

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNSAAT ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

KARBON VE ÇELİK DONATI KULLANILAN HİBRİT KİRİŞLERİN FARKLI
BETON SINIFLARINDA EĞİLME DAVRANIŞI

Ahmet BENLİ

EKİM 2018

ÖZET

KARBON VE ÇELİK DONATI KULLANILAN HİBRİT KİRİŞLERİN FARKLI BETON SINIFLARINDA EĞİLME DAVRANIŞI

BENLİ, Ahmet

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi

Danışman: Dr. Öğ. Ü. Şule BAKIRCI ER

Ekim 2018, 51 Sayfa

İnşaat sektöründeki hızlı gelişmeler, yapılarda geleneksel malzemeler dışındaki malzeme kullanımını gündeme getirmiştir. Bu malzemelerden biri de FRP donatılardır. Bu donatılar hafiflik, korozyona uğramama ve manyetik olmama özelliklerine sahiptir. Bu özellikler malzemeyi avantajlı kılmaktadır. Ancak bu malzemeler, geleneksel inşaat çeliğinden farklı olarak akma davranışı göstermezler, gevrektiler, düşük elastisite modülüne sahiptirler.

Betonarme eğilme elemanları içinde FRP donatıları çekme donatısı olarak kullanmak davranışı gevrekletmektedir. Bu nedenle geleneksel çelik donatının ve FRP donatıların olumlu özelliklerini bir araya getirmek amacıyla hibrit kirişler tasarlanmıştır. Hibrit kirişlerde FRP donatı olarak karbon donatılar kullanılmıştır. Elemanlar 150mmx300mm boyutlarında ve 3 metre boyundadır. C30 ve C60 olmak üzere 2 farklı beton sınıfı kullanılmıştır. Deneyler iki nokta yüklemeli eğilme deneyleri olarak yapılmış ve davranışları incelenmiştir. Yük deplasman ilişkileri göz önünde bulundurulmuştur. Çalışma sonucunda aynı çelik donatı alanına sahip kirişlerde karbon donatı çapı arttıkça yük taşıma kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. Beton basınç dayanımındaki artışla hibrit kirişlerin eğilme davranışında önemli bir kapasite artışı gözlenmemiştir. Tüm elemanların deneysel yük deplasman eğrilerinin

yanısıra teorik yük deplasman eğrileri de elde edilmiştir. Teorik yük deplasman eğrileri moment eğrilik ilişkisi kullanılarak çizilmiştir.

Anahtar kelimeler: Hibrit kiriş, FRP donatı, betonarme kiriş, eğilme davranışı, CFRP donatı



ABSTRACT

FLEXURAL BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE HYBRID BEAMS (CARBON AND STEEL) USED IN DIFFERENT CONCRETE GRADES

BENLİ, Ahmet

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, Ms. Thesis

Supervisor: Faculty Member Dr. Şule Bakırcı Er

October 2018, 51 pages

Recent developments in the construction field bring up the use of materials except conventional. One of these materials is FRP rebars. They are lightweight, non-corrosive and non-magnetic. These properties make the material advantageous. However, they do not exhibit a yielding behavior unlike the conventional steel reinforcement, they are brittle and they have low modulus of elasticity.

The use of FRP reinforcement as reinforcing materials within the concrete bending elements cause to brittle behavior. For this reason hybrid beams are designed to combine the positive features of traditional steel reinforcement and FRP reinforcement. Carbon FRP bars were used as reinforcement with steel bars in hybrid beams. Elements have 150mmx300mm cross section and 3 meters in length. C30 and C60 were used as two different concrete grades. The experiments were carried out as two point load bending experiments and their behaviors were examined. Load displacement relations were considered. As a result of the study, it was determined that the load carrying capacity increased with the increase in diameter of carbon bars in the beams having the same steel area. With the increase in the strength of concrete

strength, no significant capacity increase was observed in the bending behavior of the hybrid beams. Besides the experimental load displacement curves of all elements, theoretical load displacement curves were obtained. The theoretical load displacement curves were determined using moment curvature relationship.

Key Words : Hybrid beam, FRP reinforcement, reinforced concrete beam, flexural behavior, CFRP reinforcement



TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanmasında elinden gelen yardımı yapan tez yöneticisi hocam, Sayın Dr. Öğ. Üyesi Şule Bakırcı Er'e ve Sayın Dr. Öğ. Üyesi, Eda Avanoğlu Sıcacık a, yapı mekaniği laboratuvarında çalışan lisans öğrencisi arkadaşlara, evde çoğu zaman çocuklarımızın yükünü de üzerine alarak bana desteklerini sunan esim Tuğba Cebeci Benli' ye ve tüm şirinlikleriyle bana moral destek veren ikiz kızlarım Asya ve Ekin'e teşekkürlerimi sunarım.

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

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Literatür Taraması	1
2. DENEYSEL ÇALIŞMA	9
2.1. Deney Programı	9
2.2. Malzeme Özellikleri	18
2.2.1. Beton Özellikleri	18
2.2.2. Çelik Donatı Özellikleri	19
2.2.3. CFRP Donatı Özellikleri	19
2.3. Deney Elemanlarının Hazırlanması	19
2.4. Yükleme, Ölçüm ve Deney Düzenegi	21
2.5. Deneyler	22
2.5.1. NC2S3(C6S12) Numunesi Deneyi	22
2.5.2. NC2S3(C6S10) Numunesi Deneyi	24
2.5.3. NC3S2(C6S10) Numunesi Deneyi	26
2.5.4. NC3S2(C8S10) Numunesi Deneyi	27
2.5.5. HC2S3(C6S10) Numunesi Deneyi	29
2.5.6. HC3S2(C8S10) Numunesi Deneyi	30
2.5.7. HC2S3(C8S12) Numunesi Deneyi	32
3. TEORİK ANALİZ	35
4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	44
5. SONUÇLAR	48
KAYNAKLAR	49

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. NC3S2(C8S10) elemanı donatı detay çizimleri.....	11
2.2. NC3S2(C6S10) elemanı donatı detay çizimleri.....	12
2.3. NC2S3(C6S10) elemanı donatı detay çizimleri.....	13
2.4. NC2S3(C6S12) elemanı donatı detay çizimleri.....	14
2.5. HC2S3(C8S12) elemanı donatı detay çizimleri.....	15
2.6. HC2S3(C8S12) elemanı donatı detay çizimleri.....	16
2.7. HC2S3(C8S12) elemanı donatı detay çizimleri.....	17
2.8. Yüksek Dayanımlı Kirişlerin hazırlanması.....	20
2.9. Normal Dayanımlı Kirişlerin hazırlanması.....	20
2.10. Yükleme Sistemi.....	21
2.11. Yükleme Düzeneği.....	22
2.12. NC2S3 (C6S12) Deneyi Yükleme sonrası görünüşü.....	23
2.13. NC2S3 (C6S12) Elemanı çatlak gelişimi.....	23
2.14. NC2S3 (C6S12) Elemanı Yük Deplasman Grafiği.....	24
2.15. NC2S3 (C6S10) Deneyi Yükleme sonrası görünüşü.....	25
2.16. NC2S3 (C6S10) Elemanı çatlak gelişimi.....	25
2.17. NC2S3 (C6S10) Elemanı Yük Deplasman Grafiği.....	26
2.18. NC3S2 (C6S10) Elemanı Deneyi.....	27
2.19. NC3S2 (C6S10) Elemanı Yük Deplasman Grafiği.....	27
2.20. NC3S2 (C8S10) Elemanı Deneyi.....	28
2.21. NC3S2 (C8S10) Elemanı Yük Deplasman Grafiği.....	29
2.22. HC2S3 (C6S10) Elemanı Deneyi.....	30
2.23. HC2S3 (C6S10) Elemanı Yük Deplasman Grafiği.....	30
2.24. HC3S2 (C8S10) Deneyi Yükleme sonrası görünüşü.....	31
2.25. HC3S2 (C8S10) Elemanı çatlak gelişimi.....	31
2.26. HC3S2 (C8S10) Elemanı Yük Deplasman Grafiği.....	32
2.27. HC2S3 (C8S12) Deneyi Yükleme sonrası görünüşü.....	33
2.28. HC2S3 (C8S12) Elemanı çatlak gelişimi.....	33
2.29. HC2S3 (C8S12) Elemanı Yük Deplasman Grafiği.....	34
3.1. Eşdeğer basınç bloğu ve kuvvetler dengesi.....	36
3.2. Hognestad beton modeli.....	38
3.3. Çelik donatı gerilme birim şekil değiştirme ilişkileri.....	38
3.4. CFRP gerilme birim şekil değiştirme ilişkileri.....	39
3.5. NC2S3(C6S10) elemanı deneysel ve teorik yük deplasman grafiği.....	39
3.6. NC2S3(C6S12) elemanı deneysel ve teorik yük deplasman grafiği.....	40
3.7. NC3S2(C8S10) elemanı deneysel ve teorik yük deplasman grafiği.....	40
3.8. NC3S2(C6S10) elemanı deneysel ve teorik yük deplasman grafiği.....	41
3.9. HC2S3(C6S10) elemanı deneysel ve teorik yük deplasman grafiği.....	41
3.10. HC3S2(C8S10) elemanı deneysel ve teorik yük deplasman grafiği.....	42
3.11. HC2S3(C8S12) elemanı deneysel ve teorik yük deplasman grafiği.....	42

