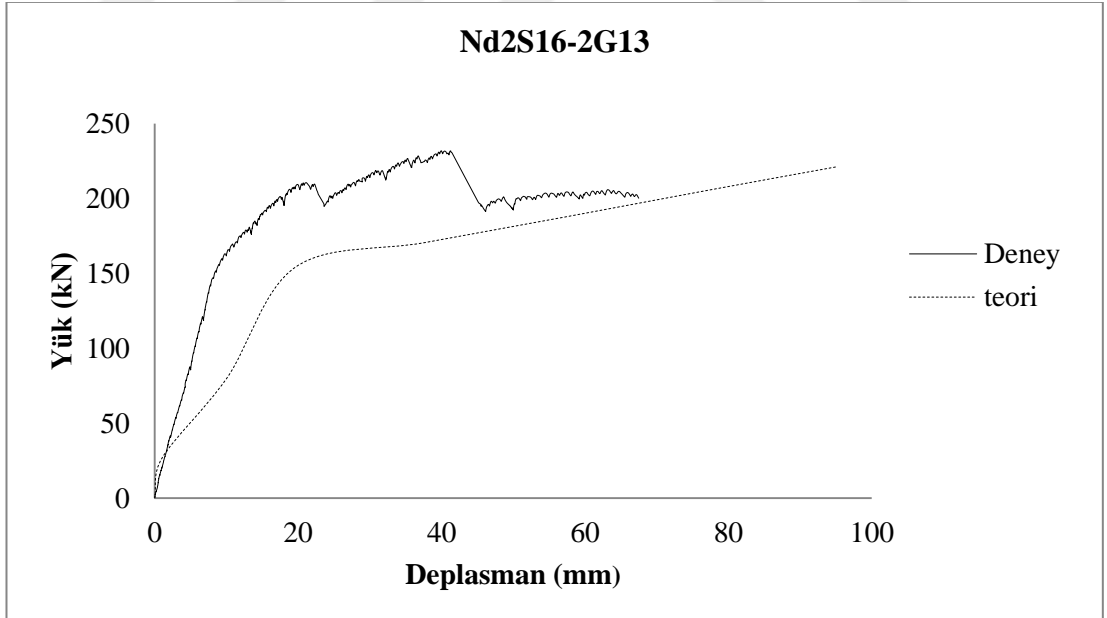
$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f_c}{f_{fu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (7)$$

Eleman	n_s	n_f	\emptyset_s	\emptyset_f	$A_s(\text{mm}^2)$	$A_f(\text{mm}^2)$	$\rho_s(\%)$	$\rho_f(\%)$	$\rho_e(\%)$	$\rho_{fb}(\%)$	
Ns2S16-2G10	2	2	16	10	402	157	0.957	0.374	1.151	1.062	Denge Üstü
Nd5S10-2G10	5	2	10	10	392.7	157	1.047	0.374	1.223	1.062	Denge Üstü
Nd2S16-2G13	2	2	16	13	402	265.5	1.072	0.632	1.502	1.062	Denge Üstü
Ns2S16-2G13	2	2	16	13	402	265.5	0.957	0.632	1.409	1.062	Denge Üstü
Nd5S10-2G13	5	2	10	13	392.7	265.5	1.047	0.632	1.481	1.062	Denge Üstü

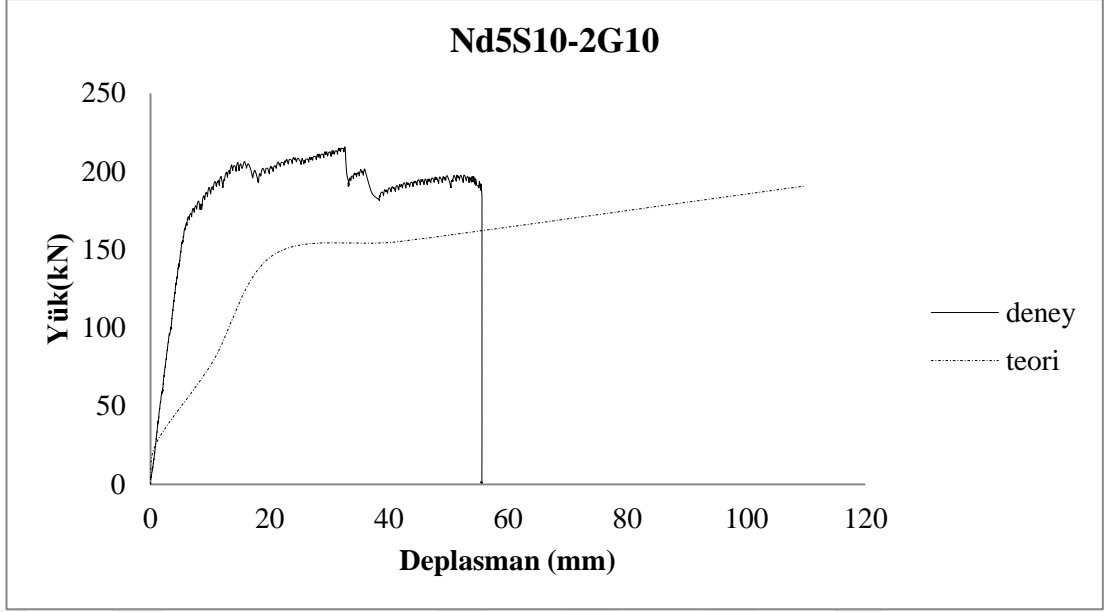
Çizelge 3.1. Deney Kirişlerin Donatı Alanları, Dengeli Donatı Oranı, Efektif Donatı Oranı



