

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇELİK VE CFRP DONATILI HİBRİT KİRİŞLERDE DONATI SIRALAMASININ
EĞİLME DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİLERİ

Hamdi Furkan ÖZBAL

OCAK 2020

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Hamdi Furkan ÖZBAL tarafından
hazırlanan ÇELİK VE CFRP 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

Jüri Üyeleri

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Mahmut Cem YILMAZ

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

Üye : Dr. Öğr. 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 ailem ve canım kardeşim Ahmet Tekin ÖZBAL'a...



ÖZET

ÇELİK VE CFRP DONATILI HİBRİT KİRİŞLERDE DONATI SIRALAMASININ EĞİLME DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİLERİ

ÖZBAL, Hamdi Furkan

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Şule BAKIRCI ER

Ocak 2020, 58 sayfa

Klasik betonarme yapılarında çelik ve beton sık kullanılan yapı malzemeleridir. Fakat günümüzde kullanımı artan FRP (fiber takviyeli polimer) kompozitler klasik betonarme yapılarında kullanılan çeliğe göre korozyon dayanımı, neme karşı direnci, kimyasallara karşı dayanımı, ısı iletkenliğinin düşük olması, ağır olmaması (yoğunluğu düşük), yüksek çekme kuvveti, hareketli yükler altındaki yüksek dayanımı, yüksek mukavemeti, ekstra hizmetlere (bakım, vb.) gereksinimi olmaması, uzun yıllar mukavemetini koruması gibi avantajlara sahiptir. FRP donatıların dezavantajları ise gevrekli, ani koparlar, doğrusal gerilme ve şeklinde değişim görülür. Bu tür dezavantajları kayda değer bir şekilde azaltmak için, çelik donatı ile beraber, hibrit (çelik ve FRP donatı), kullanımları üzerinde çalışılmıştır. Bu çalışma da FRP malzemelerinden birisi olan CFRP malzeme ve çelik ile hibrit edilmiş, üç farklı kombinasyon da donatılandırılmış Ø6 lık CFRP malzeme ve Ø8 lık CFRP malzeme olmak üzere toplam altı adet betonarme kirişin eğilme performansları incelenmiştir. Bu kirişlerin yük-deplasman ilişkileri, yük taşıma kapasiteleri, deformasyon özellikleri, deplasman değerleri deneysel ve teorik olarak karşılaştırılıp incelenmiştir.

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

ABSTRACT

EFFECTS OF REINFORCEMENT SORTING ON BENDING BEHAVIOR IN STEEL AND CFRP EQUIPPED HYBRID BEAMS

OZBAL, Hamdi Furkan

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Şule BAKIRCI ER

January 2020, 58 pages

Steel and concrete are frequently used building materials in conventional reinforced concrete structures. The increasing usage of FRP (fiber reinforced polymer) composites in reinforced concrete structures to corrosion resistance than the steel, moisture resistance, resistance to chemicals, low thermal conductivity, the absence of heavy (low density), high tensile strength, high strength under live loads, high strength, extra services (maintenance, etc.) advantages such as lack of requirement and maintaining strength for many years. However FRP breaks suddenly and has linear stress-strain behaviour. In order to significantly reduce such disadvantages, hybrid (steel and FRP reinforcement) with steel reinforcement has been studied. In this study, bending performance of six reinforced concrete beams including Ø6 CFRP bars and Ø8 CFRP bars, which are hybridized with CFRP and steel bars were examined. The load-displacement relations, load carrying capacities, deformation properties, displacement values and crack patterns of these beams were investigated experimentally and analyzed theoretically.

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

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasını bana öneren ve tezimin hazırlanmasında hiçbir yardımı esirgemeyen ve daima yanımda olan, tez yöneticisi hocam, Sayın Dr. Öğretim Üyesi Şule BAKIRCI ER'e en içten 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 bana her türlü desteği veren aileme; yüksek lisans eğitimim boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen, büyük sabır gösteren sevgili aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. FRP Genel Özellikleri	1
1.2. Literatür Çalışması	2
2. DENEYSEL ÇALIŞMA	9
2.1. Deney Programı	9
2.2. Malzeme Özellikleri	17
2.2.1. Beton Özellikleri	17
2.2.2. Çelik Donatı Özellikleri	18
2.2.3. CFRP Donatı Özellikleri	18
2.3. Kirişlerin Tasarımı ve Hazırlanması	18
2.4. Yükleme, Ölçüm ve Deney Düzeneği	20
2.5. Deneyler	22
2.5.1. Nd2S16-2C6 Kirişi	22
2.5.2. Nd2S16-2C6 Kirişi Yük-Deplasman İlişkisi ve Grafiği	24
2.5.3. Nd2S16-2C8 Kirişi Deneyi	24
2.5.4. Nd2S16-2C8 Kirişi Yük-Deplasman İlişkisi ve Grafiği	26
2.5.5. Nd5S10-2C6 Kirişi Deneyi	27
2.5.6. Nd5S10-2C6 Kirişi Yük-Deplasman İlişkisi ve Grafiği	29
2.5.7. Nd5S10-2C8 Kirişi Deneyi	30
2.5.8. Nd5S10-2C8 Kirişi Yük-Deplasman İlişkisi ve Grafiği	32
2.5.9. Ns2S16-2C6 Kirişi Deneyi	33
2.5.10. Ns2S16-2C6 Kirişi Yük-Deplasman İlişkisi ve Grafiği	35
2.5.11. Ns2S16-2C8 Kirişi Deneyi	36
2.5.12. Ns2S16-2C8 Kirişi Yük-Deplasman İlişkisi ve Grafiği	38
2.6. Kirişlerin Deney Sonundaki Çatlak Haritaları	39
2.6.1. Nd2S16-2C6 Kirişi Çatlak Haritası	39
2.6.2. Nd2S16-2C8 Kirişi Çatlak Haritası	40
2.6.3. Nd5S10-2C6 Kirişi Çatlak Haritası	40
2.6.4. Nd5S10-2C8 Kirişi Çatlak Haritası	40
2.6.5. Ns2S16-2C6 Kirişi Çatlak Haritası	41
2.6.6. Ns2S16-2C8 Kirişi Çatlak Haritası	41
3. TEORİK ANALİZ	42
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	49
5. SONUÇLAR	55
KAYNAKLAR	56

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

2.1.	Nd2S16-2C6 Donatı Detayı	11
2.2.	Nd2S16-2C8 Donatı Detayı	12
2.3.	Nd5S10-2C6 Donatı Detayı	13
2.4.	Nd5S10-2C8 Donatı Detayı	14
2.5.	Ns2S16-2C6 Donatı Detayı	15
2.6.	Ns2S16-2C8 Donatı Detayı	16
2.7.	Normal Dayanımlı Beton Dökümü Öncesi Kirişler.....	19
2.8.	Normal Dayanımlı Beton Dökümü Sonrası Kirişler.....	19
2.9.	Deney Yükleme Sistemi.....	20
2.10.	Deney Düzeneği	21
2.11.	Yükleme Düzeneği.....	21
2.12.	Nd2S16-2C6 Kirişi Deney Başlangıcı	23
2.13.	Nd2S16-2C6 Kirişi Deney Sonu.....	23
2.14.	Nd2S16-2C6 Kirişi Yük-Deplasman Grafiği.....	24
2.15.	Nd2S16-2C8 Kirişi Deney Başlangıcı	25
2.16.	Nd2S16-2C8 Deney Sonu	26
2.17.	Nd2S16-2C8 Kirişi Yük-Deplasman Grafiği.....	27
2.18.	Nd5S10-2C6 Kirişi Deney Başlangıcı	28
2.19.	Nd5S10-2C6 Kirişi Deney Sonu.....	29
2.20.	Nd5S10-2C6 Kirişi Yük-Deplasman Grafiği.....	30
2.21.	Nd5S10-2C8 Kirişi Deney Başlangıcı	31
2.22.	Nd5S10-2C8 Kirişi Deney Sonu.....	32
2.23.	Nd5S10-2C8 Kirişi Yük-Deplasman Grafiği.....	33
2.24.	Ns2S16-2C6 Kirişi Deney Başlangıcı.....	34
2.25.	Ns2S16-2C6 Kirişi Deney Sonu	35
2.26.	Ns2S16-2C6 Kirişi Yük-Deplasman Grafiği	36
2.27.	Ns2S16-2C8 Kirişi Deney Başlangıcı.....	37
2.28.	Ns2S16-2C8 Kirişi Deney Sonu	38
2.29.	Ns2S16-2C8 Kirişi Yük-Deplasman Grafiği	39
2.30.	Nd2S16-2C6 Çatlak Haritası	39
2.31.	Nd2S16-2C8 Çatlak Haritası	40
2.32.	Nd5S10-2C6 Çatlak Haritası	40
2.33.	Nd5S10-2C8 Çatlak Haritası	40
2.34.	Ns2S16-2C6 Çatlak Haritası	41
2.35.	Ns2S16-2C8 Çatlak Haritası	41
3.1.	Donatı Çeliği Gerilme Birim Şekil Değiştirme Grafiği	42
3.2.	FRP Gerilme Birim Şekil Değiştirme Grafiği.....	43
3.3.	Nd2S16-2C6 Kirişinin DeneySEL ve Teorik Grafiği	46
3.4.	Ns2S16-2C6 Kirişinin DeneySEL ve Teorik Grafiği	46
3.5.	Nd5S10-2C6 Kirişinin DeneySEL ve Teorik Grafiği	47
3.6.	Nd2S16-2C8 Kirişinin DeneySEL ve Teorik Grafiği	47

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

3.7.	Ns2S16-2C8 Kirişinin Deneysel ve Teorik Grafiği	48
3.8.	Nd5S10-2C8 Kirişinin Deneysel ve Teorik Grafiği	48
4.1.	Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri	49
4.2.	6 mm CFRP li Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri	50
4.3.	8 mm CFRP li Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri	50
4.4.	Nd2S16-2C6 ve Nd2S16-2C8 Kirişlerinin Yük-Deplasman Grafikleri ...	51
4.5.	Nd5S10-2C6 ve Nd5S10-2C8 Kirişlerinin Yük-Deplasman Grafikleri ...	51
4.6.	Ns2S16-2C6 ve Ns2S16-2C8 Kirişlerinin Yük-Deplasman Grafikleri ...	52
4.7.	Nd2S16-2C6 ve Ns2S16-2C6 Kirişlerinin Yük-Deplasman Grafikleri ...	52
4.8.	Nd2S16-2C8 ve Ns2S16-2C8 Kirişlerinin Yük-Deplasman Grafikleri ...	53
4.9.	Tüm Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri	53
4.10.	Kirişlerin Yük-Çatlak Genişliği Grafikleri	54

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
2.1. Normal Dayanımlı Betonun Küp ve Silindir Dayanımları	17
2.2. Kirişte Kullanılan Çeliğin Mekanik Özellikleri	18
2.3. Kirişte Kullanılan Karbon Malzemenin Mekanik Özellikleri.....	18
3.1. Deney Kirişlerinin Donatı Alanları, Dengeli Donatı Oranı, Efektif Donatı Oranı.....	45



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
DF	Süneklik Katsayısı



KISALTMALAR DİZİNİ

FRP	Fiber Takviyeli Polimer
BFRP	Bazalt Fiber Takviyeli Polimer
CFRP	Karbon Fiber Takviyeli Polimer
GFRP	Cam Fiber Takviyeli Polimer
AFRP	Aramid 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 Genel Özellikleri

FRP malzemeler, yüksek korozyon direnci, yüksek mukavemet ve iyi tasarım esnekliği gibi avantajları için betonarme yapılarda takviye elemanı olarak ve betonarme yapıların güçlendirilmesinde giderek daha fazla ve yaygın bir şekilde uygulanmıştır. Şu anda, FRP malzemeler, özellikle agresif çevresel koşullar altındaki yapılar için, altyapı korozyon sorunlarını çözme odaklı yeni yapılar geliştirmek amacıyla kullanılmaktadır. FRP (Fiber Takviyeli Polimer) kompozitler 21. yüzyılda geliştirilmiştir. Bu malzemeler ilk olarak askeriye ve uzay sanayinde kullanılmıştır. Son 30 yıldır bina türü yapılarda kullanılmaya başlanmıştır. Köprülerdeki çelik donatılı betonarme tablaların servis ömrü 25 yıl olarak beklenmektedir. Fakat FRP donatılı tablaların servis ömrünün en az 75 yıl olması beklenmektedir. Bazalt FRP donatılar, köprü kirişlerinde; tabliye ağırlığını azaltma, korozyon etkilerine karşı koruma, tamiratları azaltma özellikleri ile kullanılabilirliği önemli ölçüde artırmada mükemmel bir alternatiftir.

FRP malzemeler, yüksek korozyon direnci, yüksek mukavemet ve iyi tasarım esnekliği gibi avantajları için betonarme yapılarda takviye elemanı olarak ve betonarme yapıların güçlendirilmesinde giderek daha fazla ve yaygın bir şekilde uygulanmıştır. Şu anda, FRP malzemeler, özellikle agresif çevresel koşullar altındaki yapılar için, altyapı korozyon sorunlarını çözme odaklı yeni yapılar geliştirmek amacıyla kullanılmaktadır. [1]

1.2. Literatür Çalışması

Yoo, Banthia ve Yoon yaptığı çalışmada Ultra yüksek performanslı fiber takviyeli kirişlerden (UHPFRC) toplam 7 adet kirişin eğilme davranışı incelenmiştir. Cam elyaf katkılı polimer (GFRP) ile inşaat çeliği ile oluşturulan hibrit kirişler hazırlanmıştır. 3 tane GFRP takviyeli ve 4 tane hibrit takviyeli kirişler farklı donatı kombinasyonlarında hazırlanmıştır. 2900 metre uzunluktaki kirişler tekil yük altında çatlak oluşumları incelenmiştir. UHPFRC kirişlerin inşaat çeliği ile imal edilen kirişlere göre eğilme performansları, yük taşıma kapasiteleri ve süneklik (deformabiliteleri) performanslarında artış gözlemlenmiştir. Sonuç olarak GFRP ile güçlendirilen UHPFRC kirişlerin kullanımı önemli ölçüde sertliği arttırmış ve çatlak genişliklerini azaltmıştır. [2]

Kara İlker Fatih, Ashour Ashraf F., Köroğlu Mehmet Alpaslan, bu çalışmada hibrit FRP ve normal çeliğin birlikte bulunduğu kirişlerin eğrilik, deplasman ve moment kapasitelerini öngörmek amacıyla formüle etmişlerdir. Tahmini olarak kesit analizi yapıp kirişteki deplasman ve moment kapasitesini içerdiği moment-eğrilik grafiğini araştırmıştır. Yaptıkları araştırmalar sonucunda teorik ve deneysel verilerin birbiriyle eğrilik, moment kapasitesi ve sehim tahminleri birbirine uygun olduğunu gördüler. FRP ilave edilmiş kirişlerin normal kirişlere göre sünek davranışında ve rijitlikte artış olmuştur. Öngörülen eğrilik, moment kapasitesi ve deplasman tahminleri FRP/çelik içerikli hibrit kirişler ile uyum gösterdiğini ortaya çıkarmışlardır. [3]

Rafi, Nadjai, Ali, Talamona yaptıkları deneysel çalışmada karbon fiber destekli (CFRP) li betonarme kirişleri deneysel testlere tabi tutmuşlardır. Deney sonuçlarında çelik ve CFRP takviyeli kirişlerin birçok yönden benzerlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca deneyden önce tahmin edilen kırılma modunu deney sonunda doğrulamışlardır. CFRP destekli kirişlerde deplasmandaki hizmet yük seviyesi teorik yük kapasitesine karşılık daha iyi sonuç vermiştir. CFRP güçlendirilmiş kirişlerin deforme olabilirlik modülünün 6'dan büyük olduğu sonucuna ulaşmışlardır. BRC ve BRS tip kirişler karşılaştırılmıştır. Hem çelik hem de CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerde çatlak davranışına benzer özellik göstermiştir. BRC ve BRS tür kirişlerin ikisi de yaklaşık olarak eşit sayıda çatlak genişliği ve

çatlak sayısı oluşturmuştur. BRS ve BRC kirişlerindeki neredeyse tüm kirişlerin çatlamaya başladığı yük değeri benzer sonuçlar vermiştir. Belirledikleri ACI kodlu denklem BRC kirişinin tahmin kapasitesinin yanında küçük kalmıştır. Çatlamadan sonra BRC kirişleri BRS kirişlerinden daha fazla deplasmana uğradığı belirlenmiştir. Ancak çelik aktıktan sonra BRS kirişlerindeki deplasman oranı BRC kirişlerinden daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. [4]

Kalupahana, Ibell, Darby yapmış oldukları çalışmada NSM FRP çubuklarının bağ davranışını araştırmaya çalışmışlardır. Kritik kırılma modlarını, bağlanma dayanımı ve ankraj uzunluğu gibi parametreleri tahmin etmeye çalışmışlardır. Ayrıca yapışma uzunluğu ve ankraj uzunluğu gibi gereksinimleri tahmin etmeye çalışmışlardır. Dikdörtgen çubuklar FRP'nin yırtılmasının sınırlayıcı bir durumun olduğunu gözlemlemişlerdir. CFRP çubukların kopma kapasitesi en kesit alanı/ çevre uzunluğu na bağlıdır. NSMFRP çubuklarında beton örtü ayırımı (paspayı) kritik başarısız olma modunda önemli bir rol oynar. Yapılan testler sonucunda NSM çubukları için kritik bağ konusunda özel dikkat gösterilmelidir. Beton dayanımı ve kesit alanı gibi parametreler başarısızlık metotlarını doğrudan etkileyen önemli parametreler olduğu gözlemlemişlerdir. [5]

Morsy Alaa M., El-Tony El-Tony M., El-Naggar Mohamed, yaptıkları çalışmada farklı yük seviyelerinde CFRP ile güçlendirilmiş NSM kirişlerinin onarımı ve güçlendirilmesi durumunda değerlerin daha önceki veriler ile karşılaştırmışlardır. Toplamda 5 kiriş döküldü ve 6 kiriş 4 noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneyde 12 mm'lik CFRP donatı kullanılarak araştırma yapılmıştır. Ayrıca farklı yük seviyelerindeki durumları incelenmiştir. CFRP takviyeli çubukları gömülü olmak koşuluyla özellikle paslanmış çelik RC kirişlerde kullanılmasının olumlu etkileri gözlemlenmiştir. Güçlendirme sonucunda kirişin kapasitesi artmıştır. Gömülü Frp çubukları kullanmak RC kirişlerinin esneklik kapasitesini artırdığını gözlemlemişlerdir. Kontrol kirişine göre yaklaşık %33.33 gibi bir oranda artış göstermiştir. Önceden yükleme yapmak RC kirişlerinin kapasite artışını çok az miktarda etkilemiştir. Yapılan deneyde gömülü FRP çubuklar kırılma kaybını önlemek için etkili bir yöntem olduğunu savunmuşlardır. [6]

Arockiasamy M., Chidambaram S., Amer A., Shahawy M. 152 mm 203 mm 2438 mm ve 152 mm 152 mm 2438 mm olmak üzere iki farklı tip kiriş numunesi üzerinde çalışma yapmışlardır. Belli bir düzende yükleme yapılarak karbon ile güçlendirilmiş kirişlerin uzun süreli davranışları hakkında çalışma yapmışlardır. 4 tane dikdörtgen kesitli betonarme kirişler kullanılmıştır. İncelemeler yaklaşık olarak iki yıl boyunca sürmüştür. Uzun dönemde oluşan deplasmanı hesaplamak için basitleştirilmiş bir denklem oluşturmuşlardır. Yaptıkları deneysel çalışmanın sonunda kirişteki zamana bağlı deplasman, şekil değiştirme ve eğrilik durumlarına bakmışlardır. CFRP ile güçlendirilmesi ile oluşturulan kirişler basit bir denklem ile hesaplama yapmışlardır. CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin yaş-elastisite modülü metodu betonun tahmin edilen uzun dönem elastik davranışı yaklaşık sonuçlar vermiştir. [7]

Elbadry Mamdouh, Elzaroug Omer yaptıkları çalışmada Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ile oluşturulan kirişlerin sıcaklık derecesi altında etkisini incelemişlerdir. Eğilme momentleri ve çatlak gelişimi sıcaklık gradyanında ekrana aktarılmışlardır. Testlerinde farklı miktarlarda CFRP içeren kirişlerin termal momentleri ve çatlak genişliklerini incelemişlerdir. CFRP ile güçlendirilmiş kirişleri normal çelik ile güçlendirilmiş kirişlerden daha iyi termal davranış göstermişlerdir. CFRP ile güçlendirilmiş kirişler çelikle güçlendirilmiş kirişlere göre daha fazla sertlik göstermişlerdir. CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerde sıcaklık çatlamlarındaki moment-deplasman grafiklerini tahmin ettikleri model ile analiz etmeye çalışmışlardır. Minimum CFRP takviye miktarında tasarım çizelgeleri hazırlamaya çalışmışlardır. [8]