4.1. Deneş elemanları yük deplasman grafikler.....	43
4.2. Yüksek dayanımlı elemanların yük deplasman grafikleri.....	44
4.3. Normal dayanımlı elemanların yük deplasman grafikleri.....	44
4.4. HC2S3 (C6S10) ve NC2S3 (C6S10) elemanları yük deplasman grafikleri	45
4.5. HC3S2 (C6S10) ve NC3S2 (C8S10) elemanları yük deplasman grafikleri	46



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Yüksek Dayanımlı Betonun Dayanımları	18
2.2. Normal Dayanımlı Betonun Dayanımları	18
2.3. Kirişte kullanılan çeliğin mekanik özellikleri	19
2.4. Kirişte kullanılan Karbon Elyaf malzemenin mekanik özellikleri.....	19
3.1. Deney elemanları donatı oranları	35
3.2. Deney elemanlarının teorik ve deneysel taşıma gücü değerleri.....	37



SİMGELER DİZİNİ

β_1	Eşdeğer dikdörtgen gerilme bloğu dönüştürme katsayısı. 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
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
M_u	Taşıma gücü momenti
M_y	Akma momenti
h	Kiriş yüksekliği
f'_c	Beton basınç dayanımı
$P_{u\text{teorik}}$	Teorik taşıma gücü yükü
$P_{u\text{deneysel}}$	Deneysel taşıma gücü yükü

KISALTMALAR DİZİNİ

FRP	Fiber Takviyeli Polimer
GFRP	Cam Fiber Takviyeli Polimer
CFRP	Karbon Fiber Takviyeli Polimer
LVDT	doğrusal değişken türevsel dönüştürücü



1. GİRİŞ

FRP donatılar korozyon dayanımları, manyetik alan oluşturmamaları ve hafiflikleri nedeniyle özellikle çevre koşullarının etkili olduğu köprü kirişlerinde, su altı yapılarında, limanlarda, havaalanlarında, MR odalarında kullanılmaktadır. Bu donatılar Pultrizyon tekniğiyle üretilmektedirler. Pultrizyon tekniğinde takviye malzemesi bir reçine matrisi ile birleştirilir ve sıcak bir kalıptan çekilerek çubuklar veya profiller imal edilir. Adlandırma Pull ve Extrusion kelimelerinin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. FRP çubukların çekme dayanımları yüksektir. Kopma anına kadar lineer elastik bir davranış sergilerler. Aniden koparlar. Geleneksel çelik donatıya göre gevrek bir davranış sergilerler. Korozyon dayanımını da ön planda tutarak çelik donatının ve FRP donatıların avantajlarını bir arada kullanmak amacıyla FRP ve çelik donatıdan oluşan hibrit kirişler hazırlanmaktadır. Bu deneysel çalışmada da CFRP ve çelik donatıların bir arada kullanıldığı hibrit kirişlerin eğilme davranışları deneysel olarak araştırılmıştır.

1.1. Literatür Çalışması

Literatürde CFRP ve çelik donatıların bir arada kullanıldığı kirişlerin davranışlarının incelendiği çalışmalar sınırlıdır. Aşağıda bu çalışma için yararlı olacağı düşünülen çalışmalardan bahsedilmektedir.

Kara ve arkadaşları yaptıkları çalışmada FRP ve çelik donatılı hibrit kirişlerin eğriliklerini, deplasmanlarını ve moment kapasitelerini belirlemek için numerik metodlar sunmuşlardır. FRP donatıların miktarına bağlı olarak farklı kırılma modları belirlenmiştir. Bunlar çelik donatının akmasından önce veya sonra FRP donatının kopması veya betonun ezilmesidir. Teorik ve deneysel sonuçlar arasında karşılaştırmalar yapılarak eğrilik, moment kapasitesi ve deplasman tahminlerinin önerilen yöntemle doğru bir şekilde yapıldığı belirlenmiştir. FRP donatılı kirişlere çelik donatıların ilavesiyle süneklik ve rijitliğin artırıldığı gözlenmiştir. [1]

El Refai ve diğeri 3 tanesi sadece GFRP, 3 tanesi ise çelik ve GFRP eğilme donatıları ile donatılmış olan 6 adet kirişi eğilme altında deneysel olarak test etmişlerdir. Denge ustü donatılı hibrit kirişler, GFRP donatılı olanlardan daha yüksek dayanım ve süneklik göstermişlerdir. Yüksek efektif donatı oranına sahip hibrit kirişlerin deplasmanları CSA-S806-12 denklemiyle doğru olarak tahmin edilebilmiştir. Hibrit donatılı kirişlerin deforme olabilirlikleri modifiye edilmiş deforme olabilirlik faktöründen faydalanılarak değerlendirilmiştir. [2]

Sovjak ve arkadaşları yaptıkları çalışmada CFRP donatılı ön gerilmiş kirişlerin dört nokta yüklemesi altında davranışlarını incelemişlerdir. 10 tane 4.5 metre boyunda üretilmiş elemanlardan 8 tanesi yarı statik yük uygulanarak göçmeye kadar incelenmiştir. Diğer iki eleman 1-7 gün arasında yüke maruz bırakılmasının ardından göçmeye kadar yüklenmiştir. Bu çalışmanın amacı birçok yazar tarafından önemli olmadığı varsayılan CFRP donatıda sünme ve gerilme boşalmasını dikkate almaktır. Bu nedenle deneysel veriler sonlu eleman modeliyle karşılaştırılmıştır. Sonlu eleman modelinde CFRP donatılar sünmeyen lineer elastik malzeme olarak modellenmiştir. Bu öngerilmeli CFRP çubukta sünme veya gerilme boşalması olmadığını doğrulamak amacıyla. [3]

Wanga ve diğerlerinin betonlarında deniz suyu ve deniz kumu kullanmış bazalt, cam ve karbon lifli polimer çubukların hızlandırılmış testler kullanarak tabaka içi kesme davranışlarını incelemişlerdir. Araştırmada kısa kirişlerin kesme test metodlarının etkisini ve donatı test açıklığının donatı çapına oranını, tabaka içi kesme dayanımına oranlarını araştırmışlardır. Arrhenius teorisi kullanılarak deniz sulu ve deniz kumlu betonlu bazalt, cam elyaf ve karbon lifli donatıların uzun dönem kesme davranışı incelenmiştir. [4]

Ye ve diğerleri yaptıkları çalışmada yüzeye yakın yerleştirilmiş öngerilmeli CFRP donatılı taş kirişlerin eğilme davranışını geliştirmeye çalışmışlardır. 9 kiriş, kiriş açıklığına, kesit alanına bağlı olarak 3 gruba ayrılmış ve tekdüze yüklemeye altında test edilmiştir. Her grupta bir yalın taş kiriş karşılaştırma için bulunmaktadır. C grubunda CFRP donatılı taş kirişler kesme açıklığında CFRP şeritlerle kesmeye karşı güçlendirilmiştir. Yüzeye yakın yerleştirilen CFRP donatı miktarı ve öngerme

kuvvetleri ana parametrelerdir. Öngerilmeli CFRP donatılar kirişlerin ani kırılmasını önleyerek sünek kırılmalarını sağlamıştır. A ve B grubunda CFRP donatı sıyrılmış veya yapıştırılan CFRP ler ayrılmış veya kesmeli eğilme kırılması olmuştur. C grubundaki CFRP şeritlerle güçlendirilen tas kirişler CFRP şeritlerin kopmasıyla birlikte kesmeli eğilme ile kırılmıştır. Yük deplasman eğrileri betonarme kirişlerdeki gibi üç kısımdan oluşmaktadır. Aynı miktar yüzeye yakın CFRP donatı ile donatılmış tas kirişlerde CFRP ayrılmasıyla kırılma olduğunda, yük taşıma kapasiteleri öngerme kuvvetlerinde artışla artmış, deformasyon kapasiteleri azalmıştır. [5]