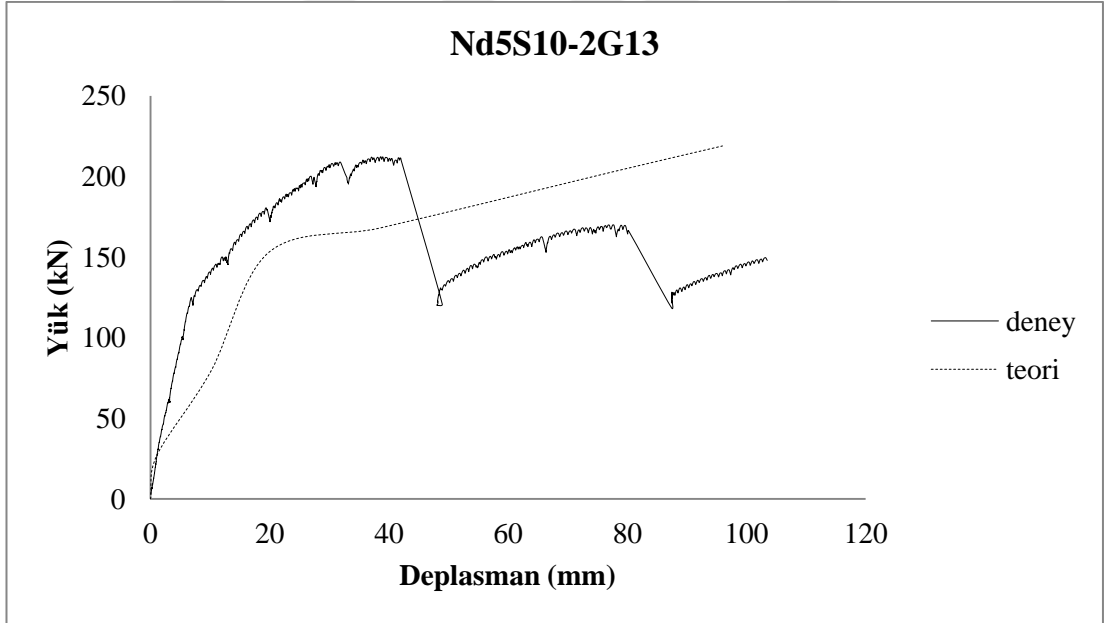
Şekil 3.3. (Ns2S16-2G10) Kirişinin Deneysel ve Teorik Grafiği



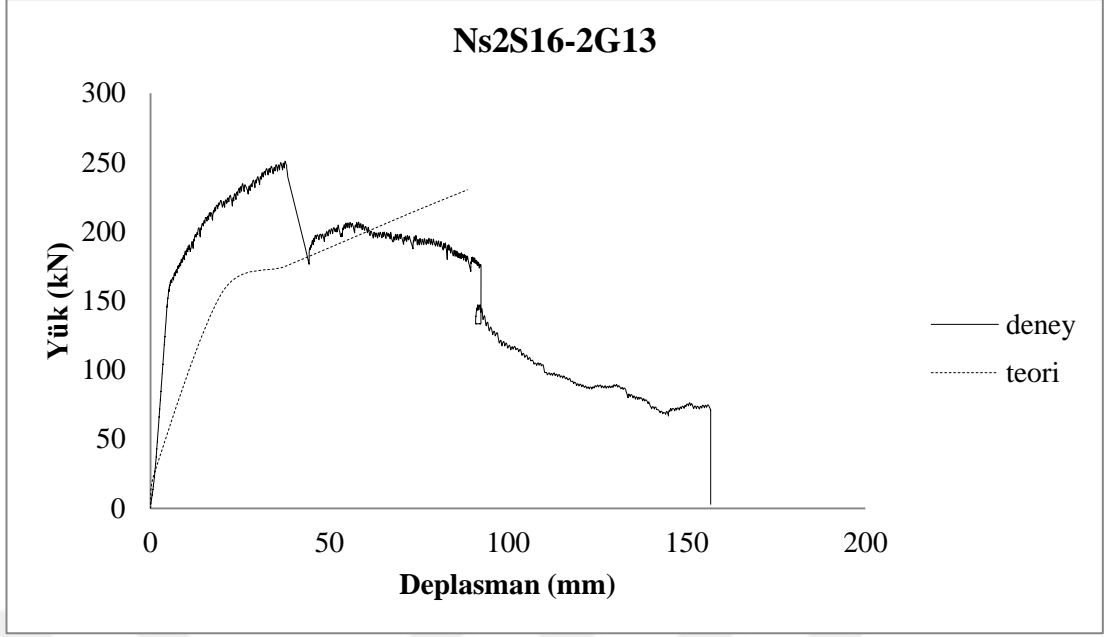
Şekil 3.4. (Nd2S16-2G13) Kirişinin Deneysel ve Teorik Grafiği