Sovjak Radoslav, Havlasek Petr, Vitek Jan, bu çalışmada karbon elyafı ile güçlendirilmiş ön gerilmeli beton plakaların davranışı incelenmiştir. Bu kirişleri 4 noktalı eğilme deneyine tabii tutulmuştur. 10 tane 4.5 metre uzunluğunda kirişler hazırlanmıştır. 8 numuneye kırılma anına kadar yarı statik yükleme diğer 2 numuneye ise 1 ve 7 yılları arasında yüklere maruz bırakarak kırılma anını belirlemişlerdir. CFRP çubuklarda önemli bir sünme olmadığı için uzun süre yüklemdeki davranışını incelemişlerdir. Deneysel verileri kompleks sonlu elemanlar modeli yardımıyla hesaplamaya çalışmışlardır. 1 yıl ve 7 yıl olarak hesaplanan kirişlerde kısa süreli sapma, sapma oranı ve büzülme değeri açısından büyük

farklılıklar oluşmuştur. 1 yıllık ve 7 yıllık numunelerde yarı statik deneye tabi tuttuklarında nihai yük kapasiteleri sürekli yükleme önemli bir değişiklik olmaz. (%93.4, %105.8)'dir. Baz'ant-Najjar nem aktarımı modelinden faydalanmışlardır. [9] [10]

Capozucca R., Blasi M. G., Corina V., RC kirişlerinin NSM dairesel CFRP çubuklarıyla statik ve dinamik testlere tabi tutmuşlardır. 4 adet RC kiriş tasarlamışlardır. NSM CFRP çubuklarını kullanarak yapılan kirişlerin 3 tanesi yüksek direnç göstermiştir. NSM CFRP çubuklarının bağ kapasitesinin analizi için kırılma enerjilerini tahmin etmeye çalışmışlardır. Ayrıca kirişlerin serbest titreşimlerini dikkate alarak dinamik davranışını incelemişlerdir. Oluşan hasarlardan dolayı frekans değerlerinde değişimler olmuştur. NSM güçlendirilmesini değerlendirmek için deneysel veriler ile statik değerler karşılaştırmışlardır. Statik yüke maruz kalan kirişlerde yerel hasarlar oluştuğunu gözlemlemişlerdir. [11]

Safan Mohamed A., bu çalışmada toplam 12 adet 100 mm x 200 mm x 1350 mm hibrit betonarme kirişlerin farklı kombinasyonlarda donatı oranları kullanarak eğilme, yük değişimleri ve çatlak analizi yapmıştır. Bu hibrit kirişlerde çelik ile birlikte cam elyaf katkılı polimer (GFRP) malzeme kullanmıştır. Alt yüze yakın yerleştirilen çelik ve GFRP çubuklarının çatlamaya etkisini incelemiştir. Yapılan bu çalışmaların sonucunda ise hibrit kirişlerin eğilme mukavemeti , istenilen düzeyde sertlik ve çatlak özellikleri gözlemlenmiştir. [12]

Elsayed Tarek A., Eldaly A. M., El-Hefnawy A. A., Ghanem G. M., yaptıkları çalışmada 150 mm x 300 mm x 2050 mm boyutunda 9 adet kiriş tasarlamışlardır. Bu kirişlerde hibrit kiriş ve hibrit kirişlerde kullanılan ankrajın çatlak desenlerine, deformasyonları araştırılmıştır. Kiriş A tamamen çelik donatılı , Kiriş B GFRP ve çelik donatılı hibrit kiriş olarak, Kiriş C GFRP ve çelik donatılı hibrit kiriş olarak tasarlanmış fakat bu kirişin GFRP donatısında başında ve sonunda ankraj (çelik tüp içerisine reçine harcı ile GFRP sabitlenmiş) kullanılmıştır. Kiriş D GFRP ve çelik donatılı hibrit kiriş olarak tasarlanmış fakat bu kirişin ise başında, sonunda ve ortasında aynı şekilde ankraj kullanılmıştır. Kiriş E ise GFRP ve çelik donatılı hibrit kiriş olarak tasarlanmış fakat bu hibrit kirişte ise GFRP donatısında başında ve

sonunda olmak üzere 500 mm aralık ile toplam 5 ankraj kullanılmıştır. Kalan 4 kirişin 2 sinde ise farklı donatı oranlarında GFRP ve Aramid fiber takviyeli polimer (AFRP) kullanmışlardır. Diğer 2 kirişte ise farklı donatı oranlarında GFRP ve karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) kullanmışlardır. Çalışmaların sonucunda kirişlerde kullanılan ankrajlı sistemin sapma açısının, sünek davranışının iyileştiği gözlemlenmiştir. Çelik ve FRP hibrit kirişlerin beton bir yapıya yarı süneklik sağlayacağını öngörmüşlerdir. [13]

Cullazoğlu Fatih bu çalışmada hibrit FRP-çelik donatılı betonarme kirişlerin farklı FRP donatı tipleri kullanarak taşıma gücü momentlerini ve deplasmanı bilgisayar programı aracılığıyla karşılaştırıp incelemiştir. FRP donatılı kirişlerin içerisine çelik donatının da eklenmesiyle kirişin sünekliğinin ve rijitliğinin arttığı sonucuna ulaşmıştır. Ayrıca bu çalışmada hibrit betonarme kirişlerinin kesme dayanımlarını da çeşitli ülkelerin yönetmelikleri tarafından modellenen kirişler ile karşılaştırmasını yapmıştır. Bu karşılaştırmanın sonucunda ise kesme dayanımı için bir denklem önermesinde bulunmuştur. Bu denklemi de diğer yönetmeliklerde ki çıkarılan sonuçlarla karşılaştırmıştır. [14]

Suzan A. A. Mustafa, Hilal A. Hassan, bu çalışmada farklı lif takviyeli polimer; CFRP, GFRP ve çelik ile oluşturulan hibrit betonarme kirişlerin doğrusal olmayan sonlu elemanlar programı (ANSYS) kullanarak kirişler tasarlamışlardır. Ayrıca deneysel olarak da hibrit kirişler tasarlamışlardır. ANSYS programında tasarladıkları kirişler 200 mm x 300 mm x 6000 mm şeklinde tasarlamışlardır ve iki noktadan tekil yük (kiriş başından ve sonundan 1600 mm mesafeden) uygulanmıştır. Deneysel kirişlerde ise 120 mm x 200 mm x 2000 mm şeklinde boyutlandırmışlardır ve iki noktadan (kiriş başından ve sonundan 675 mm mesafeden) tekil yükleme yapmışlardır. Çeliğin FRP donatılar ile kullanılmasıyla kirişin sünekliğini artırdığını ve istenilmeyen kırılma yapısının ortadan kaldırdığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca kirişin üst yüzeyinde de çelik kullanılmasının gerekliliğini öngörmüşlerdir. Hibrit GFRP/ çelik kirişlerinde sertlik önemli oranda azalma, ilk çatlağın ortaya çıkmasında önemli ölçüde artış gözlemlenmiştir. Hibrit CFRP/çelik kirişlerde ise çatlama başlangıcı ve ilerlemesinde daha iyi bir performans göstermiştir. [15]

Hawileh R. A., bu çalışmasında çelik ve Aramid elyaf takviyeli polimer (AFRP) takviyesi ile 150 mm x 200 mm x 2400 mm farklı donatı kombinasyonlarında 6 adet hibrit betonarme kiriş tasarlamıştır. Kullandığı AFRP çubuklarının işlevi kirişin yük taşıma kapasitesini artırırken, çelik çubuklarının işlevi ise kirişin sünekliğini artırmaktadır. ANSYS programı ile tasarladığı hibrit kirişleri tekil yük uygulayarak eğilmeye tabi tutmuştur ve analiz etmiştir. Bu program ile tasarlanan hibrit kirişlerin davranışı ve yük taşıma kapasitesi tahminini doğru bir şekilde yakalayabileceği sonucuna varmıştır. [16]

Biao Hu, Yingwu Zhou, Feng Xing, Lili Sui, Minshen Luo, bu çalışmalarında çimento esaslı kompozit (ECC) ve karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ile güçlendirilmiş hibrit betonarme (RC) kirişleri uzunlamasına takviyeli farklı korozyon seviyeleri ile kirişlerin eğilme davranışı üzerine deneysel ve teorik bir araştırma yapmışlardır. Kiriş betonunun alt kısmı çıkartılmış ve ECC ile değiştirilmiş ve CFRP levhaları ECC tabakasının alt kısmına yerleştirmişlerdir. Deneysel sonuçlar ECC güçlendirmesinin korozyon oranı %10 dan düşük ise klasik betonarme kirişe yakın kapasiteyi geri kazanmıştır. CFRP yi ECC ye yerleştirilmesiyle hibrit kirişin çoklu kılcal çatlama davranışını CFRP azaltmıştır. ECC bu şekilde önemli ölçüde eğilme kapasitesini geliştirmiştir. Kirişin geri kalan üst kısmı ise ECC nin sayesinde betonun çatlamasını önemli ölçüde kısıtlamıştır. Deney sonunda teorik hesaplamalar ve test verileri arasında iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir. [17]

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

- 1- Amerikan Standardı (ACI 440.1R-15) [18]
- 2- Japon Standardı (JSCE) [19]
- 3- Kanada Standardı (CSA S806-12) [20] ‘tir.

1. Amerikan standardi [18] (Guide for Design and Construction of Structural Concrete Reinforced Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars) : Genellikle kullanılan şartnamedir. Malzeme özellikleri, tasarım esasları, tasarım örnekleri kısımlarını içermektedir.

2. Japon Standardi [19] (Recommendation for Design and Constfiuction of Concfiete Structures): Malzeme, Yapım ve Kalite Kontrol kısımlarını içermektedir. Farklı FRP malzemelerini konu edinmektedir. (Karbon, aramid, cam, vinil lif ve kompozit malzemeler)

3. Kanada Standardı [20] (Design and Costruction of Building Components with Fiber Reinforced Polymers): Bu standart FRP bileşenlerinin ve takviye malzemelerinin özelliklerinden bahsetmektedir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Deney Programı

150 mm eninde, 300 mm yüksekliğinde dikdörtgen kesitli, 2050 mm uzunluğunda 6 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Tüm kirişlerde basınç bölgesinde donatı 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 karbon lif takviyeli polimer (CFRP) malzeme, farklı donatı oranlarında hibrit olarak kullanılmıştır. Kirişlerdeki değişken parametreler; çekme donatısı çeşidi, adeti ve oranıdır.

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

Deneylerde kullanılan kiriş numunelerinin isimleri ve açıklamaları aşağıda verilmiştir.

Nd2S16-2C6: Normal Dayanımlı, çekme bölgesinde 2 adet 6 mm çapında CFRP donatı ve bu donatı merkezinden 30 mm yukarısında 2 adet 16 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

Nd2S16-2C8: Normal Dayanımlı, çekme bölgesinde 2 adet 8 mm çapında CFRP donatı ve bu donatı merkezinden 30 mm yukarısında 2 adet 16 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

Nd5S10-2C6: Normal Dayanımlı, çekme bölgesinde 2 adet 6 mm çapında CFRP donatı ve bu donatı merkezinden 30 mm yukarısında 5 adet 10 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

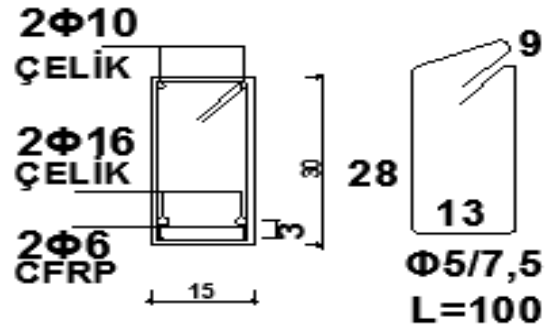
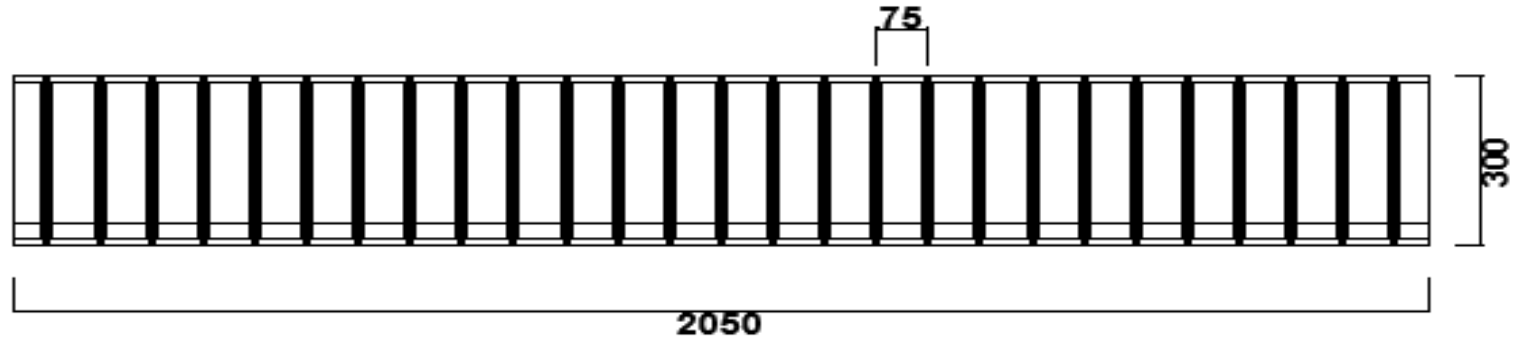
Nd5S10-2C8: Normal Dayanımlı, çekme bölgesinde 2 adet 8 mm çapında CFRP donatı ve bu donatı merkezinden 30 mm yukarısında 5 adet 10 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

Ns2S16-2C6: Normal Dayanımlı, çekme bölgesinde iç kısımda 2 adet 6 mm çapında CFRP donatı, dış kısımda 2 adet 16 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

Ns2S16-2C8: Normal Dayanımlı, çekme bölgesinde iç kısımda 2 adet 8 mm çapında CFRP donatı, dış kısımda 2 adet 16 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

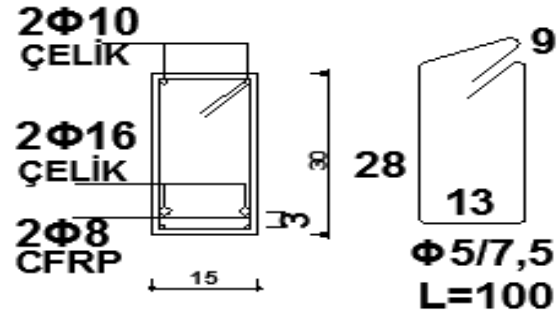
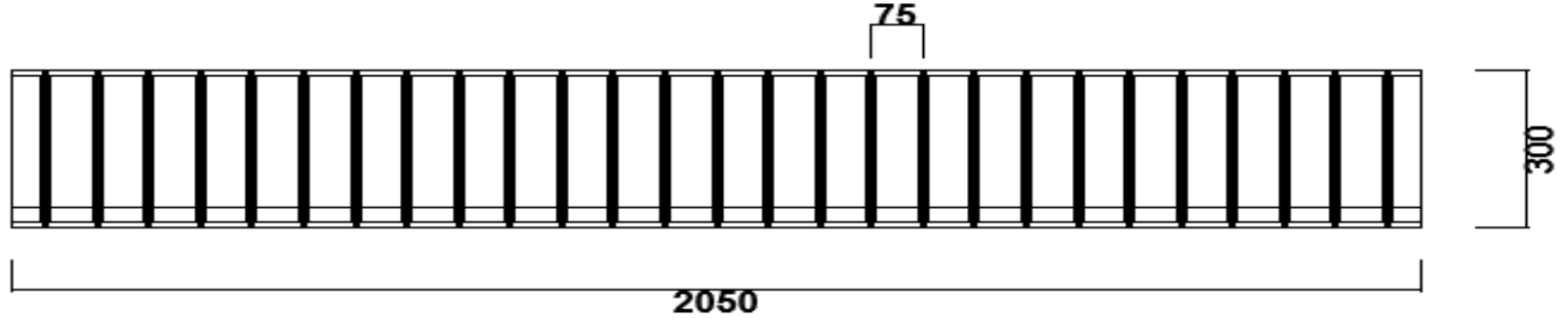