Arockiasamy ve diğerleri karbon epoksi lif takviyeli polimerlerle donatılmış betonarme kirişlerin uzun süreli düzgün yayılı yükler altında davranışlarını incelemişlerdir. Dört adet CFRP donatılı kiriş ikisi 152x203x2438, ikisi 152x152x2438 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Kirişler basit kiriştir. Kirişlerin sünme ve büzülme etkileri altında davranışları iki yıl boyunca düzenli olarak takip edilmiştir. CFRP donatılı kirişlerin uzun süreli davranışlarını tahmin etmek amacıyla analitik metod geliştirilmiştir. CFRP donatılı kirişlerin uzun süreli deformasyonlarını hesaplamak amacıyla basitleştirilmiş denklemler önerilmiştir. [6]

Yinghao ve Yong yüksek dayanımlı betonlu cam elyaf ve çelik donatılı hibrit kirişlerin eğilme davranışını incelemişlerdir. Donatı katmanlarının düzenlenmesinin etkisini doğrulamak ve hibrit donatılarla beton yapıların tasarımını desteklemek amacıyla hibrit kirişlerin eğilme dayanımı, yük deplasman ve çatlak davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Bir tanesi kontrol elemanı olmak üzere dört kiriş test edilmiştir. Donatı tabakalarının düzenlenmesi başlıca parametredir. En büyük yük kapasitesi ve kırılma modları tahmininde teorik modeller önerilmiştir. [7]

Rahal ve Rumaih yaptıkları çalışmada dört tane tam ölçekli T kesitli betonarme kirişi yüzeye yakın yerleştirilen karbon (CFRP) ve geleneksel çelik donatılarla kesmeye karşı güçlendirmişlerdir. Deneysel çalışma yüzeye yakın yerleştirilen donatıların oryantasyon tipleri ve kiriş başlığındaki betonda ankraj etkilerini incelemiştir. Test sonuçları yüzeye yakın yerleştirilen donatıların çatlağı çapraz geçmesiyle birlikte devrede olduğunu göstermiştir. Güçlendirme kesme kapasitesini %37 ile %92 arasında artırmıştır, çapraz çatlak genişliklerini azaltmıştır, kirişlerin belirgin eğilme

sünekliğini artırmasını sağlamıştır. Sonuçlar yüzeye yakın yerleştirilen donatıların 45 ° oryantasyonunun ve başlık betonuna ankrajlarının uzatılmasının güçlendirmenin etkisini artırdığını göstermiştir. CFRP ile güçlendirilmiş test bölgeleri, çelik ile güçlendirilen test bölgelerinden %7-%10 arasında daha fazla kesme kapasitesi sağlamıştır ve onların davranışları nispeten benzerdir. [8]

Mahroug ve diğerlerinin yaptıkları çalışmada dört tane CFRP donatılı sürekli döşeme test edilmiştir. Açıklık ortası ve orta mesnedin üstünde farklı donatı düzenlemeleri dikkate alınmıştır. İki adet basit mesnetli, denge altı ve denge ustı CFRP donatılı ve sürekli çelik donatılı kiriş karşılaştırma amacıyla test edilmiştir. Bütün sürekli CFRP donatılı döşemeler kesme eğilme kırılması birleşmiş göçme sergilemişlerdir. Yük taşıma kapasitesini artırmada ve orta nokta deplasmanını azaltmada açıklık ortası alt CFRP donatı miktarını arttırmak, orta mesnedin üst CFRP donatı miktarını arttırmaktan daha etkili olmuştur. ACI 440.1R-06 kırılmadaki moment kapasitesini fazla tahmin ettiği ancak test edilen CFRP donatılı sürekli kirişlerin yük taşıma kapasitelerini tahmin etmede daha iyi olduğu belirlenmiştir. ACI 440.1R-06, ISIS-M03-07 ve CSA S806-06 tasarım şartnameleri alt katmanda denge altı CFRP donatılı sürekli kirişlerin sehim tahminlerinde makul oldukları ancak alt katmanda denge ustı CFRP donatılı sürekli kirişlerin sehimlerini deneylerin altında tahmin ettikleri tespit edilmiştir. [9]

Firas ve arkadaşları CFRP donatı ile yüksek performanslı lifli beton arasındaki aderansı belirlemek amacıyla bir deneysel çalışma yapmışlardır. Öngörülen betonun eğilme dayanımı iki malzeme arasında adersana oldukça bağlı olduğu için, yüksek performanslı lifli betonun içine gömülü CFRP donatıların aderansını araştırmışlardır. Düz ve reçine kaplı kumlu olmak üzere iki farklı yüzey turu incelenmiştir. Gömülme derinliği, donatı çapı ve beton yaşı gibi parametre değişimlerinin etkisini belirlemek için pullout (çekip çıkarma) testleri yapılmıştır. Test sonuçlarından, ultra yüksek performanslı lifli betona gömülü düz donatıların, reçine kaplı kumlu donatılara yakın aderans dayanımı olduğu elde edilmiştir. Donatı çapı ve gömülme derinliğindeki azalma ile en büyük aderans dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca aderans dayanımının 3 günden önce sağlanabileceği belirtilmiştir. Test incelemesinin

ardından sadece CFRP donatıların dış katmanlarından hasar olduğu açıklığa kavuşmuştur. [10]

Rolland ve arkadaşları beton ve FRP donatı arasında aderansın deneysel karakterizasyonu üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada cam, karbon, aramid donatıların yanında deforme olmuş çelik donatıya da pullout testleri yapılmıştır. Aderans davranışına lif tipi, FRP donatıların çapı ve donatıların yüzey geometrileri gibi değişik parametrelerin etkileri incelenmiştir. Bu donatıların yüzeyi kum kaplı karakteristikleri elektron mikroskop taramalarıyla elde edilmiştir. Önerilen yaklaşım Dağıtılmış optik lif algılama cihazlandırması kullanarak pullout örnekleri içermektedir. Böyle dağıtılmış ölçüm sistemi donatı beton ara yüzü boyunca boyuna şekil değiştirme dağılımına geçit sağlamıştır ve çalışmadaki çeşitli tipteki donatıların etkili gelişim boyu belirlenebilmiştir. Dağıtılmış optik lif algılama cihazlandırması araya girebilerek ara yüz üzerindeki etkisi tartışılmıştır. [11]

Aiello ve Ombres yaptıkları çalışmada FRP donatılı betonarme eğilme elemanlarının deforme olabilirliklerini incelemişlerdir. Çalışma analitik olarak kayma ve aderans gerilmeleri üzerine kurulmuş, çatlama analizinden genel prosedür çıkarılmış aramid FRP donatılı kirişlere eğilme testleri ile desteklenmiştir. Genellikle FRP donatılı betonarme yapılar için adapte edilen modellere ve mevcut deney sonuçlarına dayanarak yapılan tahminler karşılaştırılmıştır. Son olarak karşılaştırmaların sonuçları model tahminlerinin etkinliğini ve tasarım amacıyla uygulanabilirliğini ispatlamak için tartışılmıştır. [12]

Dünder ve arkadaşları çok açıklıklı FRP ve çelik donatılı betonarme kirişlerin yük deplasman tahminleri için bir çalışma yapmışlardır. Çalışma FRP veya çelik donatı ile donatılmış betonarme elemanların deplasmanlarını belirlemek amacıyla sayısal bir prosedür sunmaktadır. Burada rijitlik matrisi yöntemi kullanılmaktadır. Yöntem çatlama bölgesinde etkili sünekliği deikkate almaktadır. Genel olarak yapısal beton elemanı üç çatlama bölgesinde (ikisi sonlarda ve biri ortada) ve uzunluğu boyunca iki çatlama bölgesinde olarak dikkate alınır. Bu bölgelerin eleman rijitlik matrisine katkıları nümerik integrasyon tekniği kullanılarak hesaplanmaktadır. FRP veya çelik

donatılı herhangi bir yükle yüklü veya herhangi mesnet koşullu elemanların yük deplasman davranışları hızlıca belirlenebilmektedir [13].