Şekil 3.5. (Nd5S10-2G10) Kirişinin Deneysel ve Teorik Grafiği

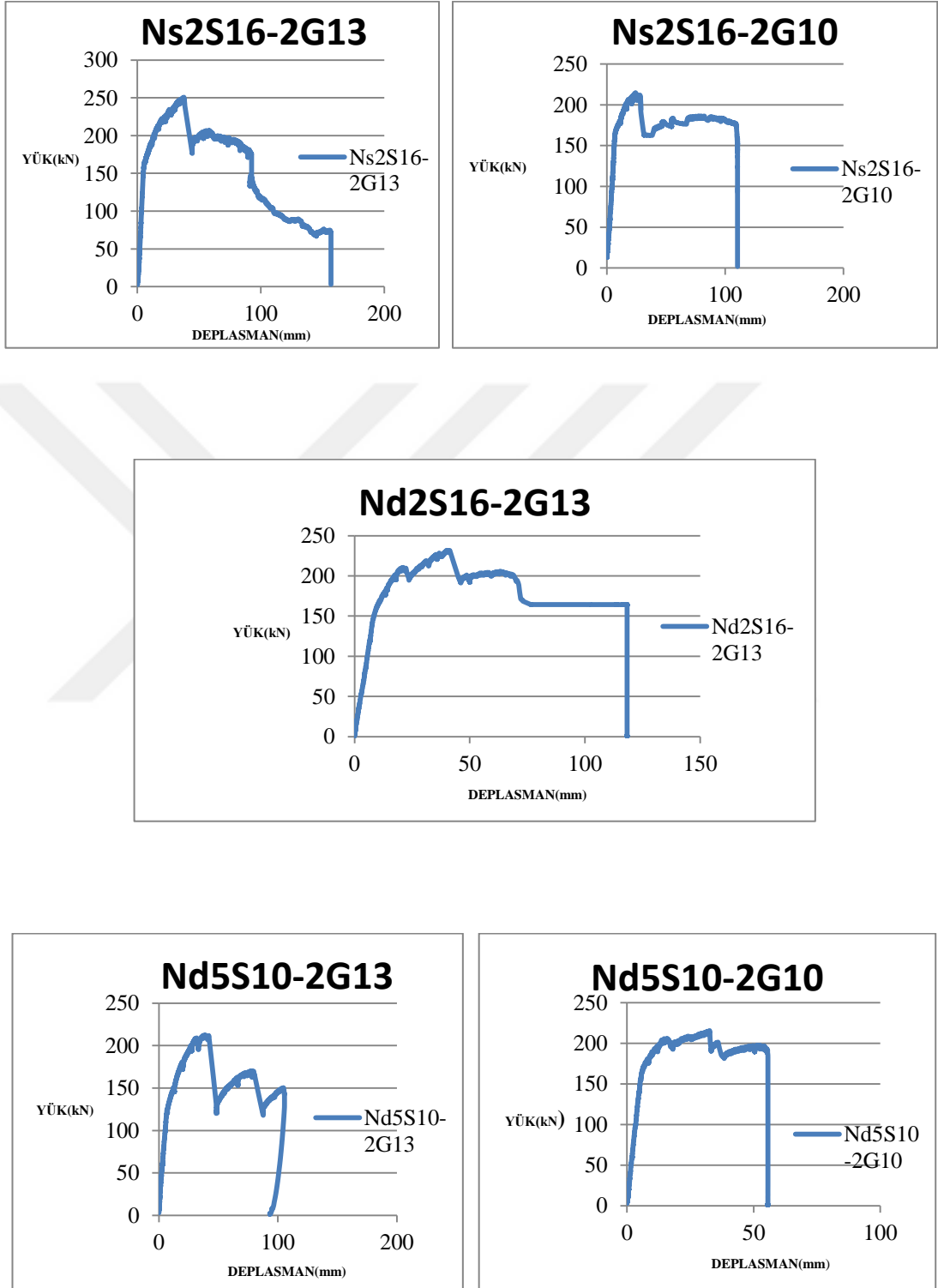


Şekil 3.6. (Nd5S10-2G13) Kirişinin Deneysel ve Teorik Grafiği