Nd2S16-2C6



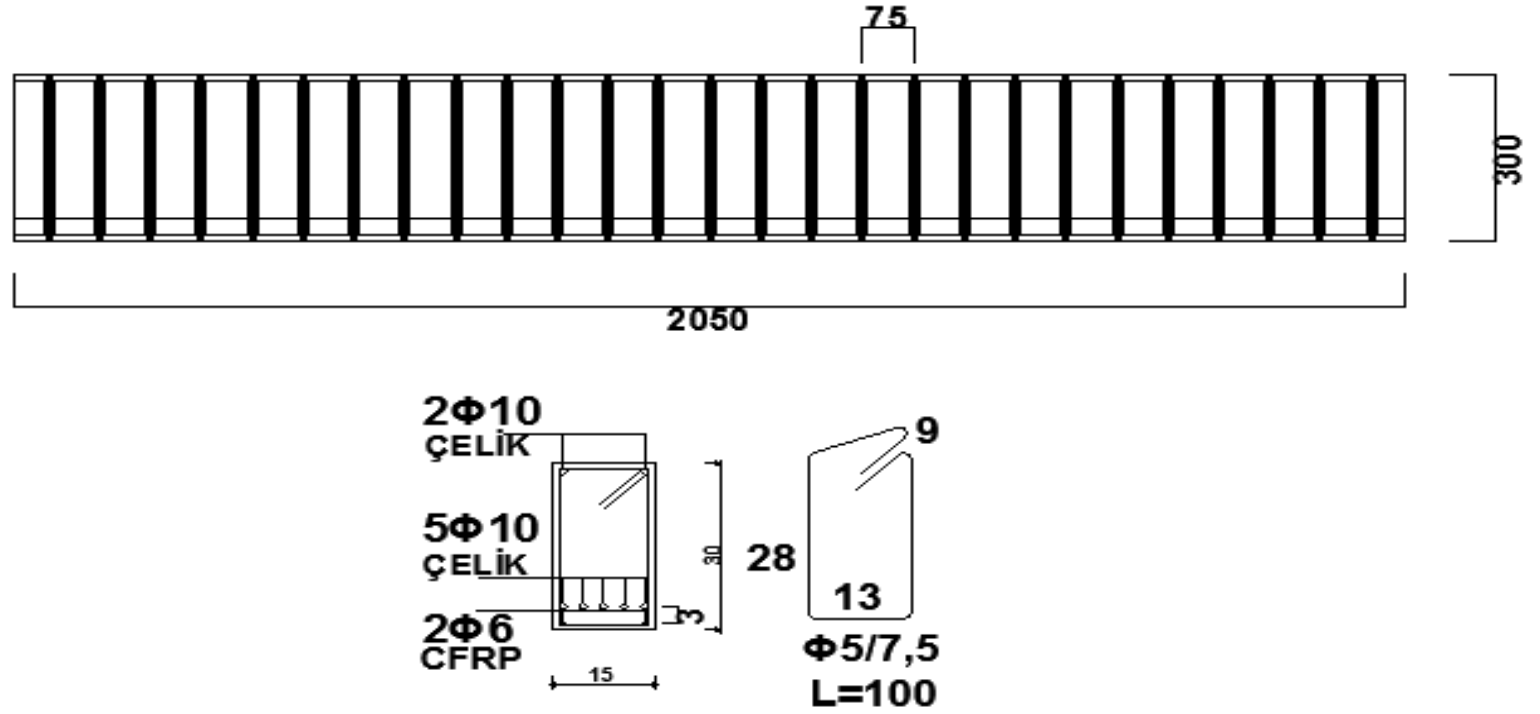
Şekil 2.1. Nd2S16-2C6 Donatı Detayı

Nd2S16-2C8



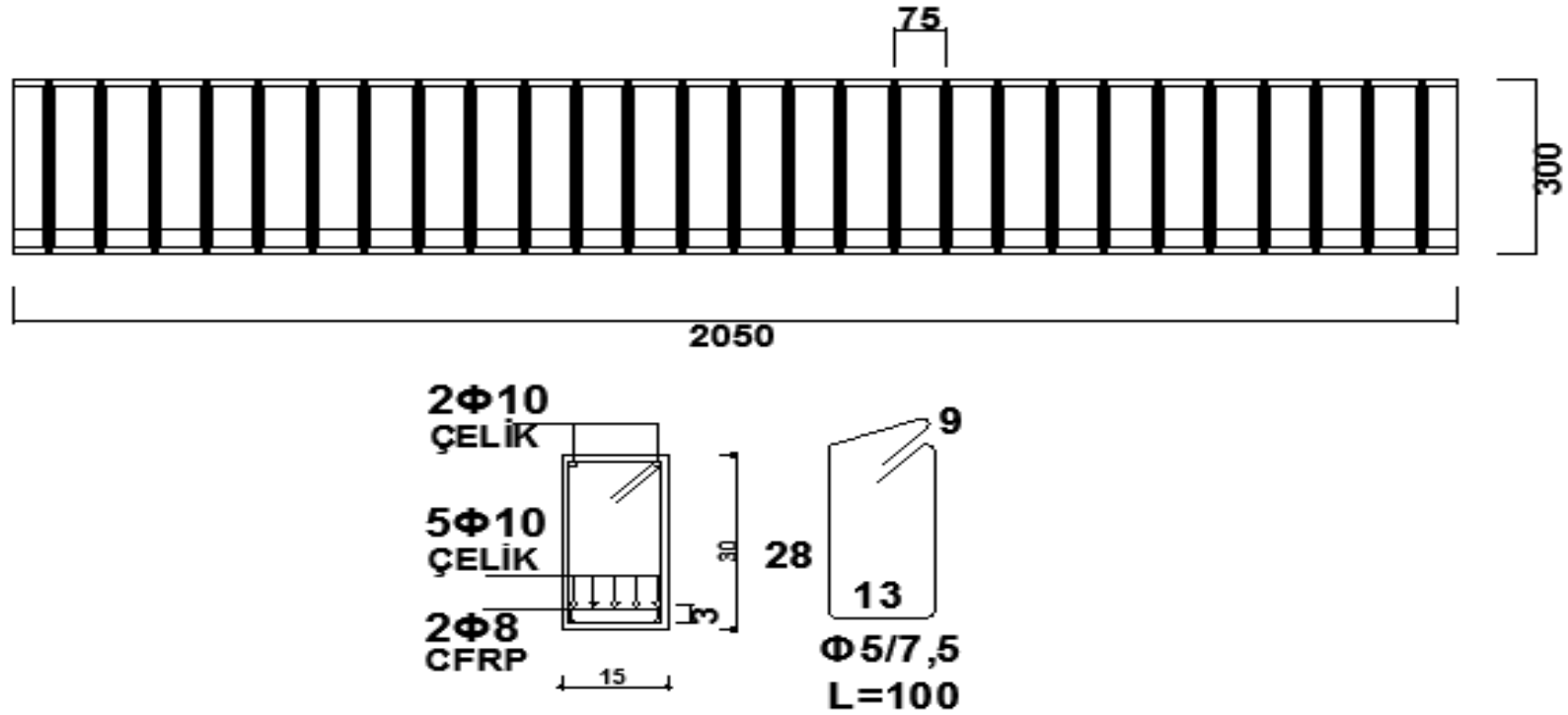
Şekil 2.2. Nd2S16-2C8 Donatı Detayı

Nd5S10-2C6



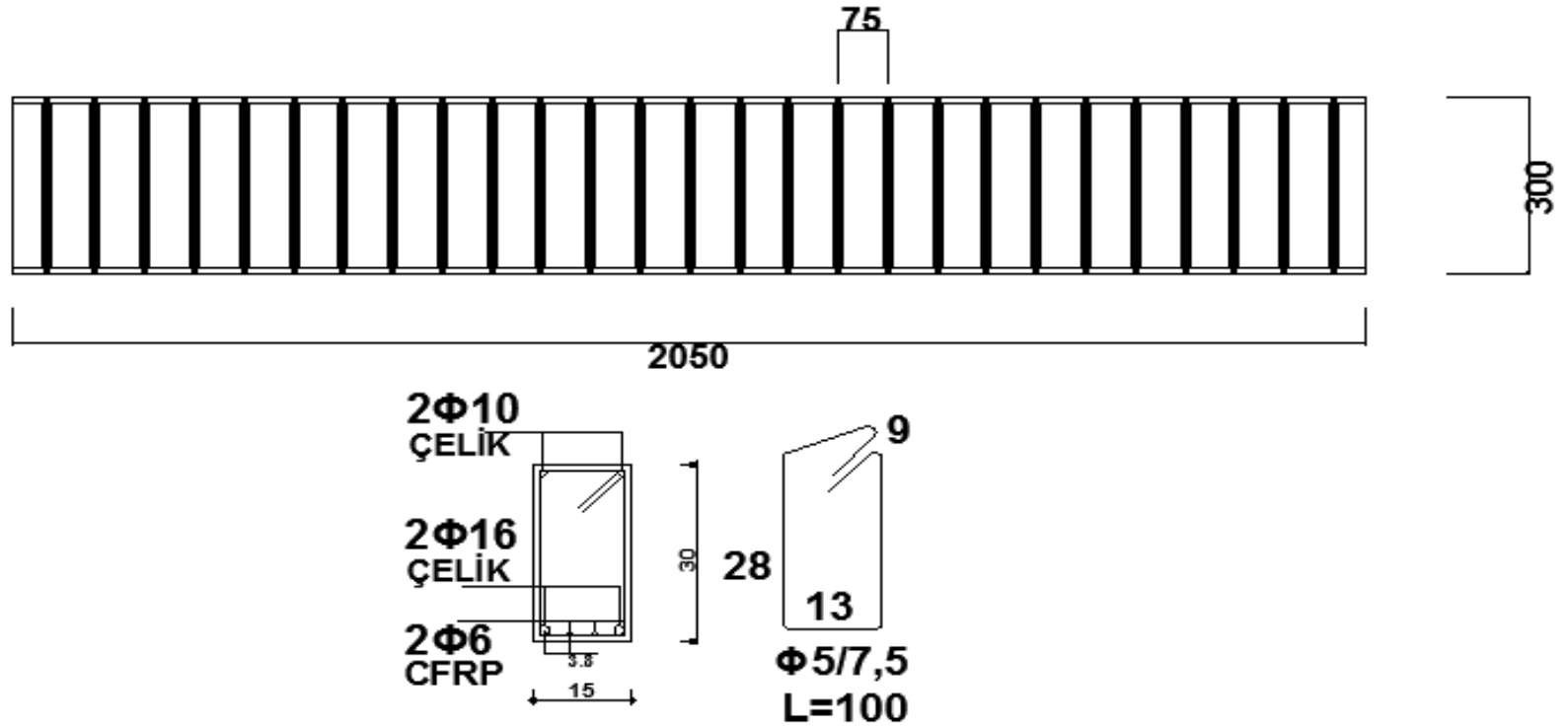
Şekil 2.3. Nd5S10-2C6 Donatı Detayı

Nd5S10-2C8



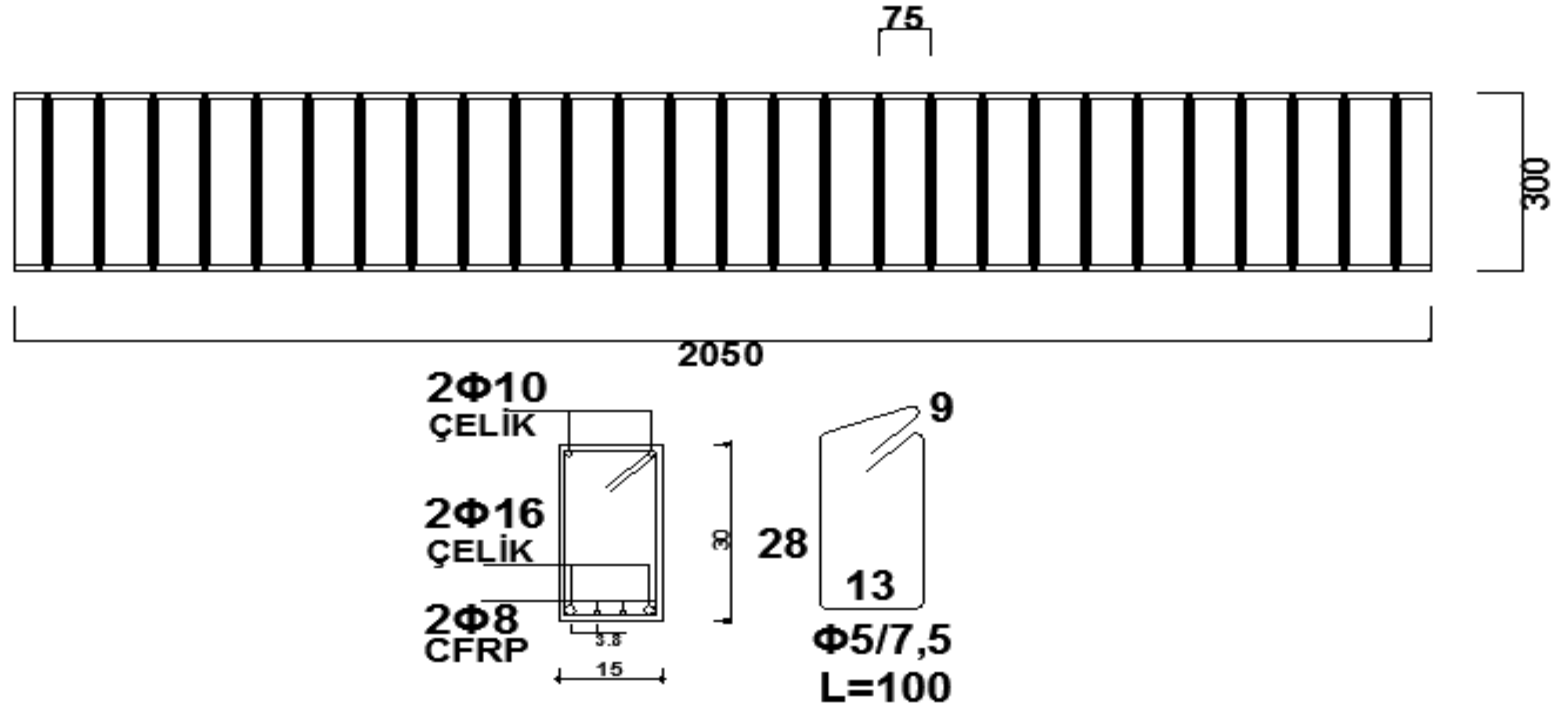
Şekil 2.4. Nd5S10-2C8 Donatı Detayı

Ns2S16-2C6



Şekil 2.5. Ns2S16-2C6 Donatı Detayı

Ns2S16-2C8



Şekil 2.6. Ns2S16-2C8 Donatı Detayı

2.2. Malzeme Özellikleri

2.2.1. Beton Özellikleri

Deneylerde, altı kirişte normal dayanımlı beton kullanılmıştır. Kullanılan normal dayanımlı beton özellikleri aşağıdaki çizelgelerde 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	36.94	31.40	32.49
	2	150 X 150	41.45	35.23	
	3	150 X 150	36.86	31.33	
	4	150 X 150	37.64	31.99	
28 günlük	5	150 X 150	52.37	44.51	42.34
	6	150 X 150	46.83	39.81	
	7	150 X 150	56.28	47.84	
	8	150 X 150	48.90	41.57	
	9	150 X 150	48.56	41.28	
	10	150 X 150	45.93	39.04	

2.2.2. Çelik Donatı Özellikleri

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

Çizelge 2.2. Kirişte kullanılan çeliğin mekanik özellikleri

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

2.2.3. CFRP Donatı Özellikleri

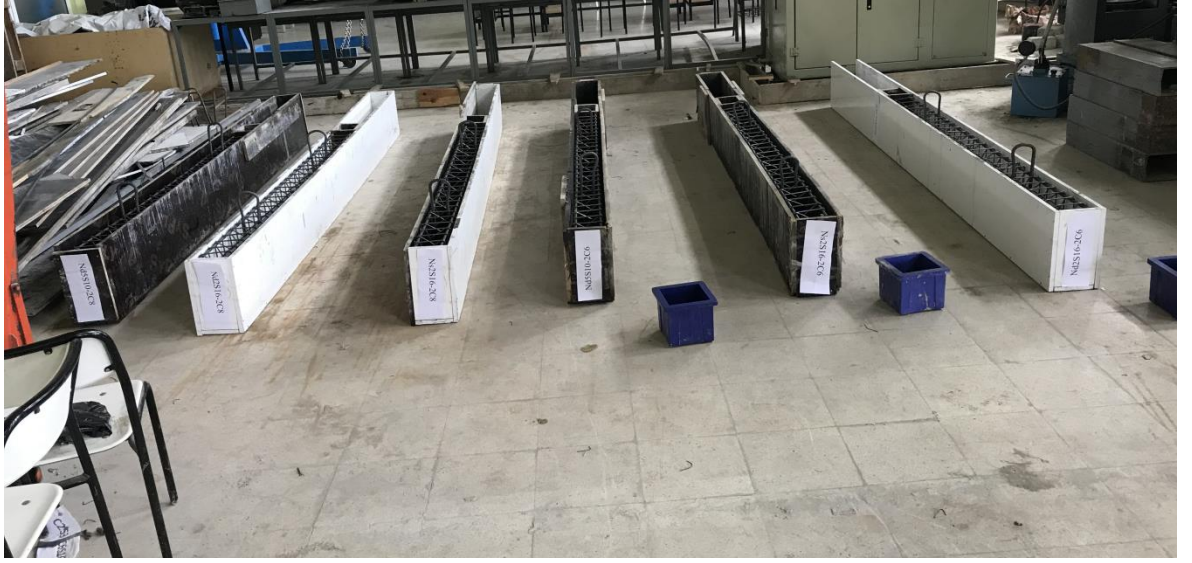
CFRP malzeme özellikleri, laboratuvardaki imkanların yetersiz olmasından dolayı test edilememiş olup, katalogdan alınmıştır. Mekanik özellikler aşağıdaki çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Kirişte kullanılan Karbon malzemenin mekanik özellikleri

Malzeme	Kopma Dayanımı (Mpa)	Elastisite Modülü (Mpa)
Karbon	2000	125000

2.3. Kirişlerin Tasarımı Ve Hazırlanması

150 x 300 x 2050 mm ölçülerinde hazırlanan kalıplara, kiriş donatılar yerleştirilmiştir. Daha sonra beton dökümü gerçekleştirilip normal dayanımlı kirişler hazırlanmış ve deneyleri yapılmıştır.



Şekil 2.7. Normal Dayanımlı Beton Dökümü Öncesi Kirişler

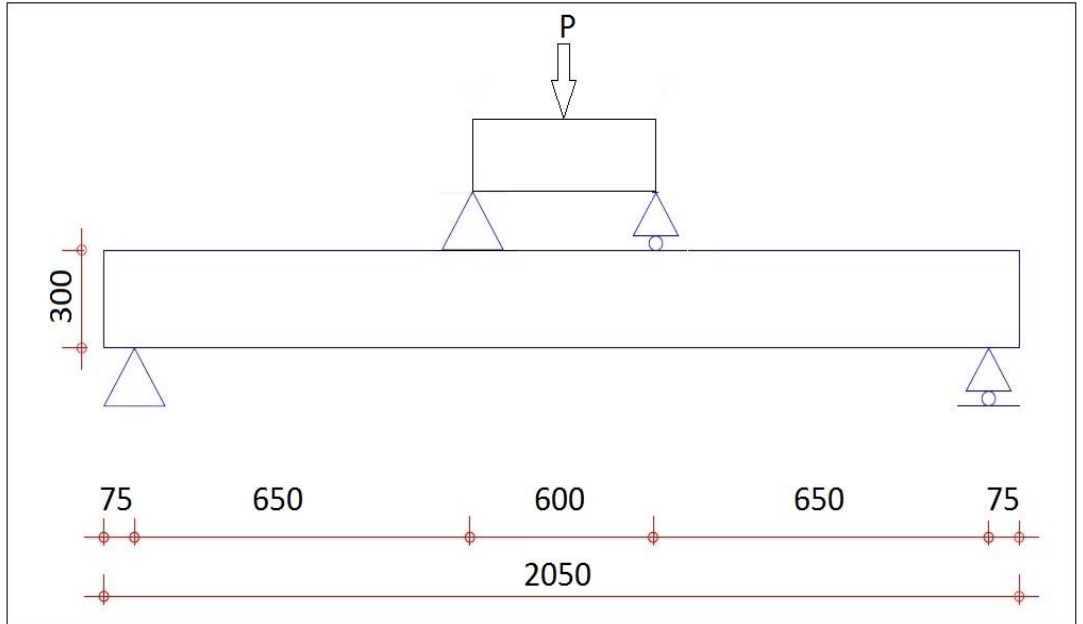


Şekil 2.8. Normal Dayanımlı Beton Dökümü Sonrası Kirişlerin Görünüşleri

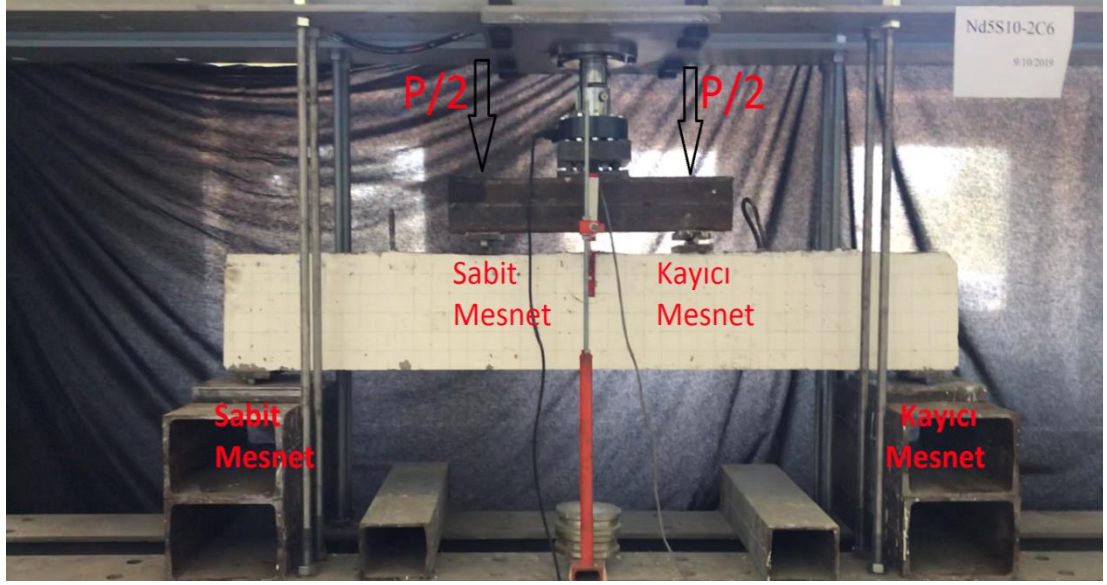
2.4. Yükleme, Ölçüm ve Deney Düzeneği

Hazırlanan kirişler dört noktalı eğilme altında test edilmişlerdir. Kirişlerin bir tarafı sabit diğer tarafı kayıcı mesnetlidir. Mesnetler, betonarme kirişin uç noktalarından 75 mm içeride, 1900 mm açıklık kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu kirişlerin üzerine 13,50 X 13,50 kutu kesitli 80 cm uzunluğunda çelik yükleme kirişi (yük dağıtma kirişi) yerleştirilmektedir. Ana yük, yükleme kirişi üzerinden tek noktada verilir. Bu dağıtma (çelik kiriş) yardımıyla betonarme kirişe 2 noktadan aktarılır. Çelik kiriş üzerine, 2 cm çaplı, 15 mm uzunluklu, 6 adet çelik dolu kesitli silindirler ve bu silindirler üzerine yükleme plakası, onun üzerine de yük hücresi yerleştirilir. Yükleme için hidrolik krika kullanılır.