Qin ve arkadaşları yaptıkları çalışmada FRP donatılı hibrit kirişlerin eğilme performansında donatı oranının etkisini incelemişlerdir. Dayanımı ve eğilme sünekliğini es zamanlı geliştirmek amacıyla tasarımda çelik ve FRP donatılı sistemler önerilmektedir. FRP donatılı hibrit kirişlerde FRP ve çelik donatı dayanım ve süneklikte farklı rol oynarlar. FRP ve çelik donatı arasında Af/As hibrit donatı oranı eğilme tasarımında dayanım ve süneklik arasında dengeyi etkilemektedir. Bu çalışmada hibrit donatı oranı eğilme performansında denge altı ve denge üstü donatılarda 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanılarak incelenmiştir. Uygun hibrit donatı oranlarında tercih edilir dayanım ve süneklik performanslarının elde edilebileceğini gösterir. Böyle bilgiler uygun hibrit donatı oranı aralığını belirlemeye ve hibrit FRP donatılı kirişlerde dayanım ve süneklik performansı için tasarım esaslarını elde etmeye yardım eder. [14]

Bischoff bu çalışmasında çelik ve FRP donatılı B.A. kirişlerin kısa dönem deplasmanlarını hesaplamak amacıyla kullanılan denklemler üzerinde önemli bir değerlendirme yapmıştır. Çekme rijitleşmesi rijitleşmede çatlaklar arasında eleman tepkisine beton katılımını yansıtır. Yeni bir denklem önerilmiştir. Önerilen denklem efektif atalet momentini I_g/I_{cr} den bağımsız olarak verir ve çelik ve FRP donatıların her ikisi için uygundur. [15]

Bischoff çalışmasında Branson denklemindeki çekme rijitleşmesini azaltmak amacıyla uygun bir modifikasyon geliştirerek daha gerçekçi seviyelere getirmeyi amaçlamıştır. Bütün donatı türleri ve kiriş kesitlerinde çalışan basit modifikasyon faktörü önerilmiştir. [16]

Wang ve arkadaşları ultra yüksek performanslı beton hazırlama ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Ultra yüksek performanslı beton hazırlamak maliyetli ve komplikedir. Bu nedenle yaygın teknoloji ve tabii malzeme ile bu betonun hazırlanmasına yoğunlaşmıştır. Akışkanlık ve basınç dayanımına Bağlayıcı içeriğinin etkisi, su bağlayıcı oranı, granüle cüruf içeriği ve kalker tozu yerine koymanın etkileri

araştırılmıştır. Akışkanlaştırıcı ve ince malzeme ilavesinin, 0.14-0.18 düşük su bağlayıcı oranında iyi işlenebilirlik sağladığı ve en büyük slup değerinin 268 mm, basınç dayanımı 90 günde yaklaşık 176 MPa 365 günde yaklaşık 183 MPa olarak belirlenmiştir. [17]

Habel ve diğerleri Ultra Yüksek Performanslı Lif takviyeli Betonun Mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla bir deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışma hidrasyon indeksleriyle ve onların Ultra yüksek performanslı lif takviyeli betonun mekanik özelliklerinin gelişim korelasyonuyla ilgili bir çalışmadır. Çalışmada mekanik özelliklerin iyileştirmesinin en fazla secant modülünde sonra basınç ardından çekme dayanımında etkili olduğu belirlenmiştir. [18]

Unsal ve arkadaşları çekme rijitleşmesinin FRP ve Çelik donatılı betonarme kirişlerin yük deplasman davranışı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Bu teorik çalışmada daha önce mevcut bulunan 12 adet FRF ve çelik donatılı kiriş numunesi incelenmiştir. Hesaplarda iki bölgeyi doğrusal çekme rijitleşmesi modeli kullanılmıştır. Yük deplasman ilişkisi belirlenmek istenen FRP ve çelik donatılı kirişlerin yük deplasman ilişkisini donatı oranı ve donatı elastisite modülü gibi değerlere bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. [19]

Yoo ve arkadaşları Ultra yüksek performanslı hibrit düz çelik lif katkılı betonların eğilme davranışını karşılaştırmışlardır. 13 mm, 19.5 mm 30 mm boylarında üç farklı çelik lif kullanmışlardır. Test sonuçları uzun ve orta boy liflerin birlikte kullanılmasının çatlak sonrası dayanım, deformasyon kapasitesi, tokluk ve çatlak davranışını etkili olarak geliştirdiği oysa ki uzun ve kısa liflerin hibrit kullanımının performansı azalttığı belirlenmiştir. [20]

Goldstone ve diğerleri Yüksek dayanımlı ve ultra yüksek dayanımlı GFRP donatılı kirişlerin eğilme davranışlarını incelemiştir. Donatı oranı ve beton basınç dayanımının yük taşıma kapasitesi' deplasman' enerji tüketme, donatı ve betonda şekil değiştirme ve kırılma modları üzerine etkisi araştırılmıştır. Amerikan şartnamesi ve Kanada Şartnamesindeki FRP tasarım tavsiyeleri karşılaştırılmıştır. [21]

Bywalski ve meslektaşları FRP donatılı kirişlerin eğilme altında hesaplama metotlarını inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Basit varsayımlarda belirli metotlardaki farklar vurgulanmıştır. Mevcut GFRP donatılı eğilme elemanların mevcut analizleri ve sentezleri dikkate alınmıştır. [22]

FRP donatılarla yapılan çalışmalarda dünya genelinde yaygın olarak kullanılan üç tane standart vardır. Bu standartlar aşağıda verilmiştir:

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

1. Japon Standardı [23] (Recommendation for Design and Constiuction of Concfiete Structures): Bu standart; Malzemeler, Yapım ve Kalite Kontrol kısımlarını içermektedir. Karbon, aramid, cam, vinil lif ve kompozit malzemelerini FRP malzemeler olarak inceler.
2. Kanada standardı [24] (Design and Costruction of Building Components with Fiber Reinforced Polymers): Bu şartname FRP bileşenlerinin ve takviye malzemelerinin özelliklerini içerir.
3. Amerikan standardı (ACI 440.1R-15) [25] (Guide for Design and Construction of Structural Concrete Reinforced Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars): FRP donatılı yapılan çalışmalarda en yaygın kullanılan şartnamedir. Malzeme özellikleri, durabilite, tasarımda göz önünde bulundurulacak hususlar, eğilme, kesme, büzülme ve isi etkisi, donatılardaki ekler, tasarım örnekleri kısımlarını içerir FRP donatılarda basınç kontrollü davranış sınıra yakın olarak istenir. FRP donatının çekme kopmasından önce beton ezilmesiyle eğilme elemanı bazı elastik olmayan davranış göstermektedir

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1 Deney Programı

Yapılan çalışmada; 150 mm eninde, 300 mm yüksekliğinde dikdörtgen kesitli, 3000 mm uzunluğunda 7 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Betonarme kirişlerin 4 tanesinde normal dayanımlı beton, diğer 3 tanesinde yüksek dayanımlı beton kullanılmıştır. 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 karbon lif takviyeli polimer (CFRP) malzeme, farklı donatı oranlarında hibrit olarak kullanılmıştır. Kirişlerdeki değişken parametreler; beton dayanımı, çekme donatısı çeşit, adet ve oranıdır.

Kirişler isimlendirilirken sırasıyla, beton dayanımı (N: Normal Dayanımı, H: Yüksek Dayanım), 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.