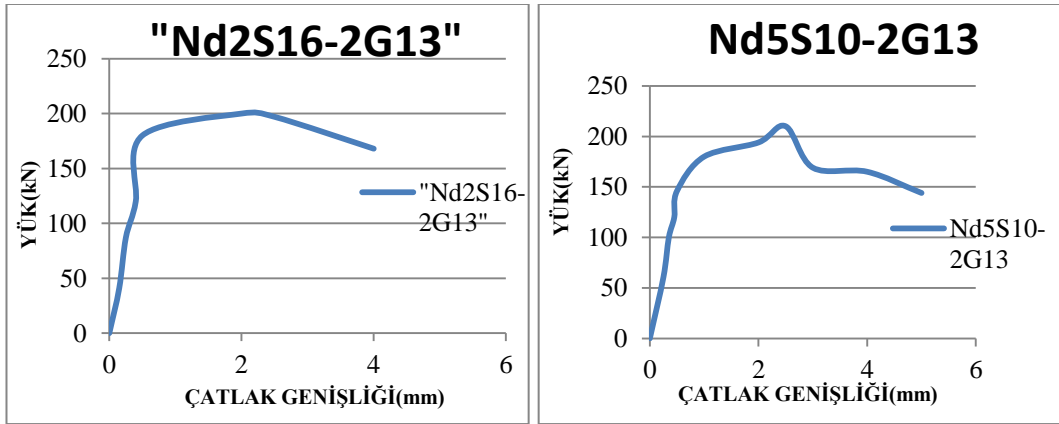
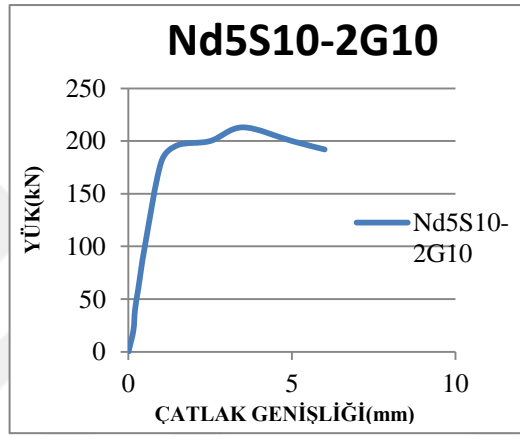
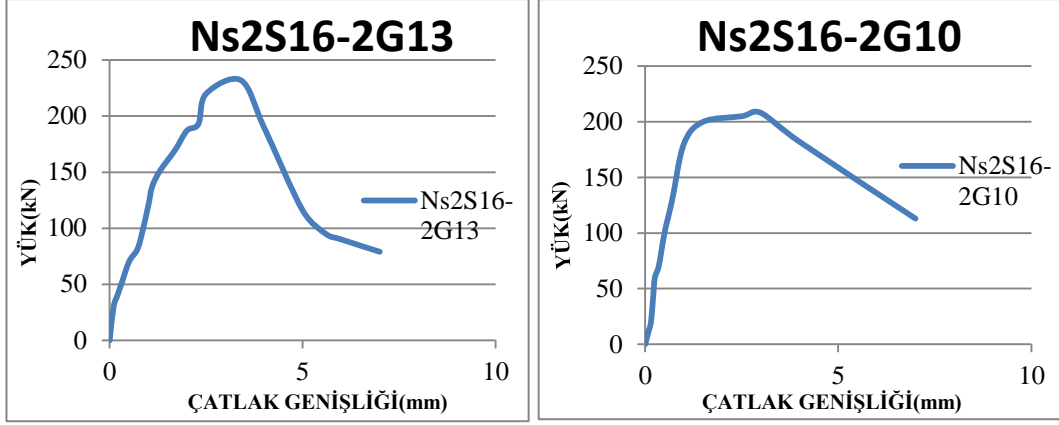