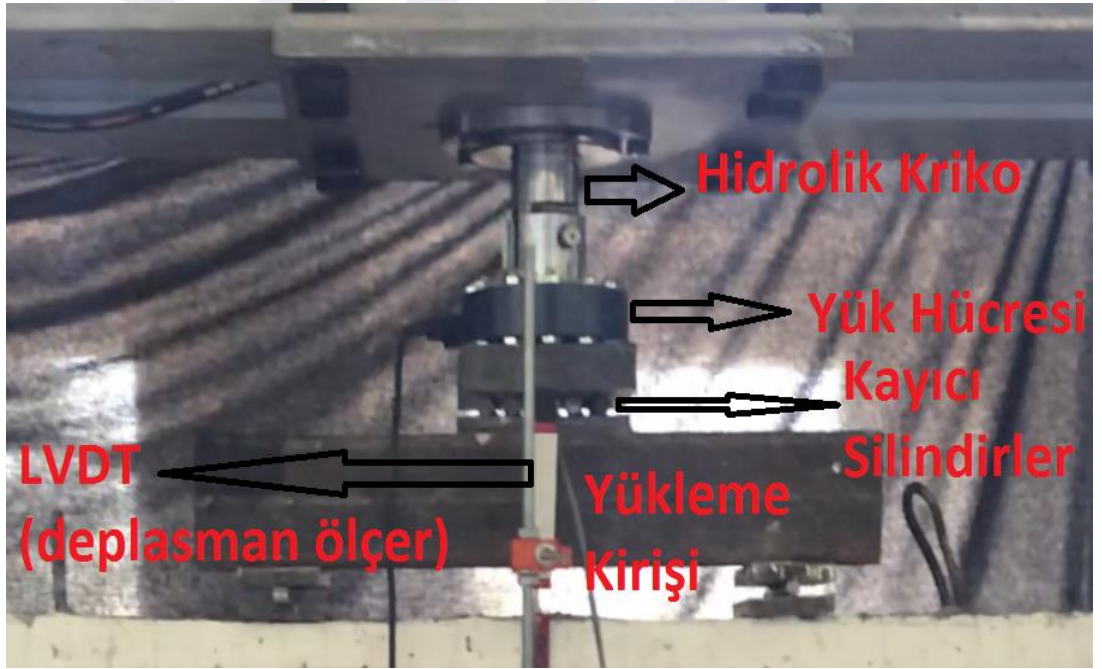
Kiriş orta noktasına düşey yerdeğiştirmeyi ölçmek amacıyla elektronik deplasman ölçer (LVDT) yerleştirilir.



Şekil 2.9. Deney Yükleme Sistemi



Şekil 2.10. Deney Düzenegi



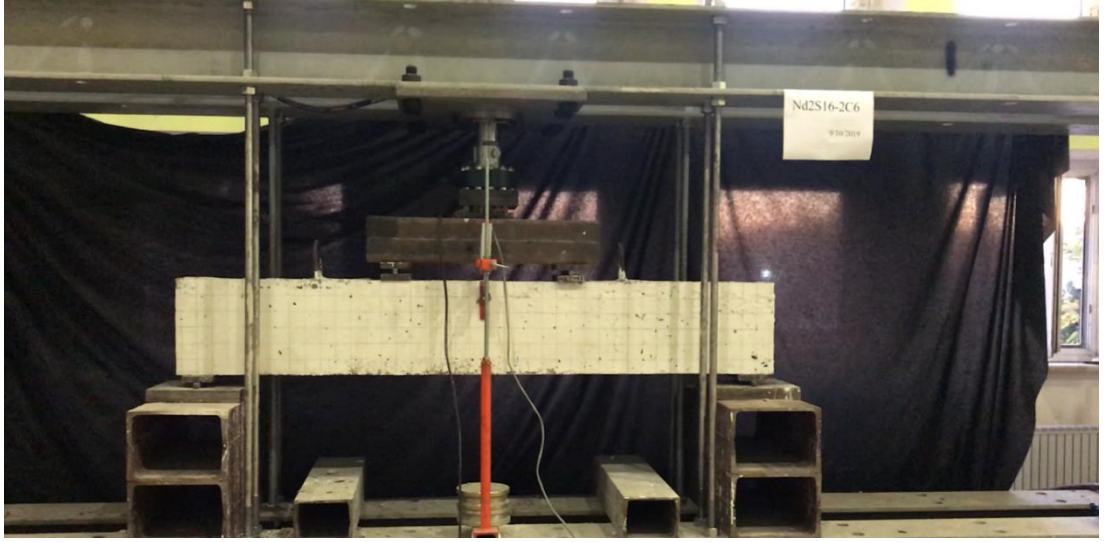
Şekil 2.11. Yükleme Düzenegi

2.5. Deneyler

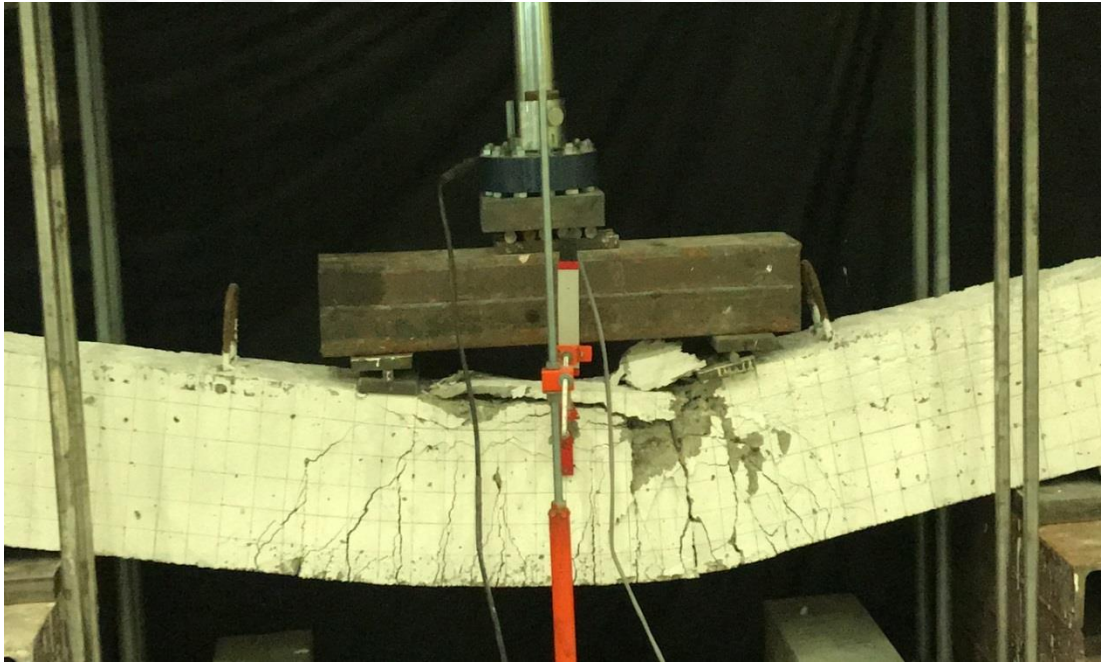
2.5.1. Nd2S16-2C6 Kirişı

Normal dayanımlı bu kirişin basınç bölgesinde 2 adet 10 mm çapında çelik donatı, çekme bölgesinde 2 adet 6 mm çapında CFRP donatı ve bu donatı merkezinden 30 mm yukarısında 2 adet 16 mm çapında çelik donatı, etriyeler 5 mm çapında 75 mm aralıklarla tasarlanan hibrit kirişi dört noktalı eğilme deneyi uygulanmıştır.

Hidrolik krikoyardımyla yükleme yapılan kirişte yük-deplasman değerleri bilgisayar yardımyla kayıt edilmiştir. Ayrıca çatlak genişlikleri de ölçülmüştür. Yük 82 kN ulaştığında deplasman 3,62 mm dir. 8 adet eğilme çatlağı oluşmuştur. En büyük çatlak boyu basınç yüzeyine 10 cm mesafede gözlenmiştir. Yük 120 kN ulaştığında deplasman 5,36 mm ve sağ mesnete yakın kesme çatlağı oluşmuştur. Eğilme çatlağı sayısı 15 e yükselmiştir. Yük 170 kN geldiğinde deplasman 18 mm ve en geniş çatlak 1mm ve en büyük çatlak boyu basınç yüzeyine 4 cm mesafede gözlenmiştir. Yük 180 kN olduğunda deplasman 28,8 mm olarak gözlenmiştir. Sol mesnette ve iki yük noktası arasındaki kabuk betonunda ezilme görülmüştür. Yük 190 kN'a ulaştığında deplasman 51 mm ve en büyük çatlak genişliğı 3 mm dir. Yük 200 kN'a ulaştıktan sonra yükte ani düşmeler meydana gelmiştir ve deney güvenliğı için 93 kN da deplasman 122 mm ulaştığında deneye son verilmiştir.



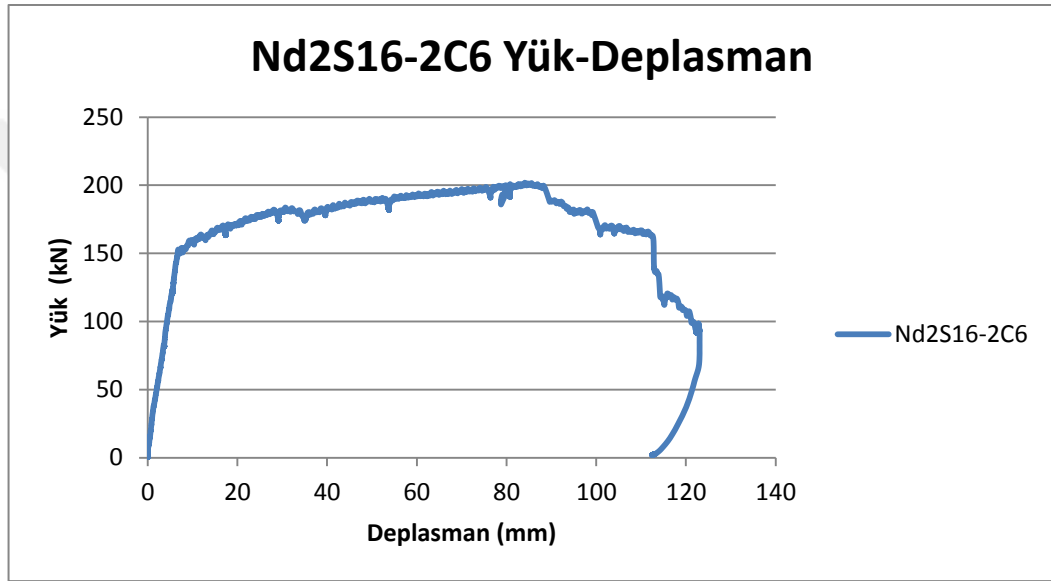
Şekil 2.12. Nd2S16-2C6 Kirişı Deney Başlangıcı



Şekil 2.13. Nd2S16-2C6 Kirişı Deney Sonu

2.5.2. Nd2S16-2C6 Kirişı Yük-Deplasman Grafiği

LVDT ile yük-deplasman grafiği bilgisayar yardımıyla okuma alınarak kaydedilmiştir. LVDT nin kapasitesinin bittiği yerlerde ise LVDT ye resetleme yapılmıştır. Resetlemeden sonraki okumaları da resetlenmeden önceki değer üzerine eklenerek grafik hazırlanmıştır.



Şekil 2.14. Nd2S16-2C6 Kirişinin Yük-Deplasman Grafiği

2.5.3. Nd2S16-2C8 Kirişı

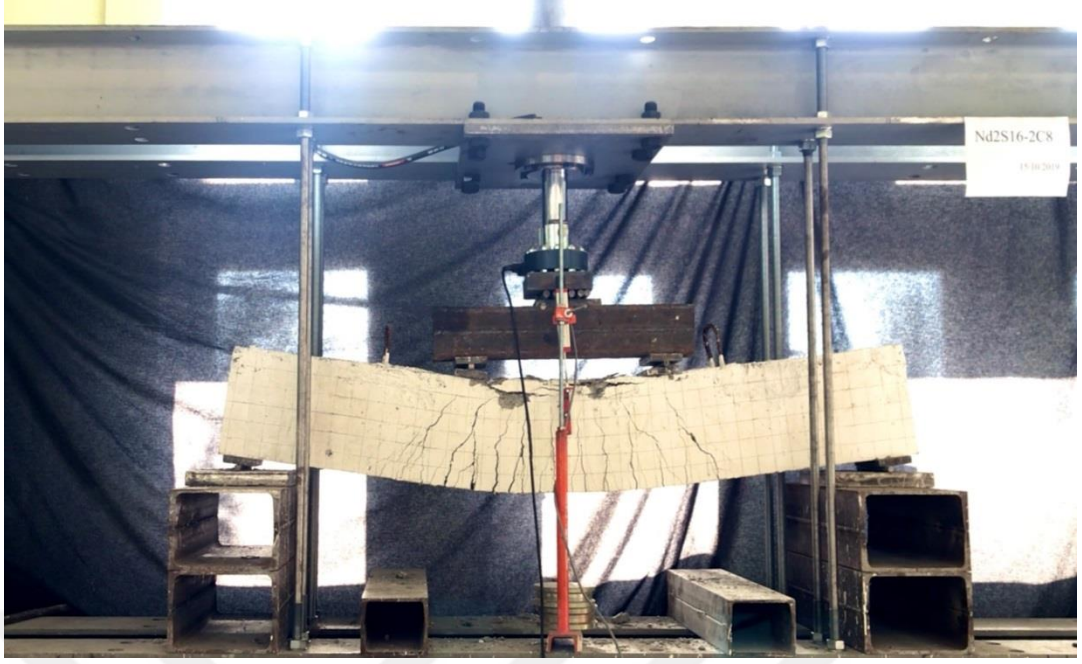
Normal dayanımlı bu kirişin basınç bölgesinde 2 adet 10 mm çapında çelik donatı, çekme bölgesinde 2 adet 8 mm çapında CFRP donatı ve bu donatı merkezinden 30 mm yukarısında 2 adet 16 mm çapında çelik donatı, etriyeler 5 mm çapında 75 mm aralıklarla tasarlanan hibrit kirişı dört noktalı eğilme deneyi uygulanmıştır.

Hidrolik kriko yardımıyla yükleme yapılan kirişte yük-deplasman değerleri bilgisayar yardımıyla kayıt edilmiştir. Ayrıca çatlak genişlikleri de ölçülmüştür. Yük

50 kN deplasman 2,65 mm 4 adet kılcal düzeyde eğilme çatlakları oluşmuştur. Yük 100 kN deplasman 4,92 mm eğilme çatlağı 8 e yükselmiştir ve sağ mesnete yakın 1 tane kesme çatlağı vardır. Yük 150 kN deplasman 7,40 mm en geniş eğilme çatlağı 1 mm nin altında , sol mesnette kesme çatlağı oluşmuştur ve en büyük eğilme çatlağı boyu beton basınç yüzeyine 8 cm mesafede gözlenmiştir. Yük 190 kN deplasman 40 mm, en geniş eğilme çatlağı 3 mm ve kabuk betonunda kabarma olmuştur. Yük 200 kN deplasman 70,25 mm en büyük eğilme çatlağı genişliği 4 mm olarak gözlenmiştir. Yük 180 kN deplasman 79,25 mm en büyük eğilme çatlağı genişliği 5 mm gözlenmiştir. Yük düşmeye devam etmiştir. Yük 175 kN deplasman 111,40 mm en büyük eğilme çatlağı genişliği 6 mm olmuştur. Bu aşamada deney güvenliği için deneye son verilmiştir.



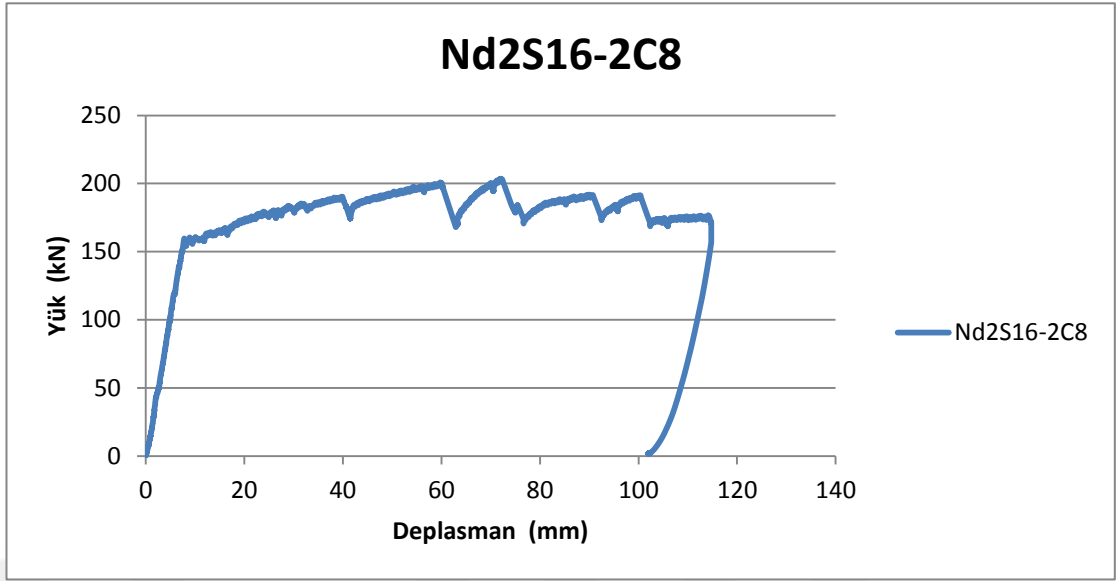
Şekil 2.15. Nd2S16-2C8 Kirişi Deney Başlangıcı



Şekil 2.16. Nd2S16-2C8 Kirişi Deney Sonu

2.5.4. Nd2S16-2C8 Kirişi Yük-Deplasman Grafiği

LVDT ile yük-deplasman grafiği bilgisayar yardımıyla okuma alınarak kaydedilmiştir. LVDT nin kapasitesinin bittiği yerlerde ise LVDT ye resetleme yapılmıştır. Resetlemeden sonraki okumaları da resetlenmeden önceki değer üzerine eklenerek grafik hazırlanmıştır.



Şekil 2.17. Nd2S16-2C8 Kirişi Yük-Deplasman Grafiği

2.5.5. Nd5S10-2C6 Kirişi

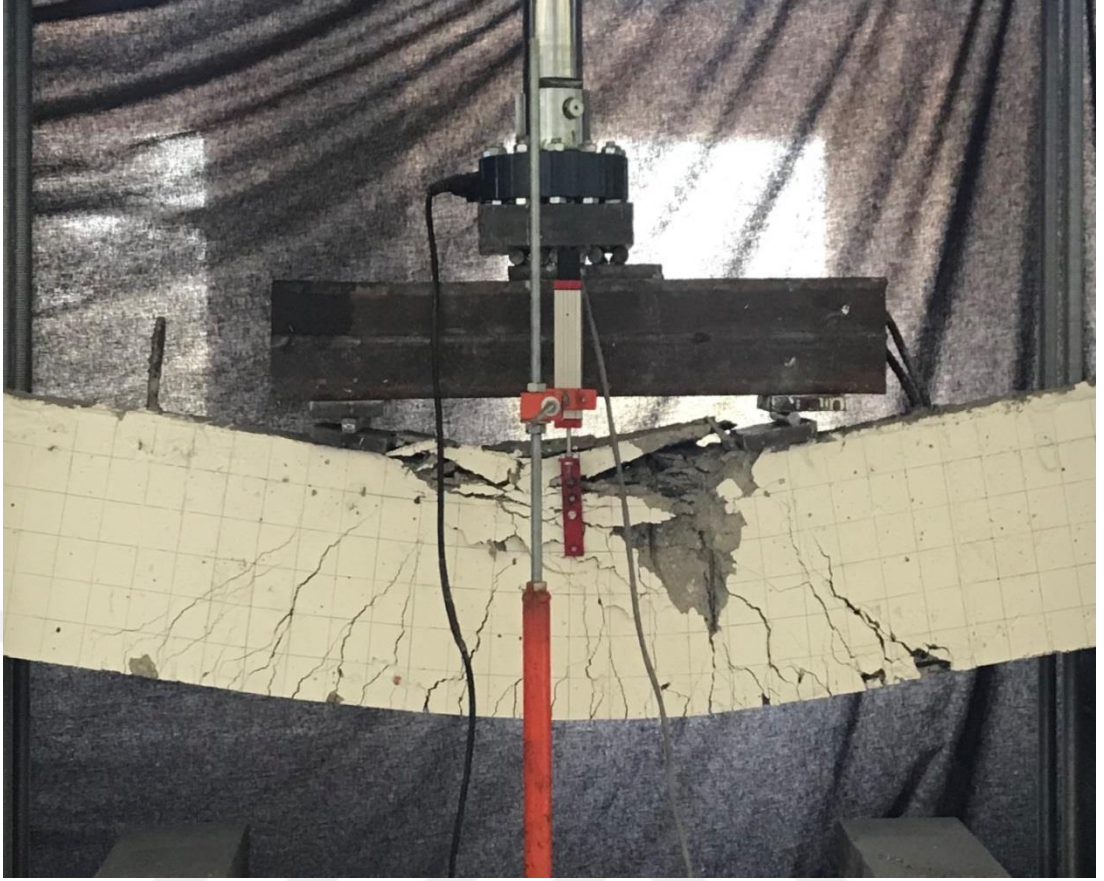
Normal dayanımlı bu kirişin basınç bölgesinde 2 adet 10 mm çapında çelik, çekme bölgesinde 2 adet 6 mm çapında CFRP donatı ve bu donatı merkezinden 30 mm yukarısında 5 adet 10 mm çapında çelik donatı, etriyeler 5 mm çapında 75 mm aralıklarla tasarlanan hibrit kirişi dört noktalı eğilme deneyi uygulanmıştır.