HC2S3 (C6S10): Yüksek Dayanımlı, çekme bölgesinde 2 adet 6 mm çapında CFRP donatı, 3 adet 10 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

HC3S2 (C8S10): Yüksek Dayanımlı, çekme bölgesinde 3 adet 10 mm çapında CFRP donatı, 2 adet 10 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

HC2S3 (C8S12): Yüksek Dayanımlı, çekme bölgesinde 2 adet 8 mm çapında CFRP donatı, 2 adet 12 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

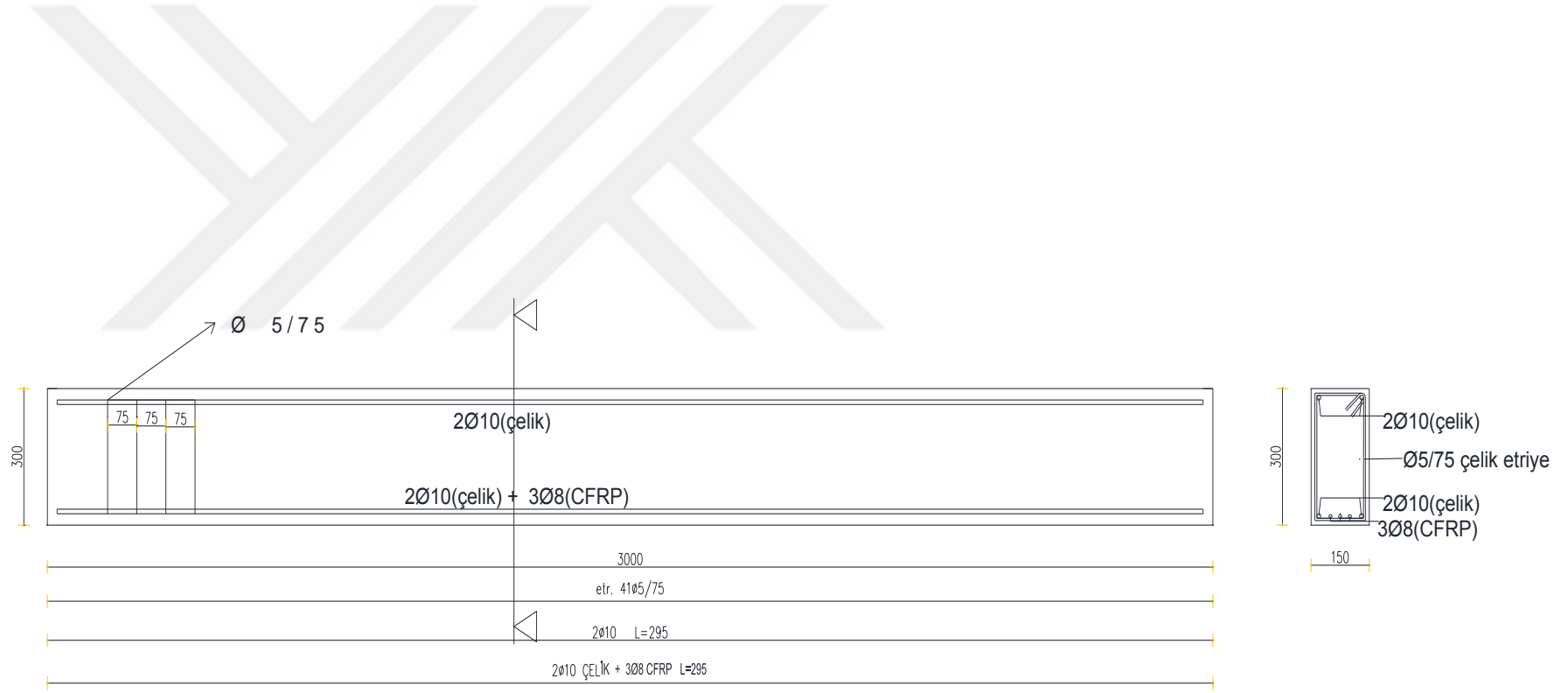
NC3S2 (C8S10): Normal Dayanımlı, çekme bölgesinde 3 adet 8 mm çapında CFRP donatı, 2 adet 10 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

NC3S2 (C6S10): Normal Dayanımlı, çekme bölgesinde 3 adet 6 mm çapında CFRP donatı, 2 adet 10 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

NC2S3(C6S10): Normal Dayanımlı, çekme bölgesinde 2 adet 6 mm çapında CFRP donatı, 3 adet 10 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş

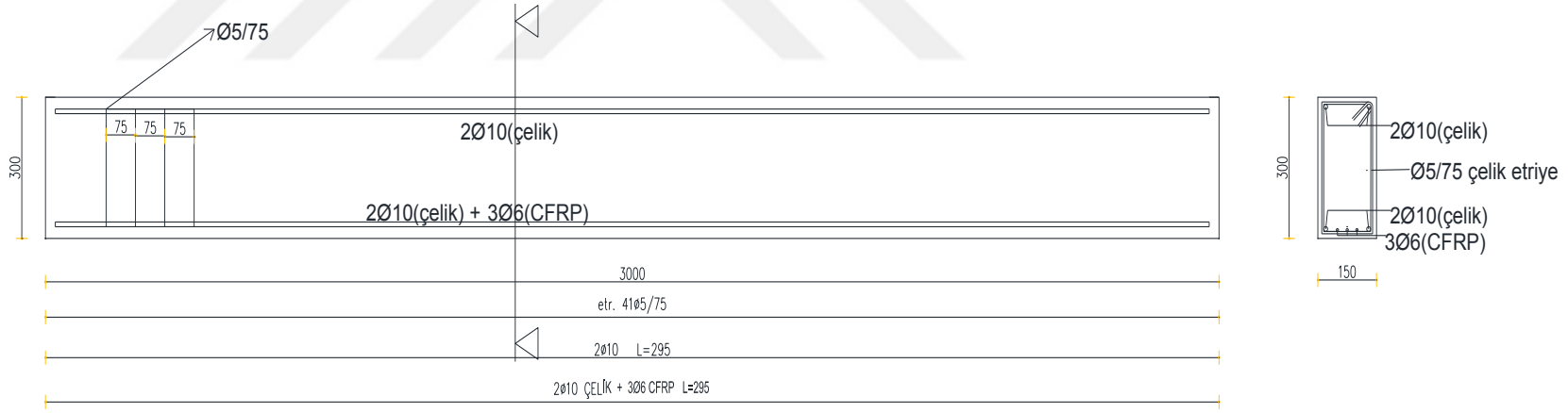
NC2S3(C6S12): Normal Dayanımlı, çekme bölgesinde 2 adet 6 mm çapında CFRP donatı, 3 adet 12 mm çapında çelik donatı bulunan hibrit kiriş





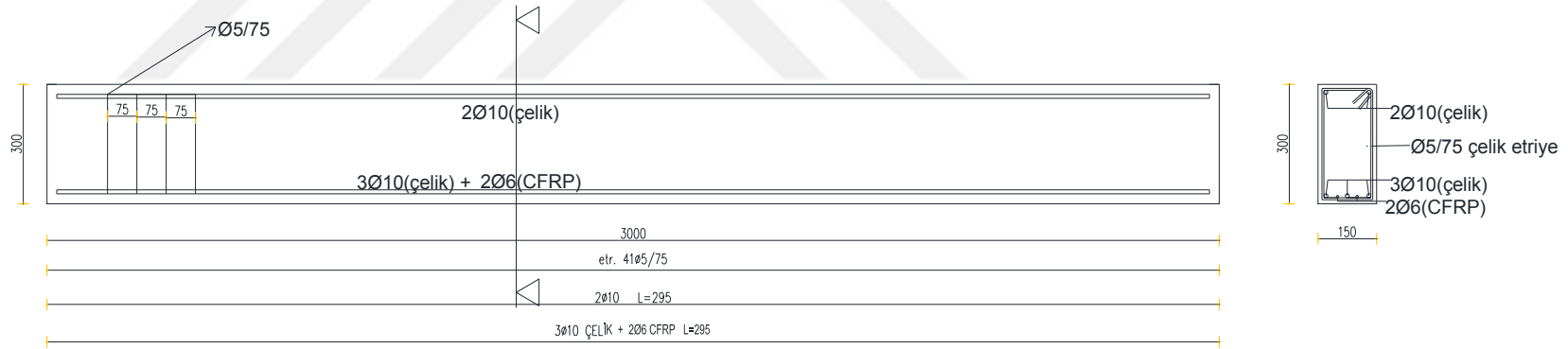
NC3S2(C8S10) elemanı donatı detay çizimleri