Şekil 3.7. (Ns2S16-2G13) Kirişinin Deneysel ve Teorik Grafiği

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

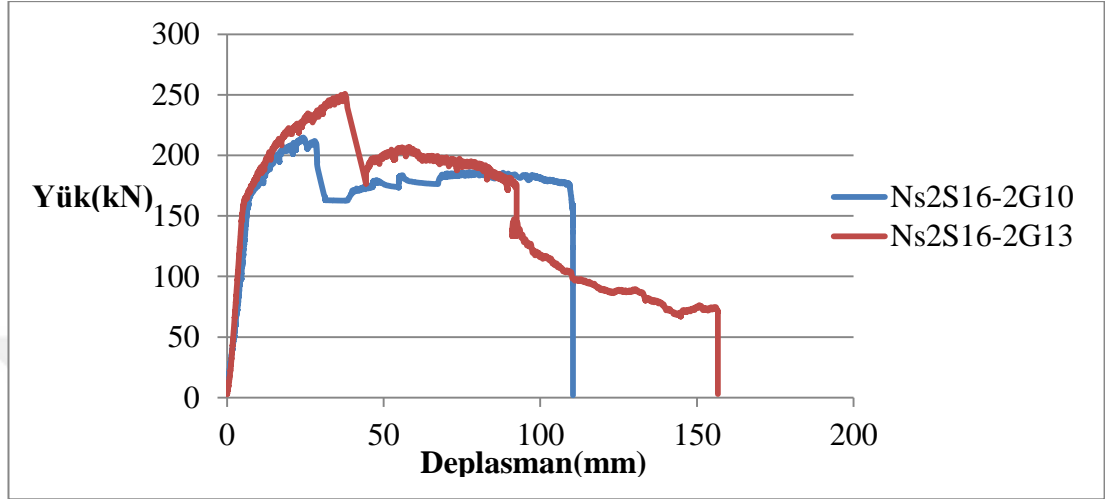


Şekil 4.1. DeneY Kirişlerinin Yük-Deplasman Grafikleri



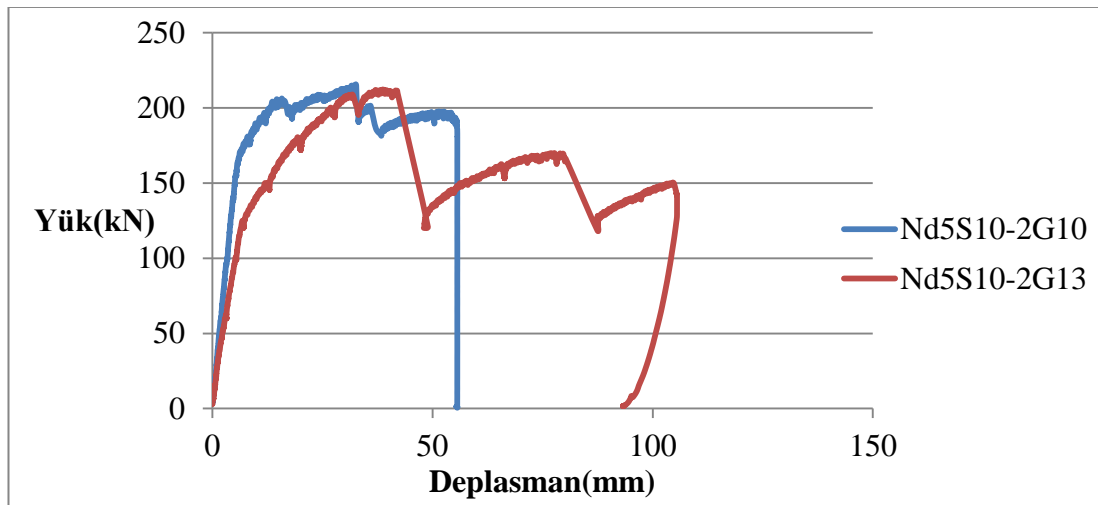
Şekil 4.2. Deneysel Kirişlerin Yük-Çatlak Genişliği Grafikleri

Deney elemanlarının yük- deplasman grafikleri ayrı ayrı incelendiğinde, cam elyaf donatıda kopmanın gerçekleşmesiyle yükte ani düşüş olduğu görülmüştür. Kirişler içindeki çelik donatılar yükün toparlanmasını sağlamakta ve yükün korunarak deplasman artışı sağlamaktadır. Kirişlerin karşılaştırmaları şöyledir:



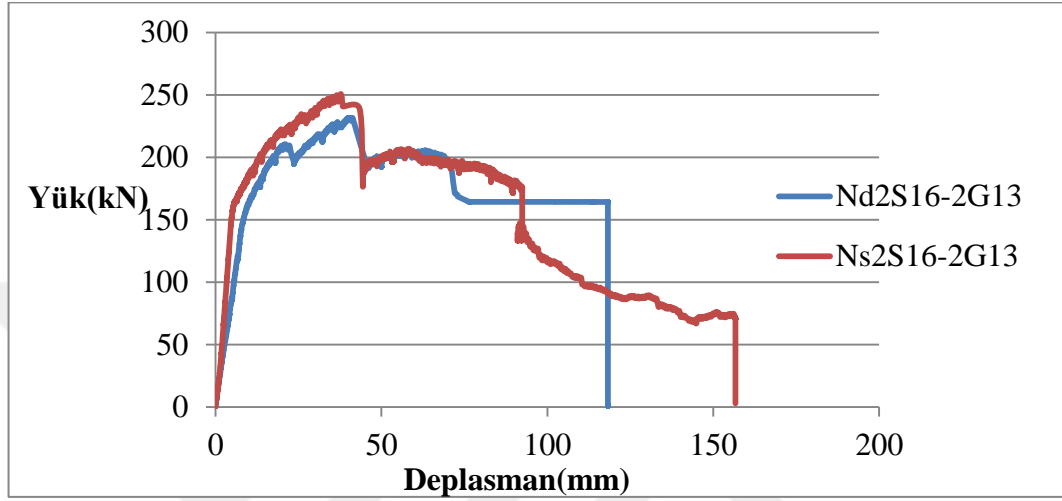
Şekil 4.3. (Ns2S16-2G10) ile (Ns2S16-2G13) Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri

Normal dayanımlı beton kullanılmış, çekme bölgesinde tek sırayla yerleştirilmiş, çelik donatı adeti ve çapı aynı ancak GFRP adeti aynı, çapı farklı kirişler karşılaştırıldığında: GFRP donatı çapı arttıkça yük taşıma kapasitesinde artış olduğu belirlenmiştir.