Hidrolik kriko yardımıyla yükleme yapılan kirişte yük-deplasman değerleri bilgisayar yardımıyla kayıt edilmiştir. Ayrıca çatlak genişlikleri de ölçülmüştür. Yük 72 kN deplasman 2,87 mm kılcal düzeyde 5 tane eğilme çatlakları görülmüştür. Yük 120 kN deplasman 5,20 mm toplam eğilme çatlakları 7 tane ve her iki mesnetten olmak üzere 2 adet kesme çatlakları görülmüştür. Yük 170 kN deplasman 19 mm en geniş eğilme çatlakları 1,5 mm gözlenmiştir. Yük 200 kN dan 181 kN a düşmüş ve donatıda kopma olmuştur, deplasman 55 mm en geniş eğilme çatlakları 3,5 mm gözlenmiştir. Yük 210 kN dan 186 kN a düştü donatıda kopma olmuştur. Deplasman 66,9 mm en geniş eğilme çatlakları 4 mm gözlenmiştir. Yük 205 kN dan 199 kN a düşmüş ve donatıda kopma olmuştur. Deplasman 84 mm olduğunda en geniş eğilme

çatlağı 5 mm'ye ulaşmıştır. Yük 200 kN dan 194 kN a düşmüştür, donatıda kopma olmuştur. Deplasman 86,09 mm en geniş çatlak genişliği 7 mm gözlenmiştir. Yük 190 kN' dan 167 kN a düşmüştür ve donatıda yeni bir kopma olmuştur. Deplasman 108,6 mm ulaştığında en geniş eğilme çatlağı 8 mm'ye ulaşmıştır. Deney güvenliği için deneye son verilmiştir.



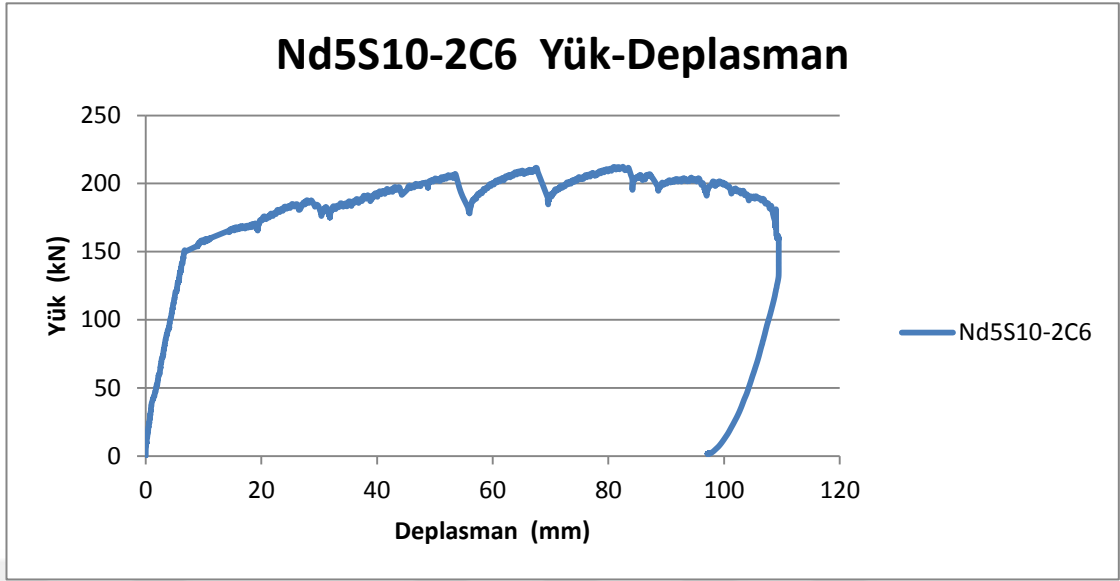
Şekil 2.18. Nd5S10-2C6 Kiriş Deney Başlangıcı



Şekil 2.19. Nd5S10-2C6 Kiriş Deneyi Sonu

2.5.6. Nd5S10-2C6 Kiriş Yük-Deplasman Grafiği

LVDT ile yük-deplasman grafiği bilgisayar yardımıyla okuma alınarak kaydedilmiştir. LVDT nin kapasitesinin bittiği yerlerde ise LVDT ye resetleme yapılmıştır. Resetlemeden sonraki okumaları da resetlenmeden önceki değer üzerine eklenerek grafik hazırlanmıştır.



Şekil 2.20. Nd5S10-2C6 Kirişi Yük-Deplasman Grafiği

2.5.7. Nd5S10-2C8 Kirişi

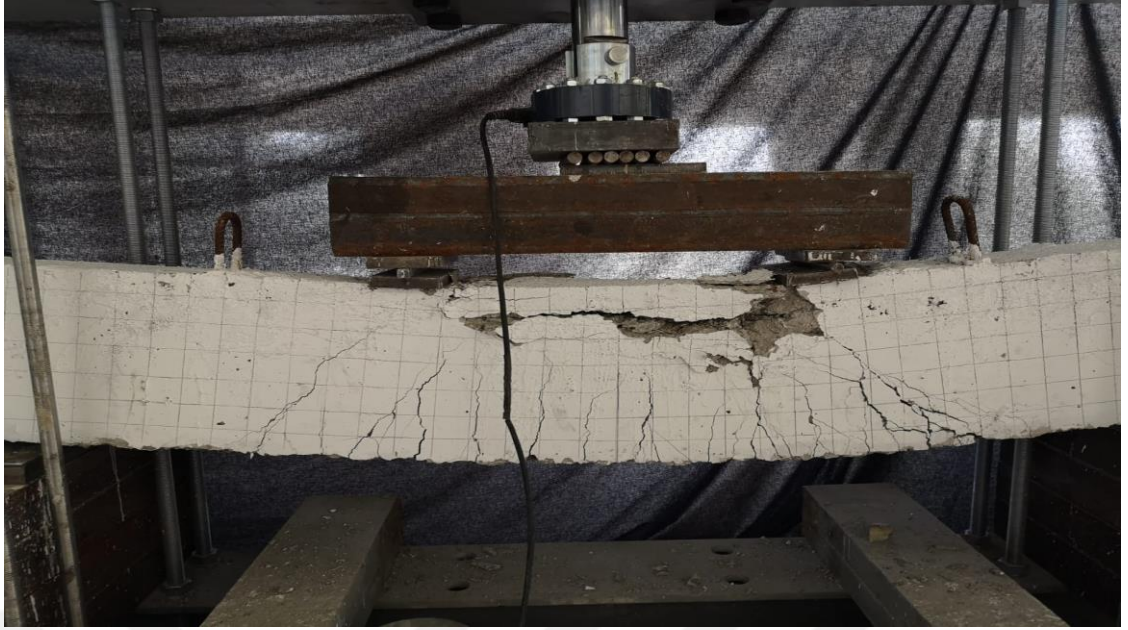
Normal dayanımlı bu kirişin basınç bölgesinde 2 adet 10 mm çapında çelik, çekme bölgesinde 2 adet 6 mm çapında CFRP donatı ve bu donatı merkezinden 30 mm yukarısında 5 adet 10 mm çapında çelik donatı, etriyeler 5 mm çapında 75 mm aralıklarla tasarlanan hibrit kirişi dört noktalı eğilme deneyi uygulanmıştır.

Hidrolik kriko yardımıyla yükleme yapılan kirişte yük-deplasman değerleri bilgisayar yardımıyla kayıt edilmiştir. Ayrıca çatlak genişlikleri de ölçülmüştür. Yük 100 kN deplasman 3,17 mm 6 tane kılcal boyutta eğilme çatlakları gözlenmiştir ve en büyük eğilme çatlaklarının boyu beton basınç yüzeyine 15 cm mesafede gözlenmiştir. Yük 150 kN deplasman 5,35 mm toplam 9 adet kılcal boyutta eğilme çatlakları gözlenmiştir ve sol mesnete yakın 2 adet kesme çatlakları gözlenmiştir. Yük 186 kN deplasman 13,46 mm en büyük eğilme çatlaklarının boyu beton basınç yüzeyine 8 cm mesafede ve en geniş eğilme çatlakları 1 mm gözlenmiştir. Yük 200 kN deplasman 22,56 mm iki yük arasındaki kabuk betonda ezilme gözlenmiştir ve en geniş eğilme çatlakları 2 mm'ye ulaşmıştır. Yük 172 kN'a düştü donatıda kopma olmuştur ve

deplasman 35,83 mm ve en geniş eğilme çatlağı 3 mm gözlenmiştir. Yük 208 kN deplasman 53 mm en geniş eğilme çatlağı 3,5 mm gözlenmiştir. Yük 215 kN dan 191 kN a düşmüş ve donatıda kopma meydana gelmiştir, deplasman 72,72 gözlenmiştir. Yük 214 kN dan 192 kN a düşmüş ve donatıda kopma meydana gelmiştir, deplasman 82,8 mm en geniş eğilme çatlağı 4 mm olarak gözlenmiştir. Yük 202 kN deplasman 108,9 mm en geniş eğilme çatlağı 6 mm gözlenmiştir. Deney güvenliği için deneye son verilmiştir.



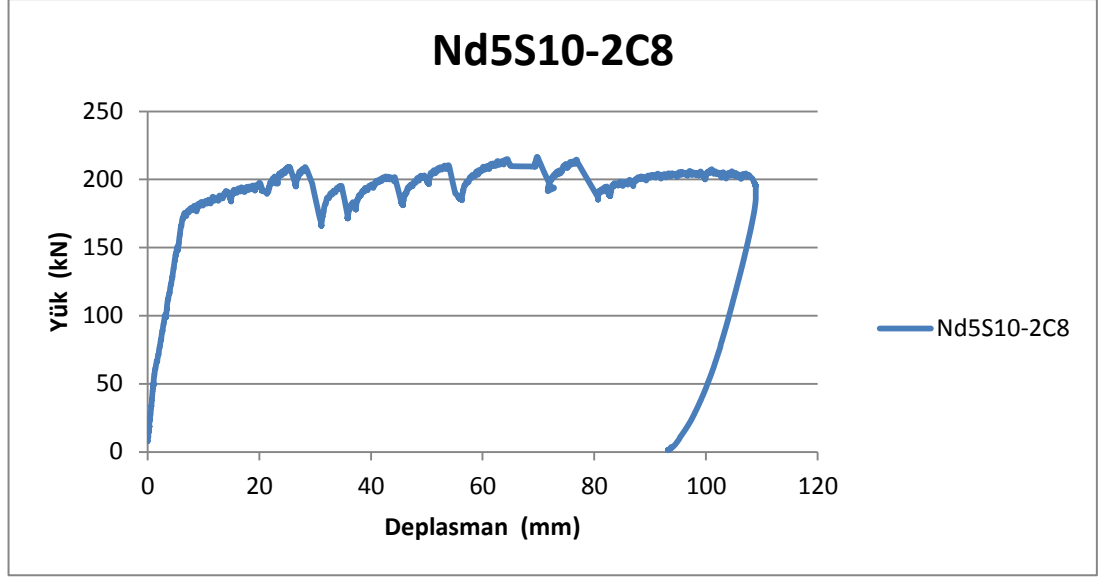
Şekil 2.21. Nd5S10-2C8 Kirişi Deney Başlangıcı



Şekil 2.22. Nd5S10-2C8 Kirişi Deney Sonrası

2.5.8. Nd5S10-2C8 Kirişi Yük-Deplasman Grafiği

LVDT ile yük-deplasman grafiği bilgisayar yardımıyla okuma alınarak kaydedilmiştir. LVDT nin kapasitesinin bittiği yerlerde ise LVDT ye resetleme yapılmıştır. Resetlemeden sonraki okumaları da resetlenmeden önceki değer üzerine eklenerek grafik hazırlanmıştır.



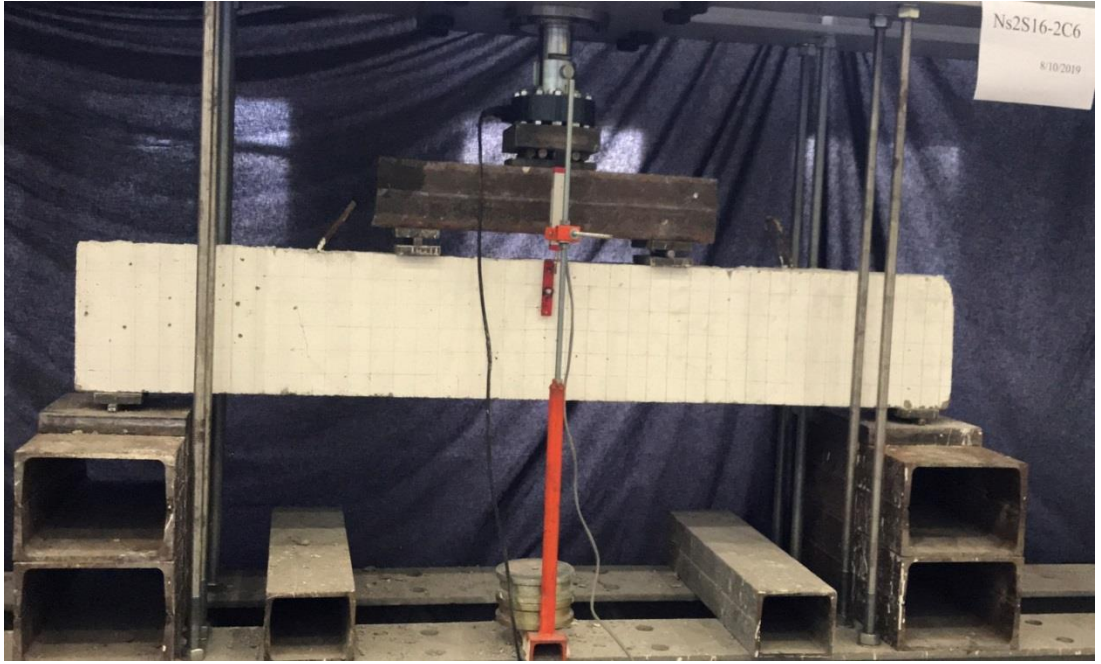
Şekil 2.23. Nd5S10-2C8 Kirişi Yük-Deplasman Grafiği

2.5.9. Ns2S16-2C6 Kirişi

Normal dayanımlı bu kirişin basınç bölgesinde 2 adet 10 mm çapında çelik, çekme bölgesinde iç kısımda 2 adet 6 mm çapında CFRP donatı, dış kısımda 2 adet 16 mm çapında çelik donatı, etriyeler 5 mm çapında 75 mm aralıklarla tasarlanan hibrit kirişi dört noktalı eğilme deneyi uygulanmıştır.

Hidrolik krikoyla yüklemeye yapılan kirişte yük-deplasman değerleri bilgisayar yardımıyla kayıt edilmiştir. Ayrıca çatlak genişlikleri de ölçülmüştür. Yük 60 kN deplasman 3,46 mm 4 tane kılcal boyutta eğilme çatlakları oluşmuştur. Yük 100 kN deplasman 5,51 mm sağ mesnete yakın 2 tane kesme çatlakları gözlenmiş ve kesme çatlakları boyu eğilme çatlakları boyundan fazla olarak gözlenmiştir. Yük 144 kN deplasman 7,44 mm sağ mesnet tarafında toplam 3 tane kesme çatlakları, sol mesnete yakın toplam 2 tane kesme çatlakları gözlenmiş toplam 6 tane eğilme çatlakları ve en büyük kesme çatlaklarının boyu beton basınç yüzeyine 5 cm mesafede gözlenmiştir. Yük 160 kN deplasman 9,25 mm en geniş eğilme çatlakları 1 mm gözlenmiştir. Yük 180 kN deplasman 27 mm en geniş eğilme çatlakları 2 mm gözlenmiştir. Yük 190 kN deplasman 34,44 mm en geniş eğilme çatlakları 3 mm ve basınç yüzeyindeki kabuk betonda ezilme gözlenmiştir. Yük 200 kN deplasman 46,3 mm en geniş eğilme

çatlağı 5 mm gözlenmiştir. Yük 210 kN deplasman 89,5 mm gözlenmiştir. Yük 200 kN dan 210 kN a çıkmış ve deplasman 92,1 mm en geniş eğilme çatlağı 6 mm olarak gözlenmiştir. Yük 194 kN deplasman 134,62 mm en geniş eğilme çatlağı 15 mm gözlenmiştir. Yük 200 kN dan 190 kN düşmüş ve deplasman 172,15 mm gözlenmiştir. Yük 187 kN düşmüştür, deplasman 174,77 mm de deney güvenliği için deneye son verilmiştir.



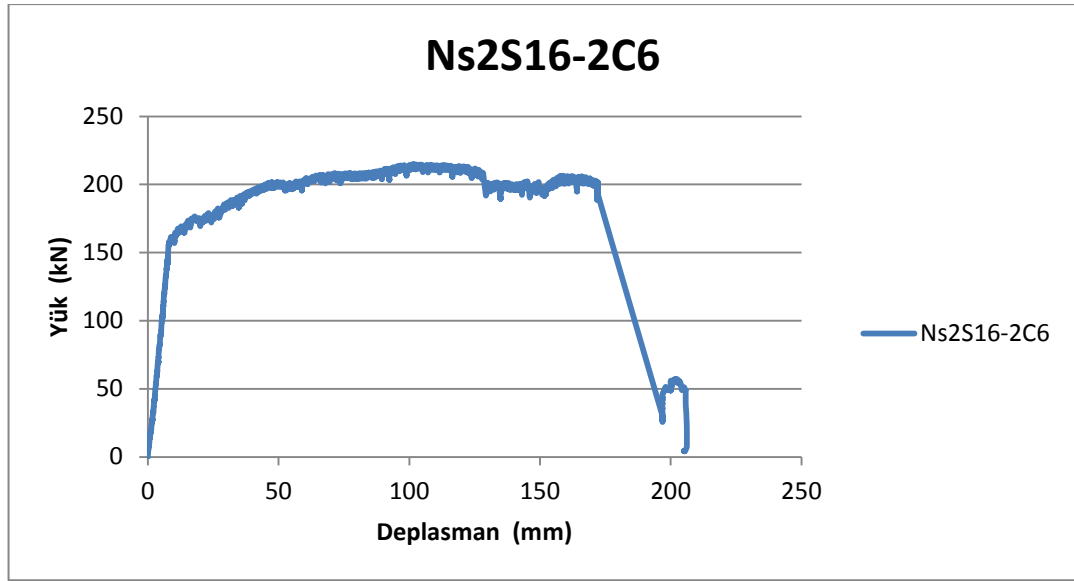
Şekil 2.24. Ns2S16-2C6 Kirişi Deney Başlangıcı



Şekil 2.25. Ns2S16-2C6 Kirişi Deney Sonu

2.5.10. Ns2S16-2C6 Kirişi Yük-Deplasman Grafiği

LVDT ile yük-deplasman grafiği bilgisayar yardımıyla okuma alınarak kaydedilmiştir. LVDT nin kapasitesinin bittiği yerlerde ise LVDT ye resetleme yapılmıştır. Resetlemeden sonraki okumaları da resetlenmeden önceki değer üzerine eklenerek grafik hazırlanmıştır.