Şekil 2.1. NC3S2(C8S10) elemanı donatı detay çizimleri



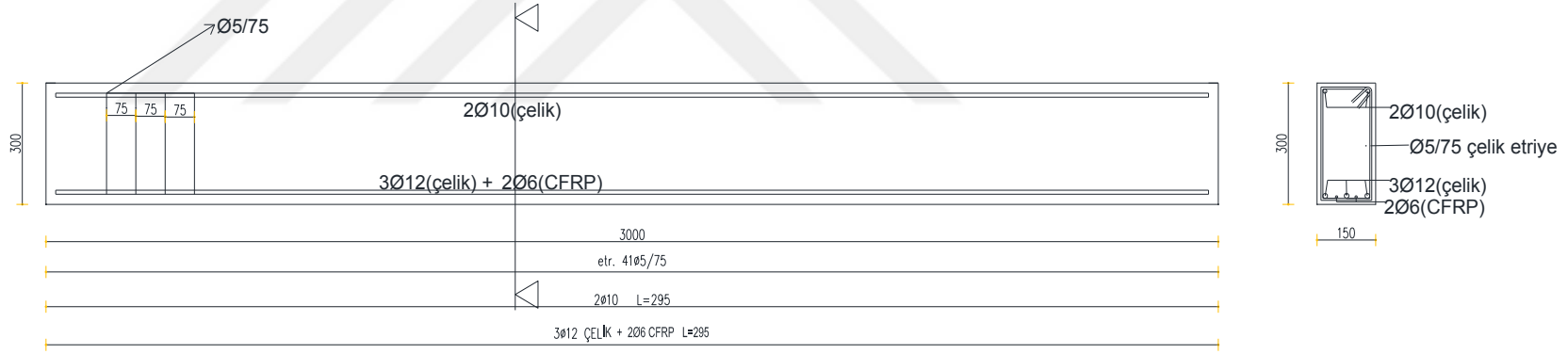
NC3S2(C6S10) elemanı donatı detay çizimleri

Şekil 2.2. NC3S2(C6S10) elemanı donatı detay çizimleri



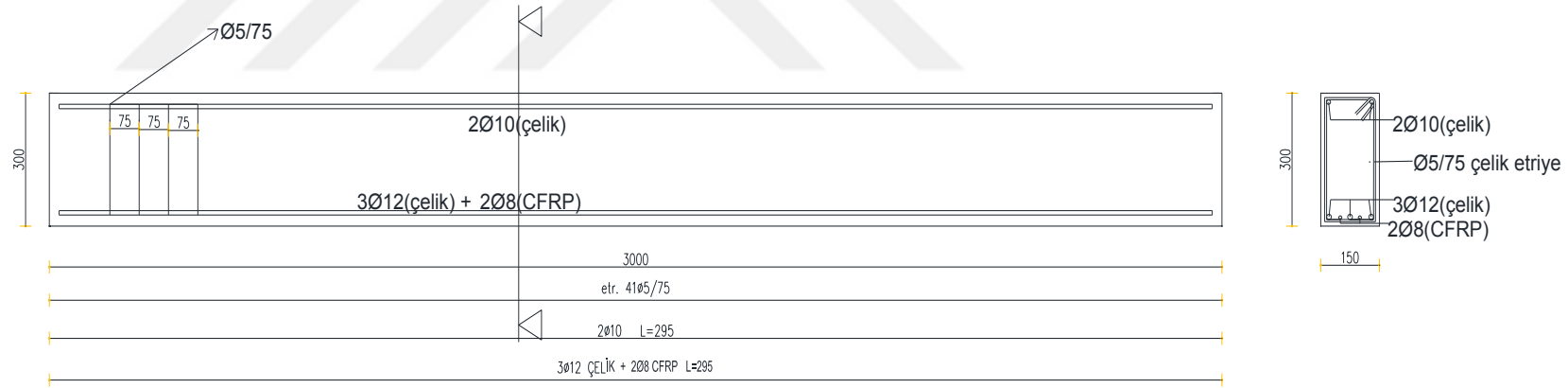
NC2S3(C6S10) elemanı donatı detay çizimleri

Şekil 2.3. NC2S3(C6S10) elemanı donatı detay çizimleri



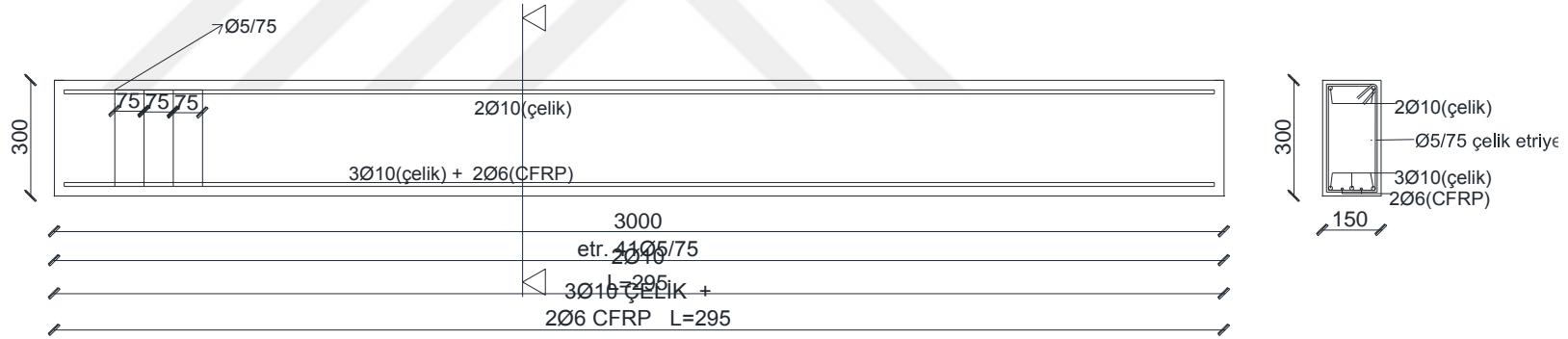
NC2S3(C6S12) elemanı donatı detay çizimleri

Şekil 2.4. NC2S3(C6S12) elemanı donatı detay çizimleri



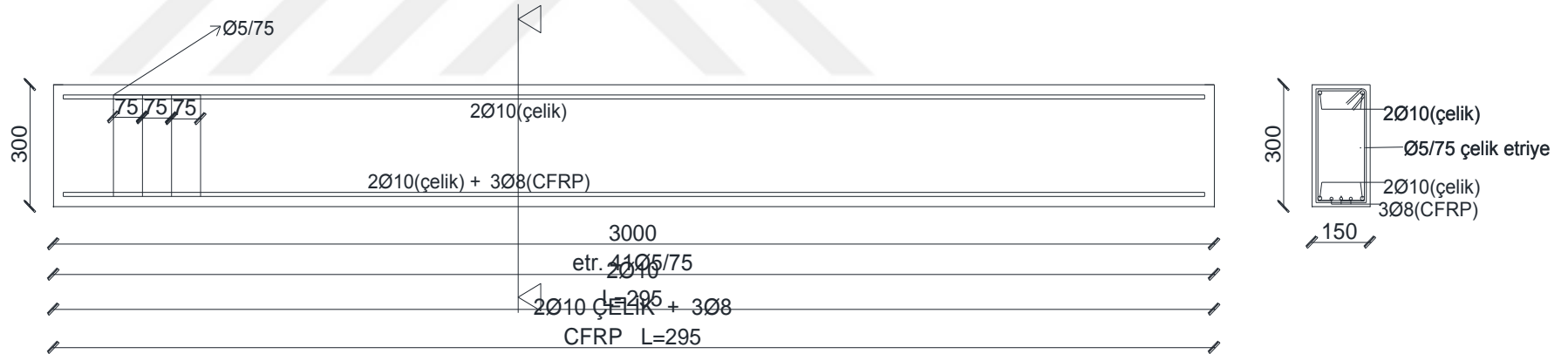
HC2S3(C8S12) elemanı donatı detay çizimleri

Şekil 2.5. HC2S3(C8S12) elemanı donatı detay çizimleri



HC2S3(C6S10) elemanı donatı detay çizimleri

Şekil 2.6. HC2S3(C6S10) elemanı donatı detay çizimleri



HC3S2(C8S10) elemanı donatı detay çizimleri

Şekil 2.7. HC3S2(C8S10) elemanı donatı detay çizimleri

2.2 Malzeme Özellikleri

2.2.1 Beton Özellikleri

Deneylerde, üç elemanda normal dayanımlı beton, üç elemanda yüksek dayanımlı beton kullanılmıştır. Kullanılan yüksek dayanımlı ve normal dayanımlı beton özellikleri aşağıdaki çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 2.1. Yüksek Dayanımlı Betonun Dayanımları