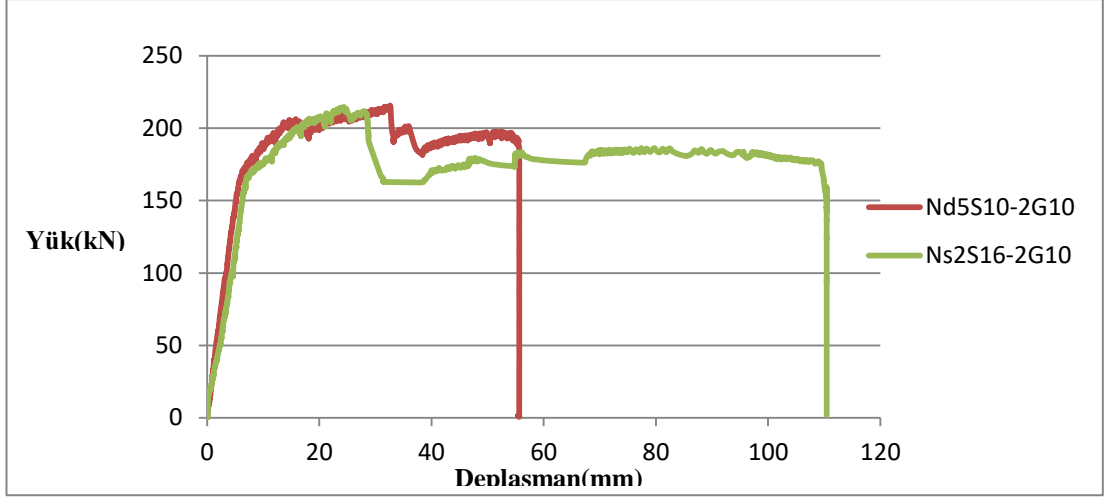
Şekil 4.4. (Nd5S10-2G13) ile (Nd5S10-2G10) Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri

Normal dayanımlı beton kullanılmış, çekme bölgesinde çift sırayla yerleştirilmiş, çelik donatı adeti ve çapı(Ø10) aynı ancak GFRP adeti aynı, çapı farklı kirişleri kıyasladığımızda: GFRP donatı çapı arttığında yük taşıma kapasitesinde belirgin bir fark gözlenmemiştir.



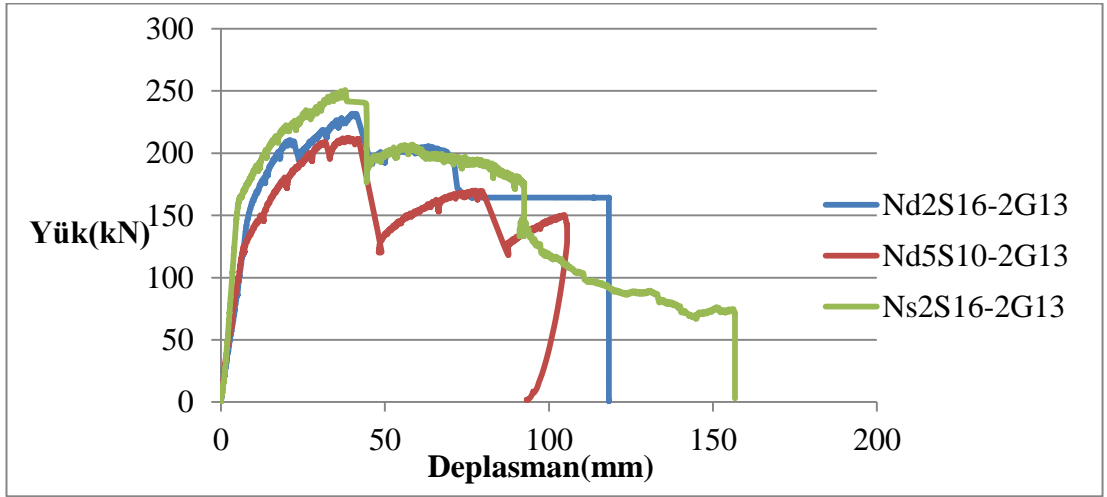
Şekil 4.5. (Nd2S16-2G13) ile (Ns2S16-2G13) Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri

Normal dayanımlı beton kullanılmış, çekme bölgesinde tek veya çift sırayla yerleştirilmiş, çelik ve GFRP donatı çap ve adetinin aynı olduğu kirişler kıyaslandığında: Donatıların tek sırayla yerleştirilmesi durumundaki kirişin yük taşıma kapasitesi ve deplasman değerinde bir miktar artış olduğu görülmektedir. Bu durumun tek sıra yerleştirilmiş donatılarda moment kolunun büyümesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.6. (Nd5S10-2G10) ve (Ns2S16-2G10) Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri