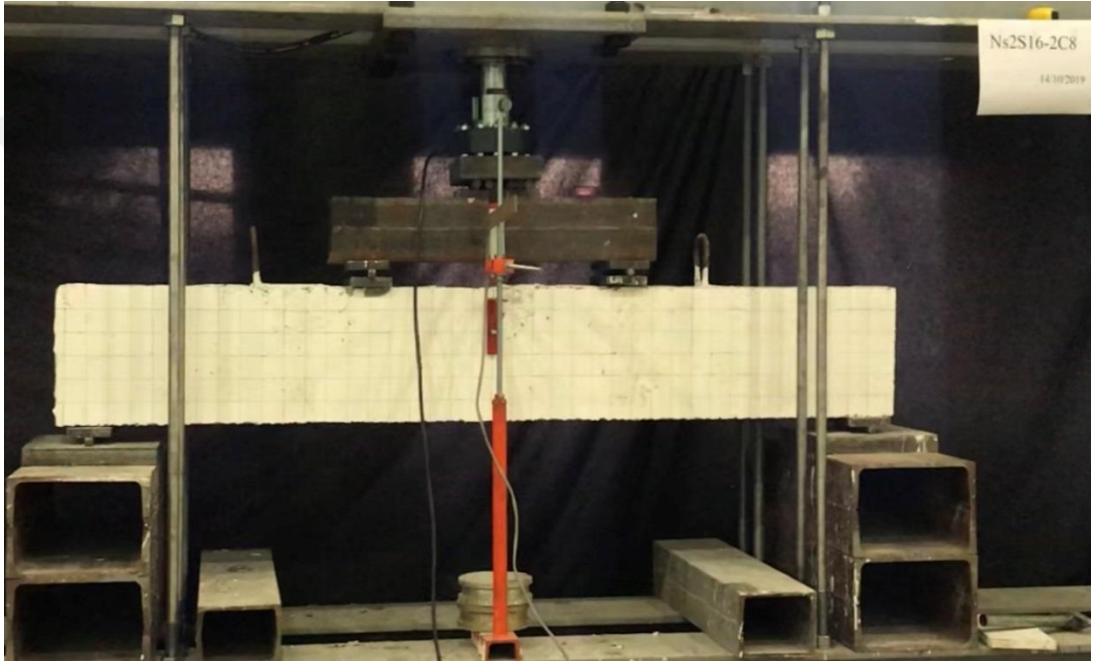
Şekil 2.26. Ns2S16-2C6 Kirişi Yük-Deplasman Grafiği

2.5.11. Ns2S16-2C8 Kirişi

Normal dayanımlı bu kirişin basınç bölgesinde 2 adet 10 mm çapında çelik, çekme bölgesinde iç kısımda 2 adet 6 mm çapında CFRP donatı, dış kısımda 2 adet 16 mm çapında çelik donatı, etriyeler 5 mm çapında 75 mm aralıklarla tasarlanan hibrit kirişi dört noktalı eğilme deneyi uygulanmıştır.

Hidrolik krika yardımıyla yükleme yapılan kirişte yük-deplasman değerleri bilgisayar yardımıyla kayıt edilmiştir. Ayrıca çatlak genişlikleri de ölçülmüştür. Yük 70 kN deplasman 3,36 mm 3 tane kılcal genişlikte eğilme çatlakları gözlenmiştir. Yük 100 kN deplasman 4,81 mm toplam 8 tane kılcal boyutta eğilme çatlakları oluşmuş ve en büyük eğilme çatlakları boyu beton basınç yüzeyine 12 cm mesafede gözlenmiştir. Yük 140 kN deplasman 6,84 mm toplam 11 tane kılcal boyutta eğilme çatlakları gözlenmiştir. Sağ ve sol mesnete yakın birer tane kesme çatlakları görülmüştür. Yük 160 kN deplasman 8,28 mm ve en geniş eğilme çatlakları 1 mm gözlenmiştir. Yük 173 kN deplasman 27 mm en geniş eğilme çatlakları 2 mm ve iki yük noktası arasındaki kabuk betonda kabarma gözlenmiştir. Yük 190 kN deplasman 54,98 mm en geniş

eğilme çatlağı 3 mm olarak gözlenmiştir. Yük 200 kN deplasman 70,4 mm en geniş eğilme çatlağı 4 mm gözlenmiştir. Yük 206 kN dan 190 kN a düşmüş, donatıda kopma olmuş ve deplasman 121,4 mm en geniş eğilme çatlağı 8 mm gözlenmiştir. Yük 166 kN a düşmüştür ve deplasman 141,4 mm gözlenmiştir. Yük 165 kN dan 115 kN a düşmüş ve donatı da kopma meydana gelmiş ve deplasman 174,4 mm gözlenmiştir. Deney güvenliği için deneye son verilmiştir.



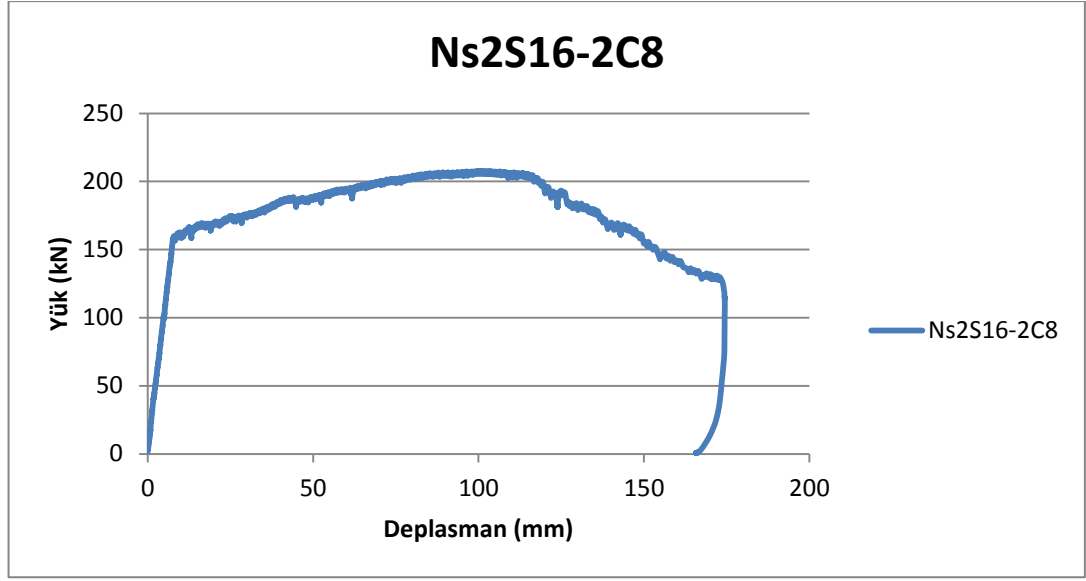
Şekil 2.27. Ns2S16-2C8 Kirişi Deney Başlangıcı



Şekil 2.28. Ns2S16-2C8 Kirişi Deney Sonu

2.5.12. Ns2S16-2C8 Kirişi Yük-Deplasman Grafiği

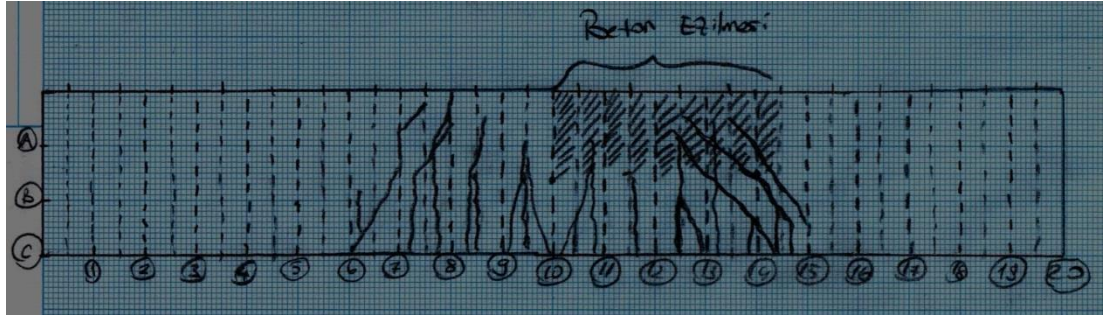
LVDT ile yük-deplasman grafiği bilgisayar yardımıyla okuma alınarak kaydedilmiştir. LVDT nin kapasitesinin bittiği yerlerde ise LVDT ye resetleme yapılmıştır. Resetlemeden sonraki okumaları da resetlenmeden önceki değer üzerine eklenerek grafik hazırlanmıştır.



Şekil 2.29. Ns2S16-2C8 Kirişi Yük-Deplasman Grafiği

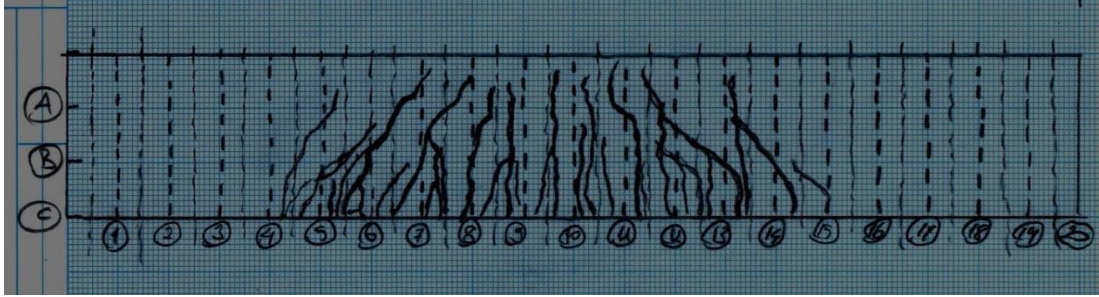
2.6. Kirişlerin Deney Sonundaki Çatlak Haritaları

2.6.1. Nd2S16-2C6 Kirişi Çatlak Haritası



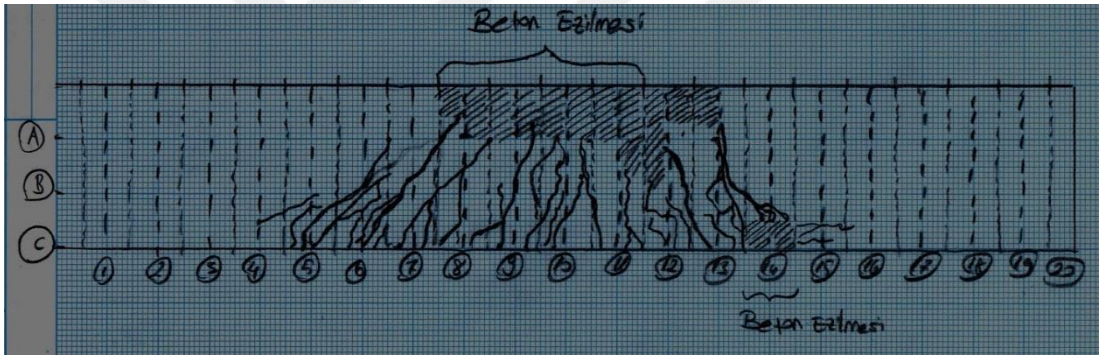
Şekil 2.30. Nd2S16-2C6 Çatlak Haritası

2.6.2. Nd2S16-2C8 Kirişı Çatlak Haritası



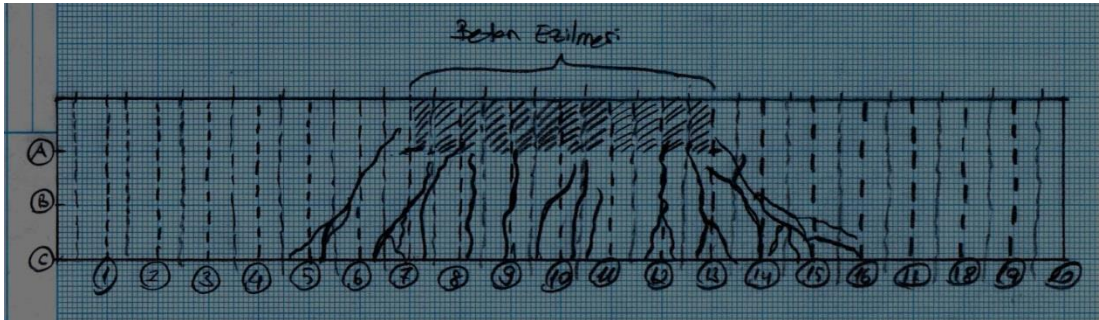
Şekil 2.31. Nd2S16-2C8 Çatlak Haritası

2.6.3. Nd5S10-2C6 Kirişı Çatlak Haritası



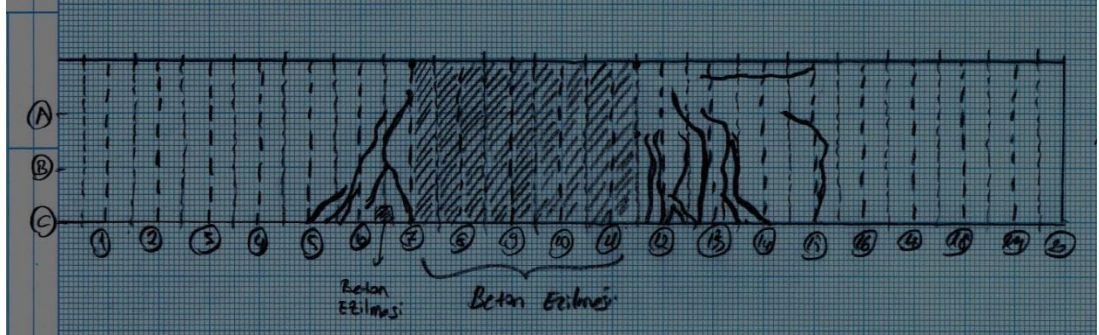
Şekil 2.32. Nd5S10-2C6 Çatlak Haritası

2.6.4. Nd5S10-2C8 Kirişı Çatlak Haritası



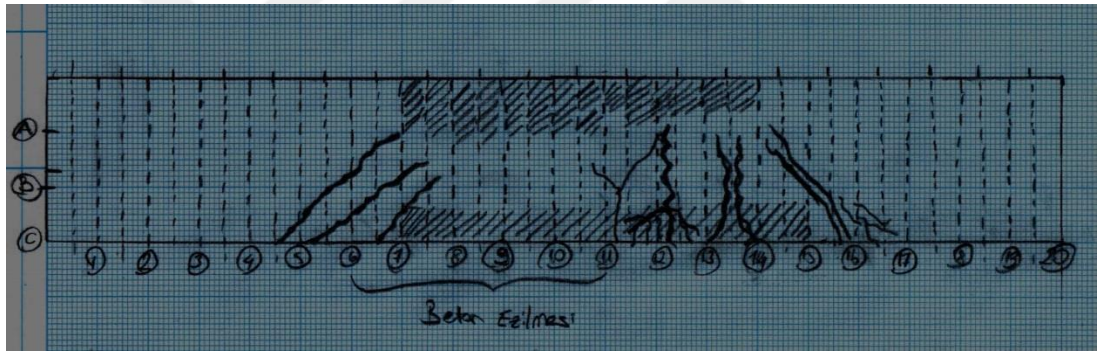
Şekil 2.33. Nd5S10-2C8 Çatlak Haritası

2.6.5. Ns2S16-2C6 Kirişi Çatlak Haritası



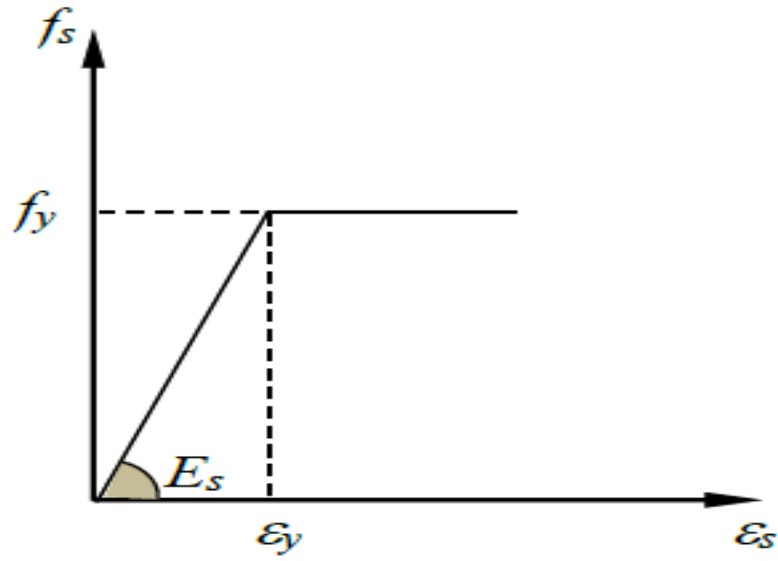
Şekil 2.34. Ns2S16-2C6 Çatlak Haritası

2.6.6. Ns2S16-2C8 Kirişi Çatlak Haritası



Şekil 2.35. Ns2S16-2C8 Çatlak Haritası

3. TEORİK ANALİZ

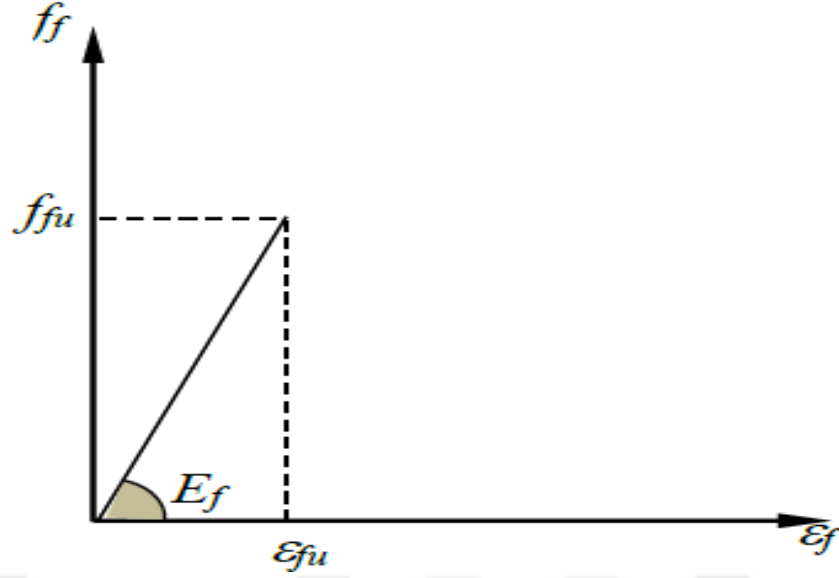


Şekil 3.1. Donatı Çeliği Gerilme Birim Şekil Değiştirme Grafiği

Çeliğin gerilme birim şekil değiştirme ilişkisi için elastoplastik malzeme modeli kullanılmış ve eşitlik ile tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} f_s &= \epsilon_s E_s & \epsilon_s < \epsilon_{sy} \\ f_s &= f_y & \epsilon_s \geq \epsilon_{sy} \end{aligned}$$

FRP donatının gerilme birim şekil değiştirme ilişkisi 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 kapasitesinin 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 adımla aşağıda verilmiştir.

- 1- Basınç bölgesindeki beton 50 tane parçaya bölünmüştür. (Bu sayı artırılıp azaltılabilir.)
- 2- Basınç bölgesinin 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 hesaplanmıştır.
- 5- Moment ve eğrilik hesaplanmıştır.
- 6- Beton birim kısalması için yeni bir değer seçilerek 2-5 adımlar tekrarlanmıştır.