Numune No	7 GÜNLÜK		28 GÜNLÜK		
	1	2	3	4	5
Numune Boyutu (mm)	150 X 150	150 X 150	150 X 150	150 X 150	150 X 150
Küp Basınç Dayanımı (MPa)	68	67,2	74,6	71,4	75,1
Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	57,80	57,12	63,41	60,69	63,83
Ortalama Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	57,46		62,64		

Çizelge 2.2. Normal Dayanımlı Betonun Dayanımları

Numune No	7 GÜNLÜK			28 GÜNLÜK		
	1	2	3	4	5	6
Numune Boyutu (mm)	150 X 150	150 X 150	150 X 150	150 X 150	150 X 150	150 X 150
Küp Basınç Dayanımı (MPa)	33,15	35,3	33,19	44,47	45,54	43,71
Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	28,18	30,00	28,21	37,80	38,71	37,15
Ortalama Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	28,80			37,89		

2.2.2. Çelik Donatı Özellikleri

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

Çizelge 2.3. 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 2.4. Kirişte kullanılan Karbon Elyaf malzemenin mekanik özellikleri

Malzeme	Kopma Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
Karbon Elyaf Donatı	>2400	165 000

2.3 Deney Elemanlarının Hazırlanması

150 x 300 x 3000 mm ölçülerinde hazırlanan kalıplara, kiriş donatılar yerleştirilmiştir. Daha sonra beton dökümü gerçekleştirilmiştir. İlk olarak yüksek dayanımlı kirişler hazırlanıp, beton dökümü yapılmış, yüksek dayanımlı kirişlere ait eğilme deneyleri tamamlandıktan sonra, normal dayanımlı kirişler hazırlanmış ve deneyleri yapılmıştır.



Şekil 2.8. Yüksek Dayanımlı Kirişlerin hazırlanması



Şekil 2.9. Normal Dayanımlı Kirişlerin hazırlanması

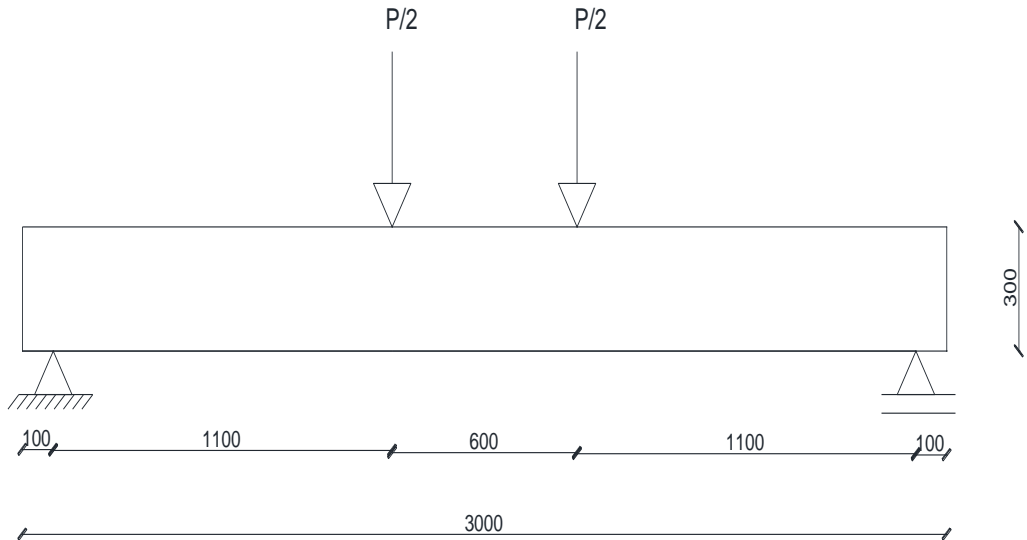
2.4 Yükleme, Ölçüm ve Deney Düzenegi

Deney elemanları dört noktali eğilme altında test edilmiştir. Tüm kirişler bir taraftan sabit mesnetli diğer taraftan kayıcı mesnetli olarak hazırlanmışlardır. Mesnetler arası mesafe 2800 m dir. Mesnetten sonra 100 mm bırakılmıştır. Verilen yükü kirişe dağıtmak amacıyla 80 cm boyunda bir çelik kiriş, kirişin üzerine bir taraftan sabit, diğer taraftan kayıcı mesnetle yerleştirilmiştir. Çelik kiriş, yükleme kirişi veya yük dağıtma kirişi olarak kirişi üst taraftan iki noktadan yüklemek için kullanılmıştır. Yükleme hidrolik kriko ile yapılmıştır.

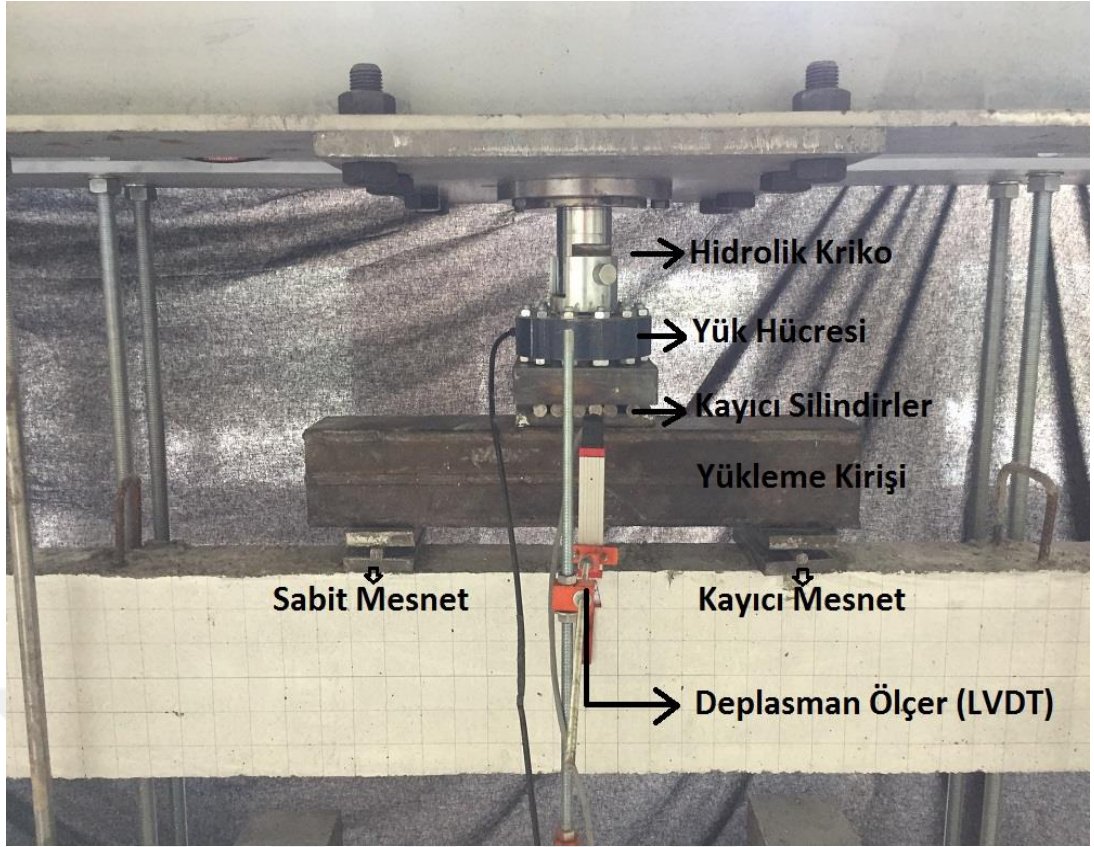
Kiriş orta nokta deplasmanı, bu noktaya yerleştirilen LVDT ile gerçekleştirilmiştir.

Çatlak gelişimini daha rahat izleyebilmek ve çatlaklarının yerlerini rahat belirleyebilmek amacıyla kiriş üzerine 50 mm lik karelaj yapılmıştır.