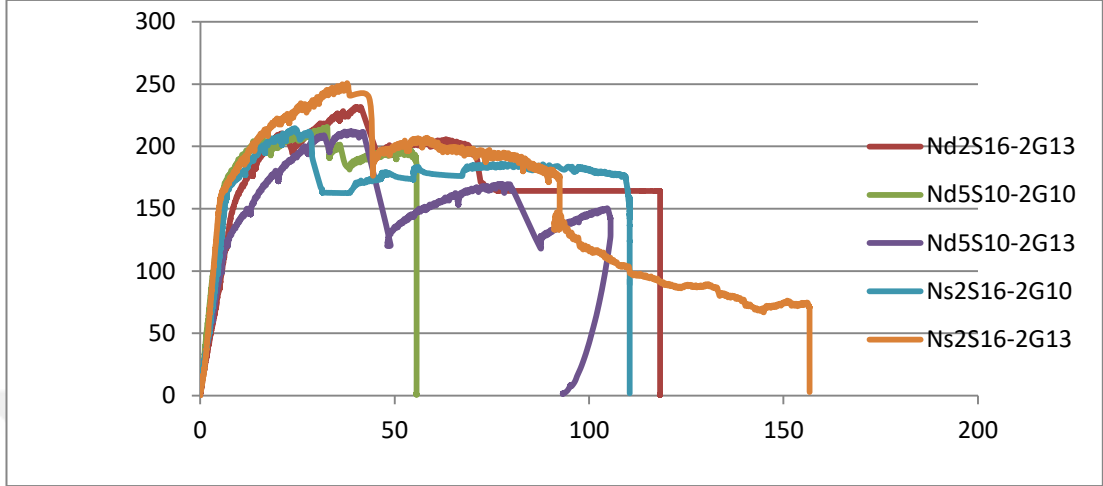
Normal dayanımlı beton kullanılmış, çekme bölgesinde tek veya çift sırayla yerleştirilmiş, aynı GFRP donatı çapı ve adetine sahip ancak farklı çelik donatı çapı ve adetine sahip kirişler kıyaslandığında: Çelik donatı farklı çap, adet ve yerleşim yeri olduğunda benzer yük taşıma kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.7. (Nd2S16-2G13),(Nd5S10-2G13) ve (Ns2S16-2G13) Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri

Normal dayanımlı beton kullanılmış, çekme bölgesinde tek veya çift sırayla yerleştirilmiş, aynı GFRP donatı çapı(Ø13) ve adetine sahip ancak farklı çelik donatı

apı ve adetine sahip kirişler kıyaslandığında: elik donatı farklı çap, adet ve yerleşim yeri olduğunda çapı buyk olan ve tek sırayla düzenlenmiş olan kirişin taşıma yk kapasitesinin daha büyük olduğu gözlenmiştir.



şekil 4.8. Tüm Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri

Normal dayanımlı beton kullanılmış, çekme bölgesinde tek veya çift sırayla yerleştirilmiş, farklı adet ve çapta olan GFRP ve elik donatılardan oluşan tüm kirişlerin yük-deplasman ilişkileri şekil 4.8 de topluca sunulmuştur.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada normal dayanımlı GFRP (cam elyaf) ve çelik donatı kullanılan hibrit kirişlerde donatı sıralamasının eğilme davranışı ve çatlak gelişimi üzerine etkileri araştırılmıştır. Donatılar tek sıra ve çift sıra olarak düzenlenmiştir. Çelik donatı alanları yaklaşık aynı olacak şekilde tasarlanmıştır Çalışmada elde edilen sonuçlar şöyledir:

- Tüm deney elemanları denge üstü donatı oranındadır. Elemanlarda önce basınç bölgesindeki beton ezilmiş, ardından cam donatılarda kopma gerçekleşmiştir.
- Cam donatıların kopmasıyla yükte düşmeler olmuştur Ancak çelik donatılar kirisin yük taşımaya devam etmesini sağlamıştır.
- Donatıların tek sıra yerleştirilmesi durumunda taşıma gücü momenti moment kolunun büyümesinden dolayı artmış, dolayısıyla tek sıralılarda çift sıralılara göre genelde bir miktar yük taşıma kapasitesinde artış belirlenmiştir.
- Deneyler sırasında yüke karşılık çatlak genişliği ölçümleri de mümkün olduğu kadar alınmaya çalışılmıştır. Çelik donatıların tek sıra olarak çekme yüzüne yakın yerleştirilmesi çatlak genişliklerini azaltma açısından olumlu katkı sağlamıştır.
- Elemanlarda çelik donatı alanları yaklaşık aynı tutturulmuştur. GFRP donatıları çapları değiştirilmiştir. Kirişlerin Yük deplasman grafiklerinde çıkış kollarında rijitlikler birbirlerine yakın çıkmıştır. GFRP donatı çapına bağlı olarak yük taşıma kapasitesinde çap arttıkça artışlar olmuştur.
- Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, yapılan deneylerle sınırlıdır. Daha genel sonuçlara ulaşabilmek amacıyla, ilave deneysel çalışmaların yapılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] ACI 440.1R-15 (Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber- Reinforced with Fiber- Reinforced Polymer (FRP) Bars)
- [2] Unsal I. , Dundar C. , Tanrikulu A. K. , Çekme Rijitleşmesinin FRP ve Çelik Donatılı Betonarme Kirişlerin Yük-Deplasman Davranışı Üzerindeki Etkisi, Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(1), 429-439, 2016.
- [3] Unsal I. , Tokgoz S. , Cagatay I. H. , Dundar C. , A study on load-deflection behavior of two-span continuous concrete beams reinforced with GFRP and steel bars, 629-637, 2017.
- [4] CULLAZOĞLU F. , FRP DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME VE KESME ETKİSİ ALTINDAKİ ANALİZİ, 1-103. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, 2014.
- [5] Yinghao I. , Yong Y. , Arrangement of hybrid rebars on flexural behavior of HSC beams, Composites: Part B 45, 22-31, 2013.
- [6] Qin R. , Zhou A. , Lau D. , Effect of reinforcement ratio on the flexural performance of hybrid FRP reinforced concrete beams, Composites Part B 108, 200-209, 2017.
- [7] Hawileh R.A. , Finite element modeling of reinforced concrete beams with a hybrid combination of steel and aramid reinforcement, Materials and Design 65, 831-839, 2015
- [8] Suzan A. A. M. , Hilal A. H. , Behavior of concrete beams reinforced with hybrid steel and FRP composites, Housing and Building National Research Center, HBRC Journal, 1-9, 2017.