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

$$EI_{eff} = \frac{M}{K}$$

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

$$P = \frac{2M}{a}$$

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

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

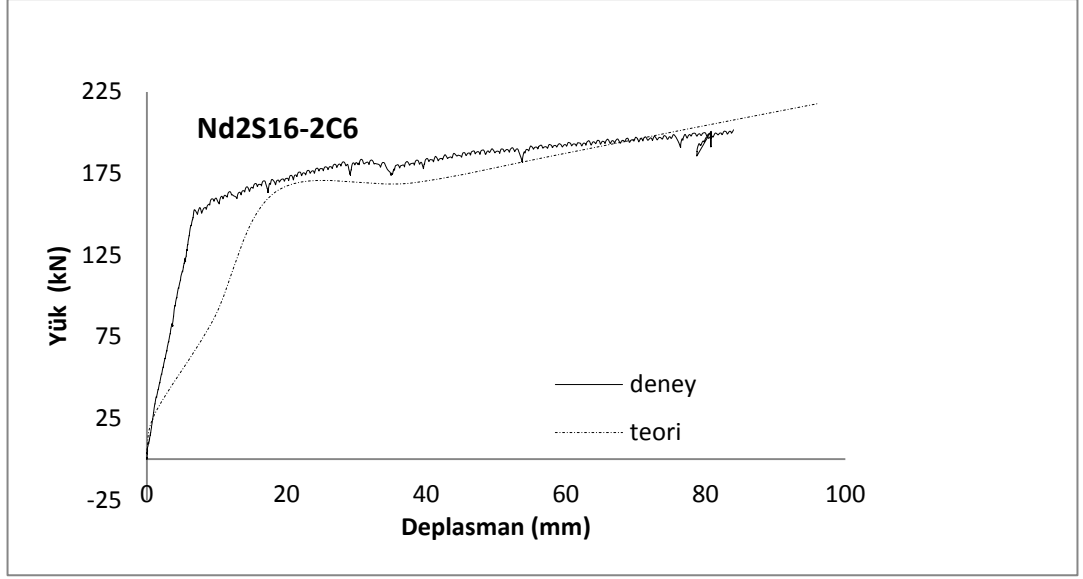
Çalışmada kullanılan deney elemanlarının donatı oranları Çizelge 3.1. de gösterilmiştir. Hibrit kirişlerde etkili donatı oranı, çelik donatı oranının (ρ_s) FRP donatı oranına eşitlik 1 ile dönüştürülmesi ile elde edilmiştir. Hibrit kirişler etkili donatı oranı (ρ_e), dengeli donatı oranından (ρ_{fb}) büyük olacak şekilde donatılandırılmıştır.

$$\rho_e = \rho_s \frac{f_y}{f_{fu}} + \rho_f$$

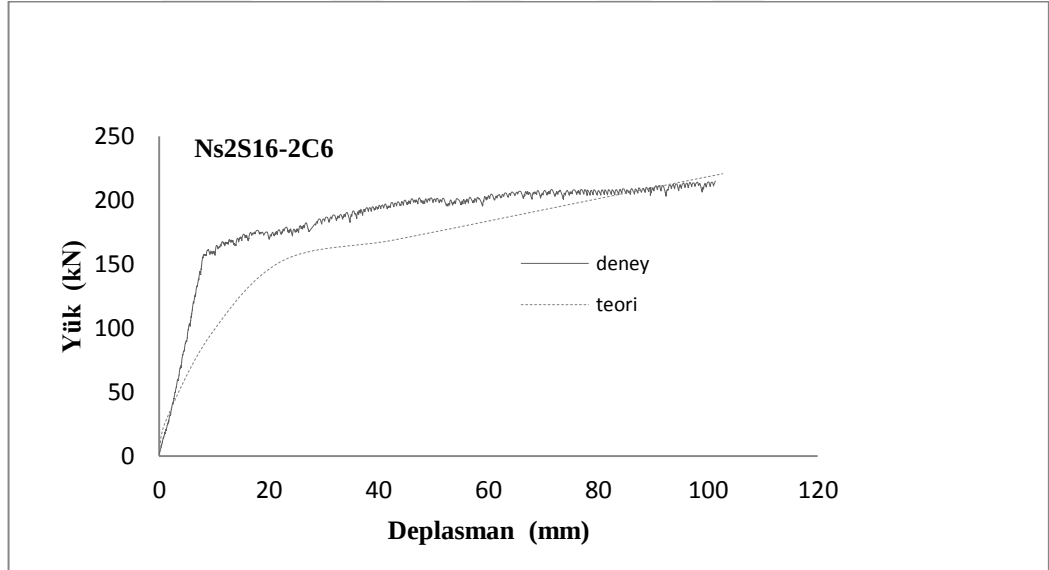
$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f_c}{f_{fu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}}$$

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

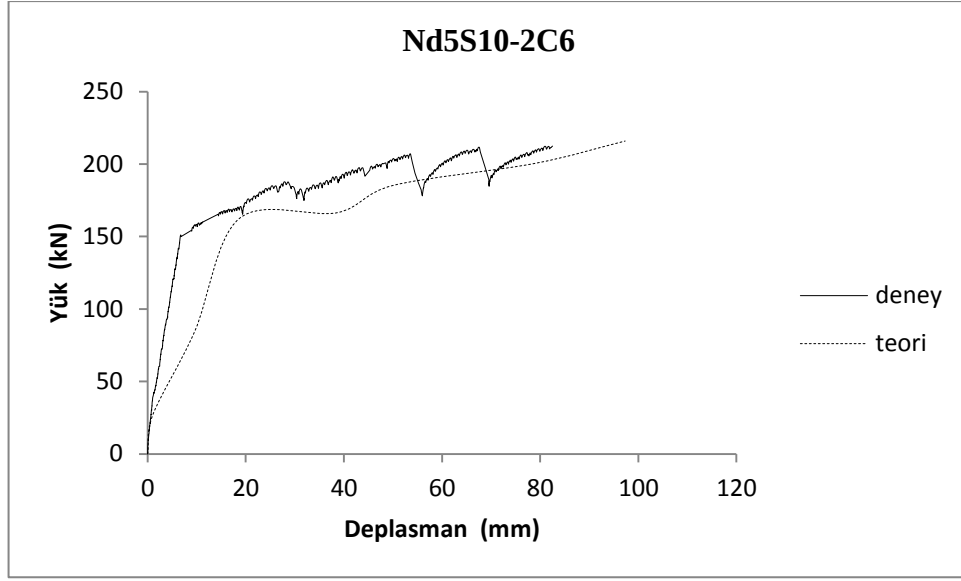
Eleman	n_s	n_f	$\varnothing_s$	$\varnothing_f$	$A_s(\text{mm}^2)$	$A_f(\text{mm}^2)$	$\rho_s(\%)$	$\rho_f(\%)$	$\rho_e(\%)$	$\rho_{fb}(\%)$	
Nd2S16-2C6	2	2	16	6	402	56.5	1.072	0.135	0.330	0.251	Denge Üstü
Ns2S16-2C6	2	2	16	6	402	56.5	0.957	0.135	0.309	0.251	Denge Üstü
Nd5S10-2C6	5	2	10	6	392.7	56.5	1.047	0.135	0.326	0.251	Denge Üstü
Nd2S16-2C8	2	2	16	8	392.7	100.5	1.072	0.239	0.435	0.251	Denge Üstü
Ns2S16-2C8	2	2	16	8	402	100.5	0.957	0.239	0.414	0.251	Denge Üstü
Nd5S10-2C8	5	2	10	8	402	100.5	1.047	0.239	0.430	0.251	Denge Üstü



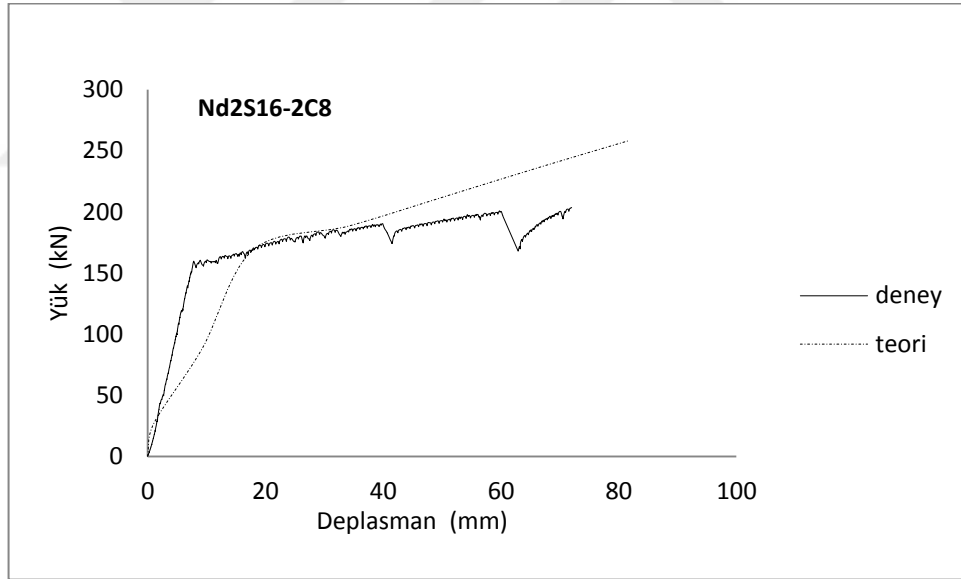
Şekil 3.3. Nd2S16-2C6 Kirişinin Deneysel ve Teorik Grafiği



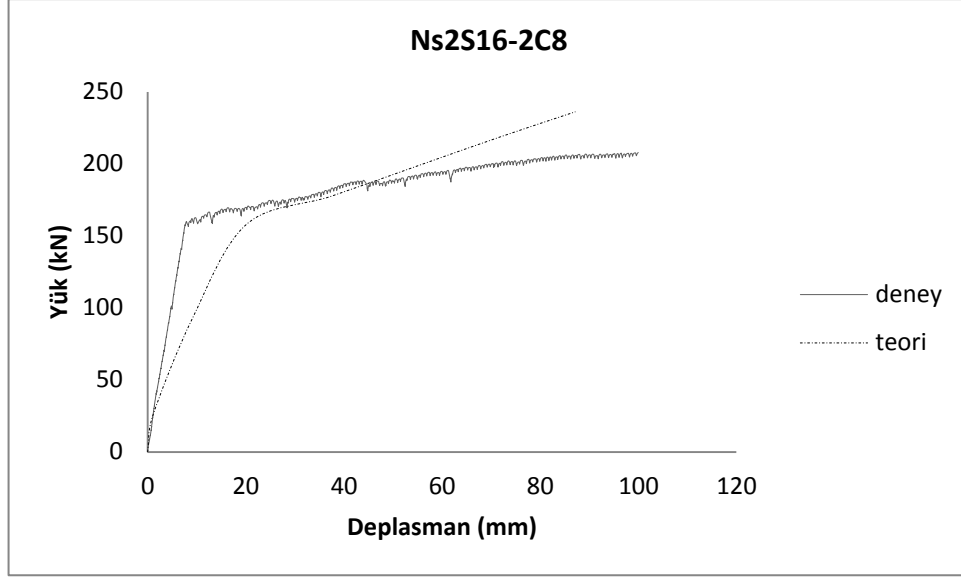
Şekil 3.4. Ns2S16-2C6 Kirişinin Deneysel ve Teorik Grafiği



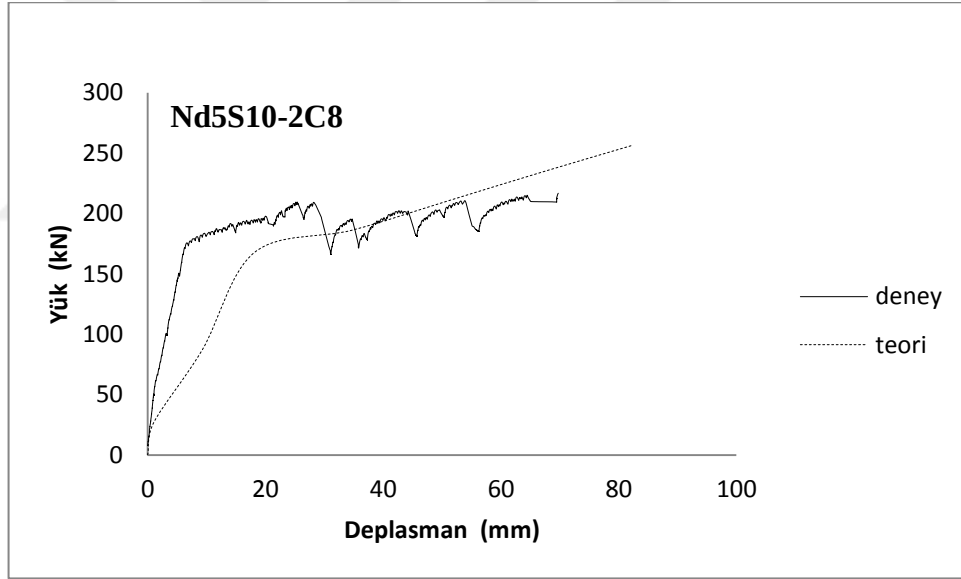
Şekil 3.5. Nd5S10-2C6 Kirişinin DeneySEL ve Teorik Grafiği



Şekil 3.6. Nd2S16-2C8 Kirişinin DeneySEL ve Teorik Grafiği

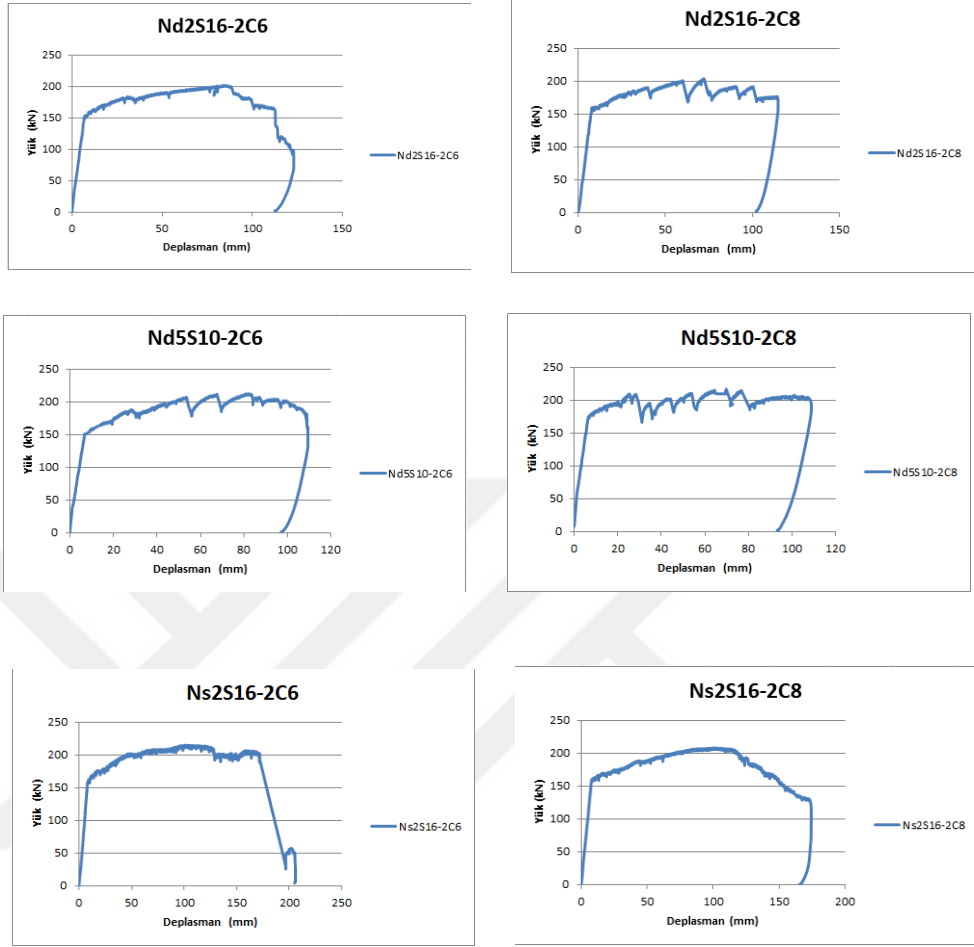


Şekil 3.7. Ns2S16-2C8 Kirişinin Deneysel ve Teorik Grafiği



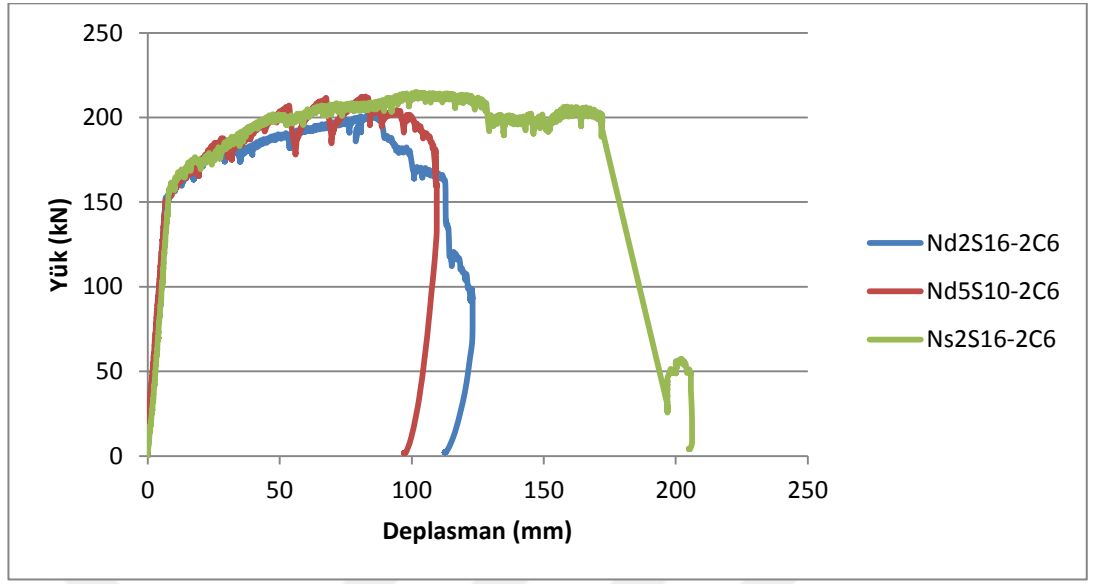
Şekil 3.8. Kirişinin Deneysel ve Teorik Grafiği

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

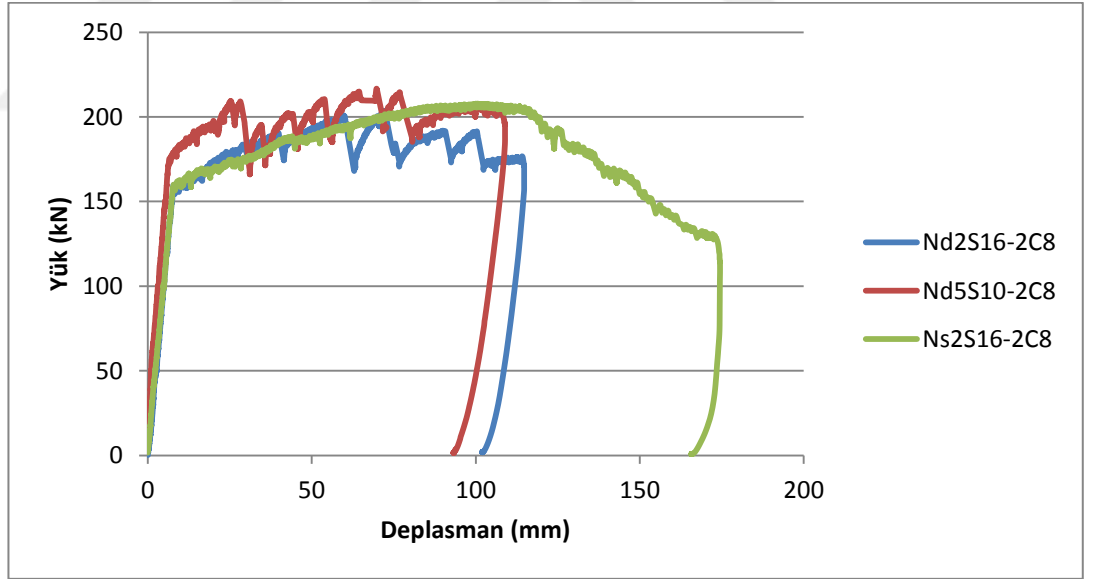


Şekil 4.1. Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri

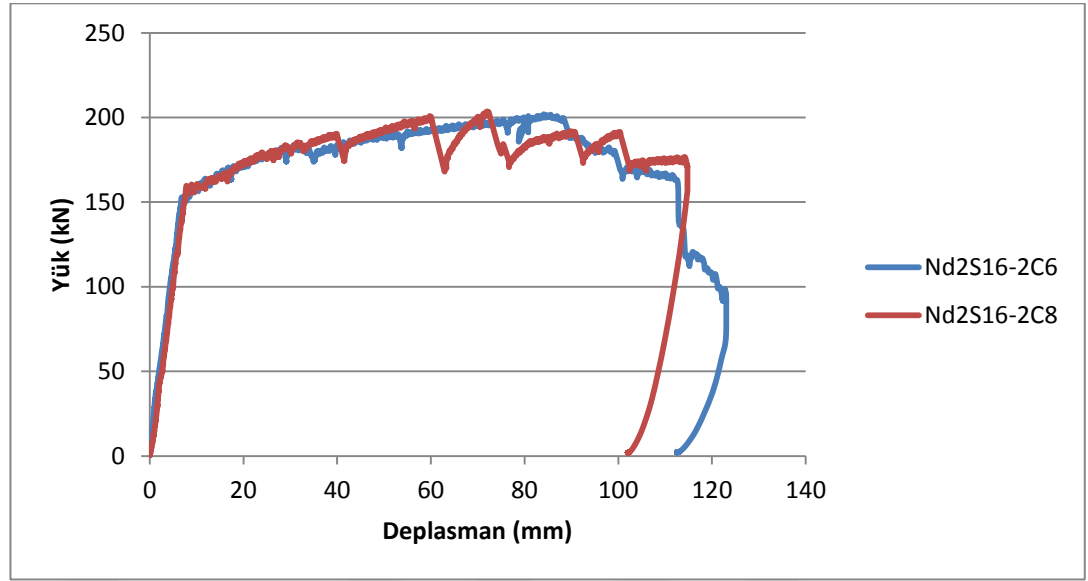
Deney elemanlarının yük- deplasman grafikleri ayrı ayrı incelendiğinde, karbon donatıda kopmanın gerçekleşmesiyle yükte ani düşüş olduğu görülmüştür. Kirişler içindeki çelik donatılar yükün toparlanmasını sağlamakta ve yükün korunarak deplasman artışı gerçekleştirilmektedir.