- [9] Lau D. , Pam H. J. , Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams, Engineering Structure, JOURNAL OF COMPOSITES FOR CONSTRUCTION, 350-359, 2009.
- [10] Kara I. F. , Ashour A. F. , Koroglu M. A. , Flexural behavior of hybrid FRP/steel reinforced concrete beams, Composite Structures, 129, 111-121,2015.
- [11] Qu W. , Zhang X. , Huang H. , Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Hybrid (GFRP and Steel) Bars, 350-359, 2009.
- [12] Almusallam T. H. , Elsanadedy H. M. , Al-Salloum Y.A, Alsayed S. H. , Experimental and numerical investigation for the flexural strengthening of RC beams using near-surface mounted steel or GFRP bars, Construction and Building Materials 40, 145-161, 2013.
- [13] Khorasani A. M. M. , Esfahani M. R. , Sabzi J. , The effect of transverse and flexural reinforcement on deflection and cracking of GFRP bar reinforced concrete beams, Composites Part B 161, 530-546, 2019.
- [14] Maranan G.B. , Manalo A.C. , Benmokrane B. , Karunasena W. , Mendis P. , Nguyen T.Q. , Flexural behavior of geopolymer-concrete beams longitudinally reinforced with GFRP and steel hybrid reinforcements, Engineering Structures 182, 141-152, 2019.
- [15] Zhu H. , Cheng S. , Gao D. , Neaz M. S. , Li C. , Flexural behavior of partially fiber-reinforced high-strength concrete beams reinforced with FRP bars, Construction and Building Materials 161, 587-597, 2018.
- [16] M. W. Goldston , A. Remennikov , Zein Salah , M. Neaz Sheikh , Experimental investigations on the behavior of GFRP bar reinforced HSC and UHSC beams under static and impact loading, Structures 22, 109-123, 2019.

- [17] Tommaso D'Antino , Marco A. Pisani , Long-term behavior of GFRP reinforcing bars, Contents list available at ScienceDirect, Composite Structures 111283, 2019.
- [18] R.M. Reda , I.A. Sharaky , M. Ghanem , M.H. Seleem , H.E.M. Sallam , Flexural behavior of RC beams strengthened by NSM GFRP Bars having different end conditions , Composite Structures 147, 131-142, 2016.
- [19] Omar I. Abdelkarim , Ehab A. Ahmed , Hamdy M. Mohamed , Brahim Benmokrane , Flexural strenght and serviceability evaluation of concrete beams reinforced with deformed GFRP bars ,Engineering Structures 186, 282-296, 2019.
- [20] Sanfeng Liu , Yinzhi Zhou , Jiannan Zhou , Bei Zhang , Fengnian Jin , Qing Zheng , Huallin Fan , Blast responses of concrete beams reinforced with GFRP bars: ExperimentaI research and equivalent static analysis , Composite Structures 226 , 111271, 2019.
- [21] Viktor Gribniak , Arvydas Rimkus , Lluís Torres , David Hui, An experimental study on cracking and deformations of tensile concrete elements reinforced with multiple GFRP bars, Composite Structures, 477-485, 2018.
- [22] Patrícia Escórcio, Paulo. M. França, Experimental study of a rehabilitation solution htah uses GFRP bars to replace the steel bars of reinforced concrete beams, Engineering Structures 128, 166-183, 2006.
- [23] Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Recommendation for design and contruction of concrete structures using continuous fiber materials, Concrete engineering series No:23 Research Committee on Continuous Fiber Reinforced Material, Tokyo, Japan,1997.
- [24] CSA S806-12 (Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers)

[25] ACI 440.1R-15 (Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber- Reinforced with Fiber- Reinforced Polymer (FRP) Bars)