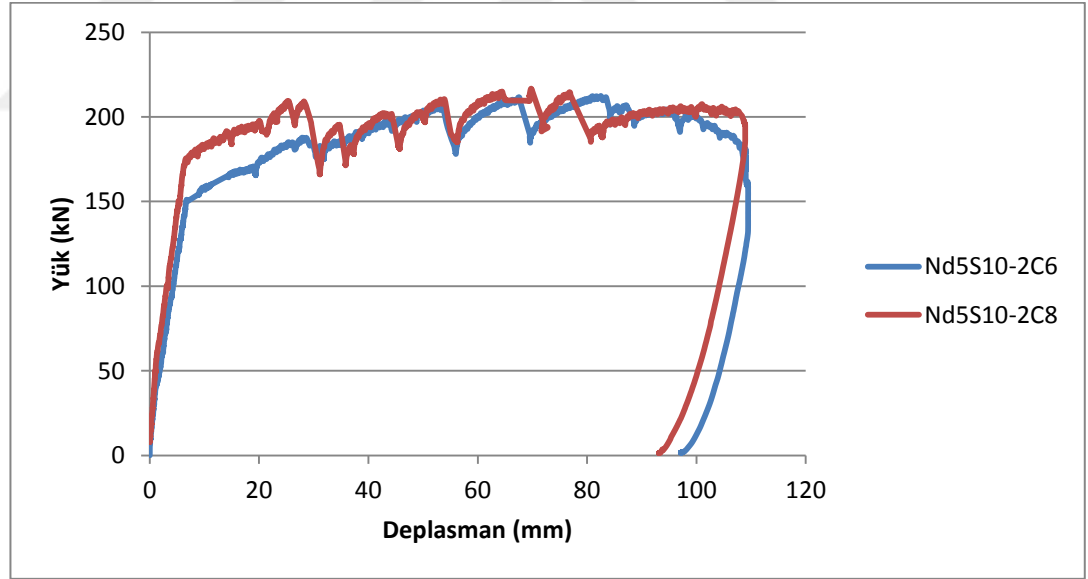
Şekil 4.2. 6 mm CFRP li Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri



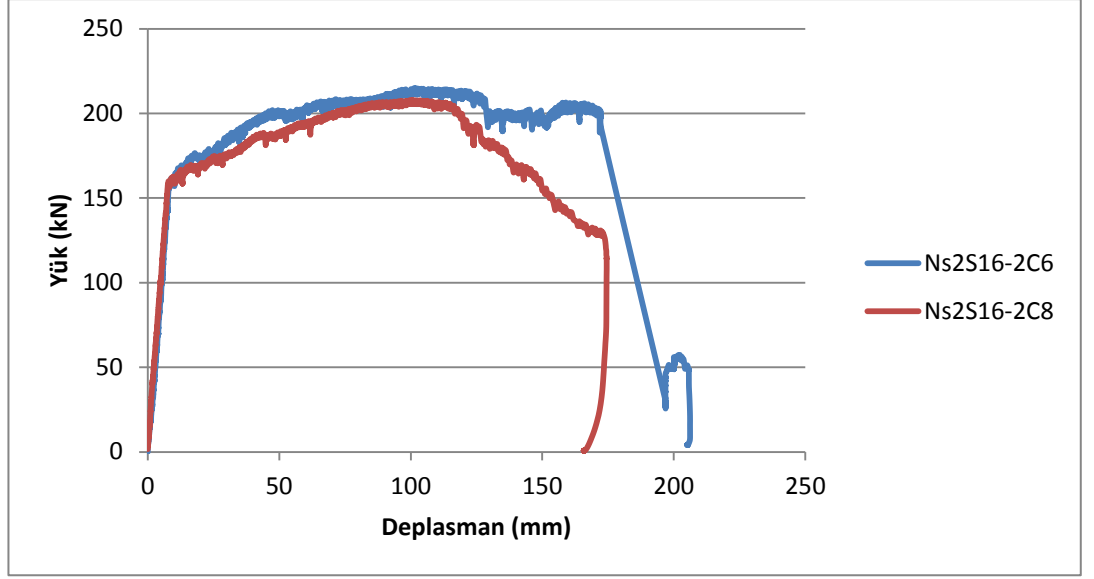
Şekil 4.3. 8 mm CFRP li Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri



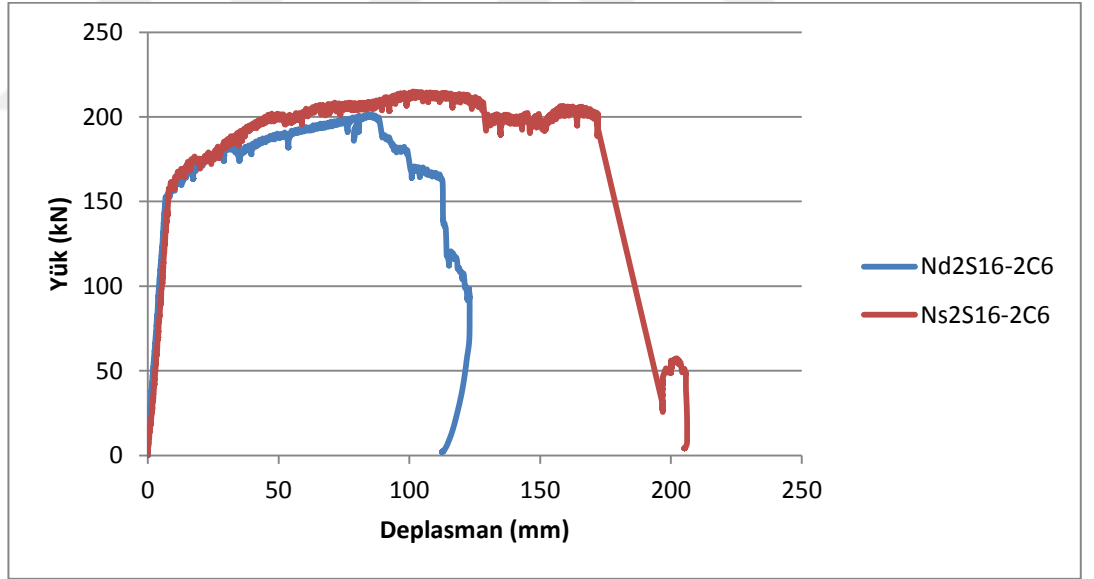
Şekil 4.4. Nd2S16-2C6 ve Nd2S16-2C8 Kirişlerinin Yük-Deplasman Grafikleri



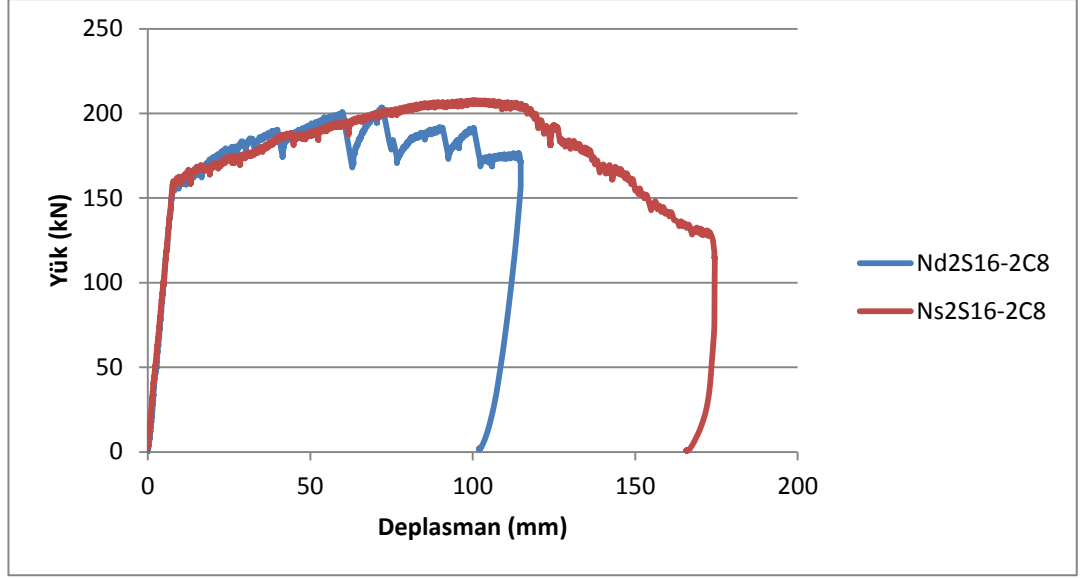
Şekil 4.5. Nd5S10-2C6 ve Nd5S10-2C8 Kirişlerinin Yük-Deplasman Grafikleri



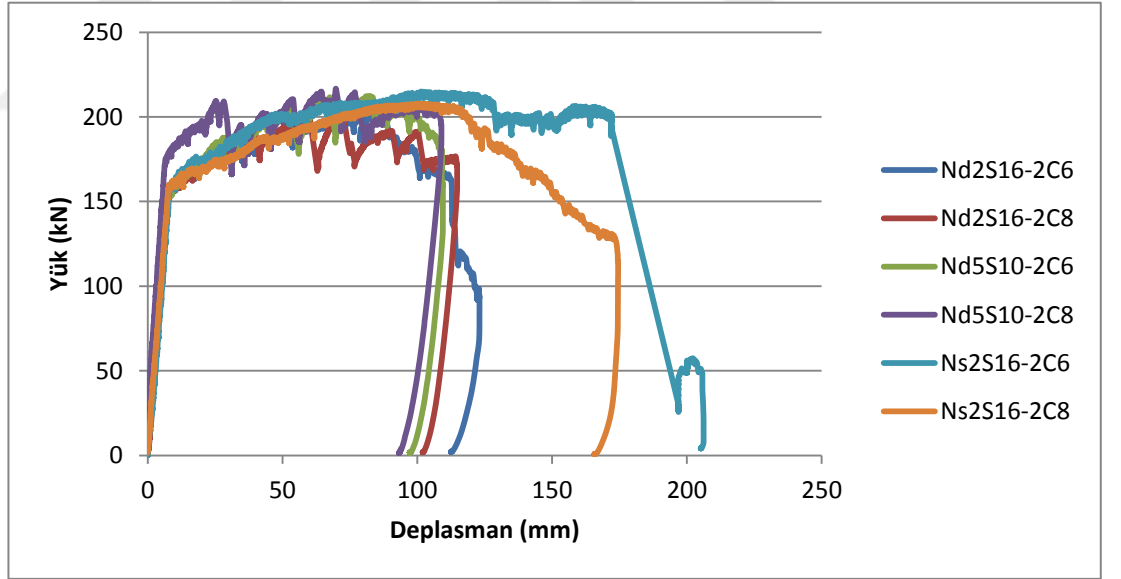
Şekil 4.6. Ns2S16-2C6 ve Ns2S16-2C8 Kirişlerinin Yük-Deplasman Grafikleri



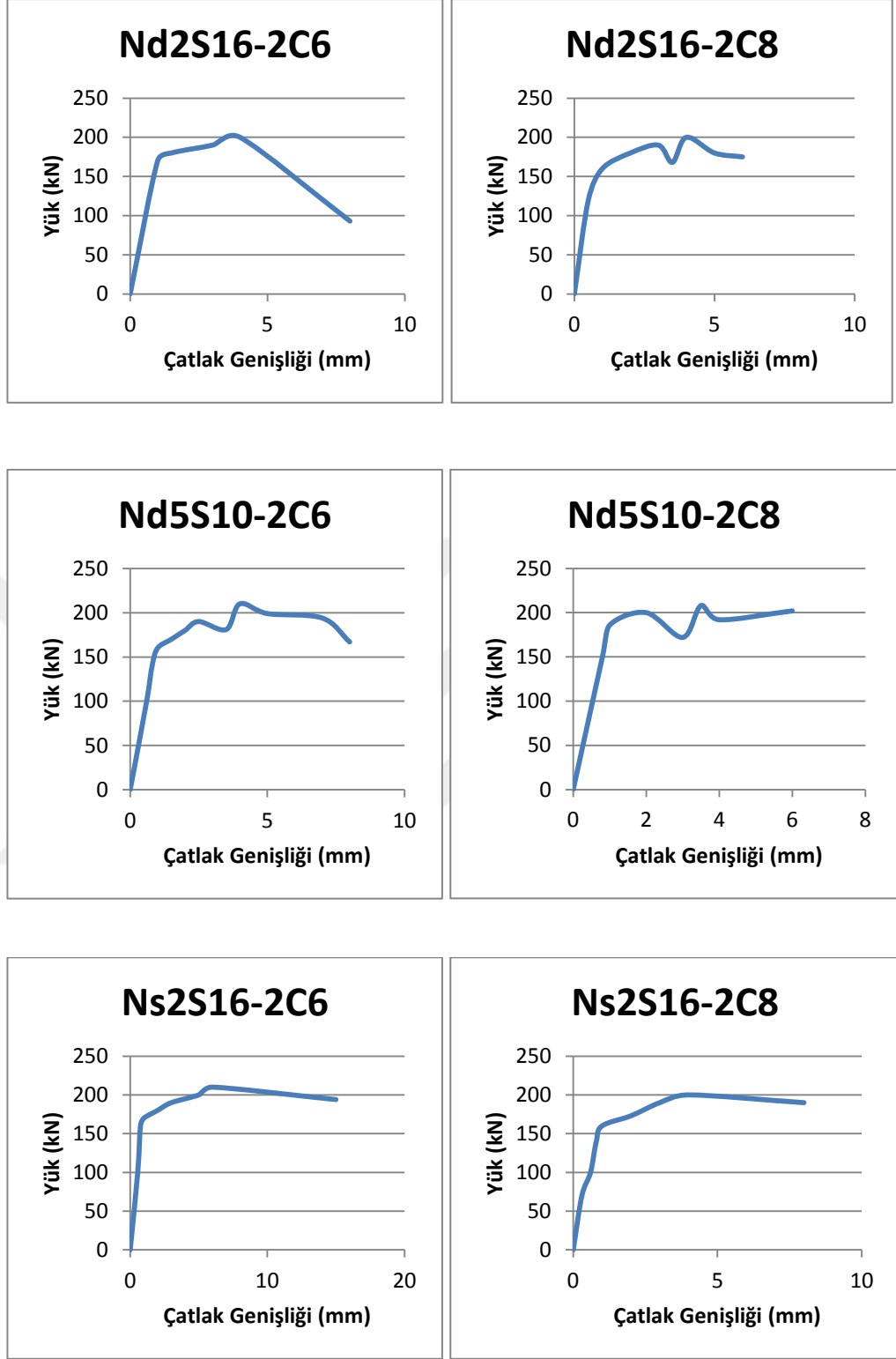
Şekil 4.7. Nd2S16-2C6 ve Ns2S16-2C6 Kirişlerinin Yük-Deplasman Grafikleri



Şekil 4.8. Nd2S16-2C8 ve Ns2S16-2C8 Kirişlerinin Yük-Deplasman Grafikleri



Şekil 4.9. Tüm Kirişlerin Yük-Deplasman Grafikleri



Şekil 4.10. Kirişlerin Yük-Çatlak Genişliği Grafikleri

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada normal ve yüksek dayanımlı CFRP ve çelik donatı kullanılan hibrit kirişlerin eğilme altında davranışları incelenecektir. Beton dayanımı, donatı alanı, donatının kesit içindeki konumu başlıca parametrelerdir. Yük deplasman, çatlak gelişimi, enerji tüketimi incelenecek başlıca başlıklardır.

- Çalışmada CFRP ve çelik donatılı hibrit kirişlerde donatı sıralamasının eğilme davranış üzerine etkileri deneysel olarak araştırılmıştır.
- Donatılar tek sıra ve çift sıra olarak düzenlenmiştir. Çelik donatı alanları yaklaşık aynı olacak şekilde tasarlanmıştır.
- Deneyler sırasında yüke karşılık çatlak genişliği ölçümleri de mümkün olduğu kadar alınmaya çalışılmıştır. Yük –çatlak genişliği grafikleri de verilmiştir. Çelik donatıların tek sıra olarak çekme yüzüne yakın yerleştirilmesi çatlak genişliklerini azaltma açısından olumlu katkı sağlamıştır.
- Kirişlerin Yük deplasman grafiklerinde çıkış kollarında rijitlikler birbirlerine yakın çıkmıştır. Bu durumun çelik donatı alanlarının yaklaşık aynı olmasından, CFRP donatı çaplarının birbirine yakın olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Donatılar tek sıra yerleştirildiğinde, çift sıralılara göre yük kapasitesi düşmeden daha uzun süre korunabilmiştir.
- Çalışmada elde edilen sonuçlar buradaki deneylerle sınırlıdır. Daha ayrıntılı sonuçlar için ilave deneyler yapılabilir.

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] Yoo D., Banthia N., Yoon Y., Flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP and steel rebars, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, 145 Anom-ro, Seong buk-gu, Seoul 136-713, Republic of Korea , 2015.
- [3] Kara İlker Fatih, Ashour Ashraf F., Koroglu Mehmet Alpaslan, Flexural behavior of hybrid FRP/steel reinforced concrete beams, Composite Structures, Department of Civil Engineering, The University of British Columbia, 6250 Applied Science Lane, Vancouver, BC V6T 1Z4, Canada, 2015
- [4] Rafi Muhammad Masood, Nadjai Ali, Ali Faris, Talamona Didier, Aspects of behaviour of CFRP reinforced concrete beams in bending, Construction and Building Materials 22 (2008) 277–285
- [5] Kalupahana W. K. K. G., Ibell T. J., Darby A. P., Bond characteristics of near surface mounted CFRP bars , Construction and Building Materials 43 (2013) 58–68
- [6] Morshy Alaa M., El-Tony El-Tony M., El-Nagggar Mohamed, Flexural repair/strengthening of pre-damaged R.C. beams using embedded CFRP rods Alexandria Engineering Journal (2015) 54, 1175-1179.

- [7] Arockiasamy M., Chidambaram S., Amer A., Shahawy M., Time-dependent deformations of concrete beams reinforced with CFRP bars , Composites: Part B 31 (2000) 577-592
- [8] Elbadry Mamdouh, Elzaroug Omer, Control of cracking due to temperature in structural concrete reinforced with CFRP bars, Composite Structures 64 (2004) 37-45.
- [9] Sovjak Radoslav, Havlasek Petr, Vitek Jan, Long-term behavior of concrete slabs prestressed with CFRP rebars subjected to four-point bending, Construction and Building Materials 188 (2018) 781-792 .
- [10] Z. P. Baz'ant, L.J. Najjar, Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete, Mater. Struct. 5 (1972) 3-20
- [11] Capozucca R., Blasi M. G., Corina V., NSM technique: Bond of CFRP rods and static/dynamic response of strengthened RC beams, Composite Structures 127 (2015) 466-479.
- [12] Rafan Mohamed A., Flexural Behavior and Design of Steel-GFRP Reinforced Concrete Beams, ACI Materials Journal Title no : 110-M62 (2013).
- [13] Elsayed Tarek A., Eldaly A. M., El-Hefnawy A. A., Ghanem G. M., Behaviour of Concrete Beams Reinforced with Hybrid Fiber Reinforced Bars, Advanced Composite Materials 20 (2011) 245–259 .
- [14] Cullazoglu Farih, FRP donatılı betonarme kirişlerin eğilme ve kesme etkisi altındaki analizi, Niğde Üniversitesi, Yüksek Lisans tezi, 1-103, 2014.

- [15] 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
- [16] Hawileh R. A., Finite element modeling of reinforced concrete beams with a hybrid combination of steel and aramid reinforcement, Materials and Design 65 (2015) 831-839
- [17] Hu Biao, Zhou Yingwu, Xing Feng, Sui Lili, Luo Minshen, Experimental and theoretical investigation on the hybrid CFRP-ECC flexural strengthening of RC beams with corroded longitudinal reinforcement, Engineering Structures 200 (2019) 109717
- [18] Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber materials, Concrete engineering series No:23 Research Committee on Continuous Fiber Reinforced Material, Tokyo, Japan,1997.
- [19] CSA S806-12 (Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers)
- [20] ACI 440.1R-15 (Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber- Reinforced with Fiber- Reinforced Polymer (FRP) Bars)