Yükleme sırasında yük ve yüke karşılık oluşan deplasman değerleri bir veri okuyucudan geçirilerek bilgisayara aktarılmıştır.



Şekil 2.10. Yükleme Sistemi



Şekil 2.11. Yükleme Düzenegi

2.5. DENEYLER

2.5.1. NC2S3 (C6S12) Deneyi

Bu deney elemanında C30 normal dayanımlı beton kullanılmıştır. Çekme bölgesinde 6 mm çaplı 2 adet karbon donatı ve 12 mm çaplı 3 adet çelik donatı kullanılmıştır. Normal dayanımlı beton kullanılan elemanlardaki dengeli donatı oranı $\rho_{f,b}=0.13\%$ 'dir. Hibrit kirişte kullanılan etkili donatı oranı $\rho_{eff}=0.27\%$ 'dür. Kiriş denge üstü olacak şekilde tasarlanmıştır. 42 kN yük ve 4.41 mm deplasmanda 7 adet ana eğilme çatlakı belirlenmiştir. Bu çatlakların basınç yüzüne mesafesi yaklaşık 13 mm dir. Yük 80 kN ve deplasman 27.8 mm olduğunda eğilme çatlaklarının basınç yüzüne 3 cm yaklaştığı belirlenmiştir. 90 kN yük ve 42 mm deplasmanda sağ yük mesnedine yakın betonda ezilme gözlenmiştir. Yük 98 kN iken karbon donatıda ilk kopma gerçekleşmiş ve yük birden 52 kN seviyelerine düşmüştür. Deplasman 61 mm dir. Basınç bölgesindeki betonda ezilme belirginleşmiştir. Yük 94 kN seviyelerinden ikinci

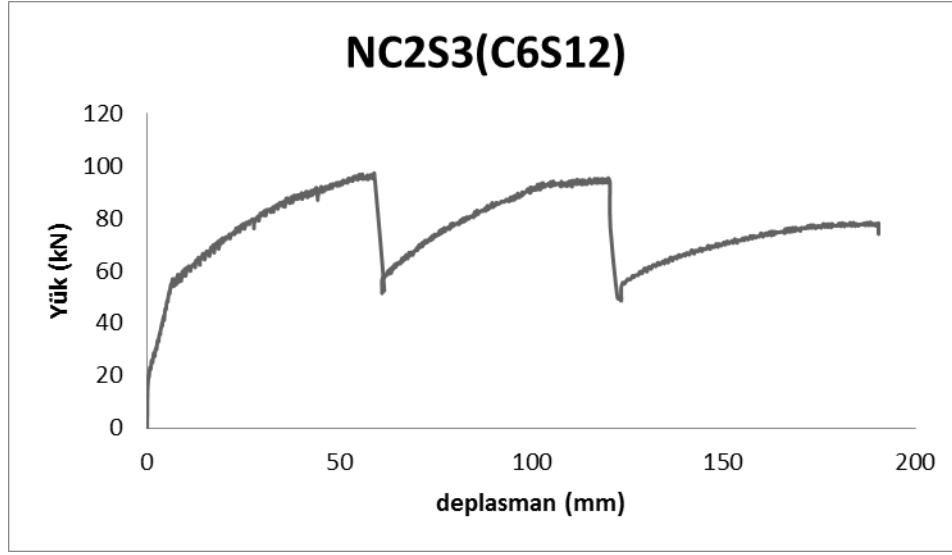
kopma ile 49 kN seviyelerine düşmüştür. Yük toparlanarak 74 kN seviyelerine çıkmıştır. Deplasman 190 mm civarında iken deney güvenliği için deneye son verilmiştir.



Sekil 2.12. NC2S3 (C6S12) Deneyi Yükleme sonrası görünüşü



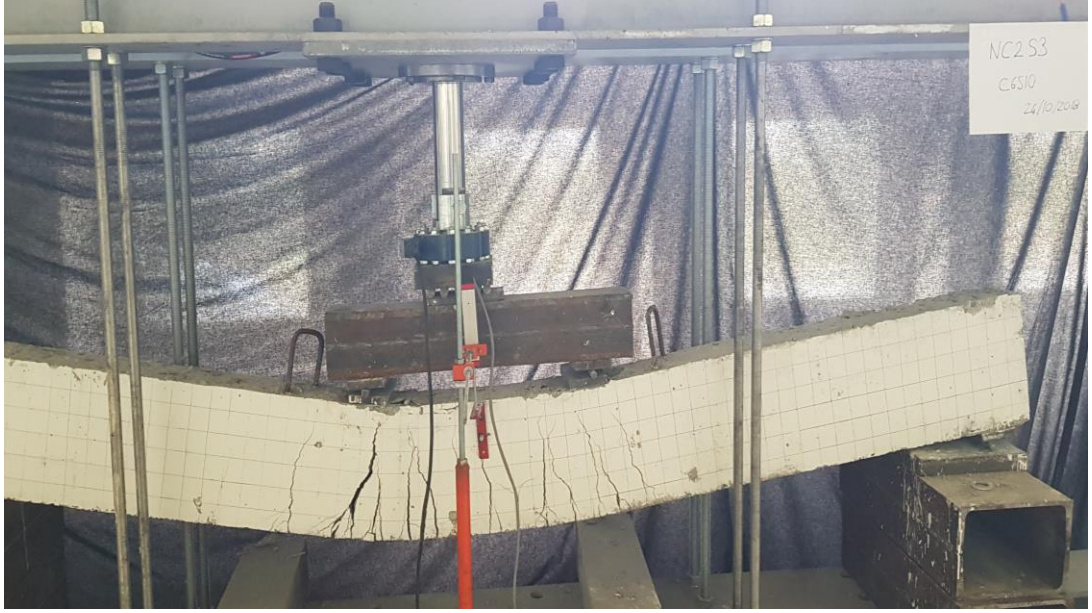
Sekil 2.13. NC2S3 (C6S12) Elemanı çatlak gelişimi



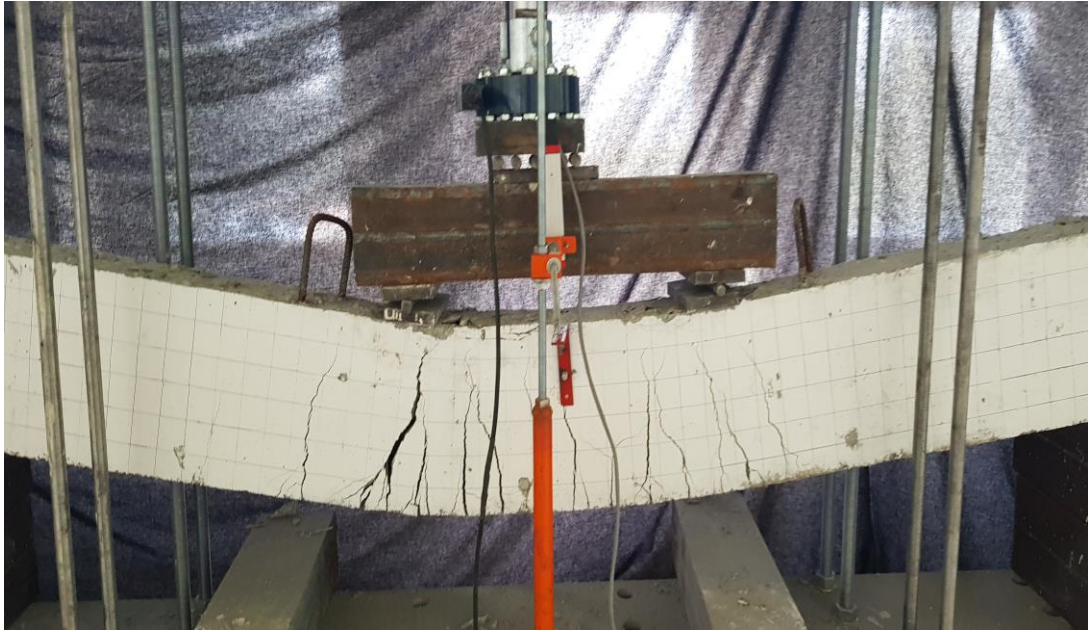
Şekil 2.14. NC2S3 (C6S12) Elemanı Yük Deplasman Grafiği

2.5.2. NC2S3 (C6S10) Deneyi

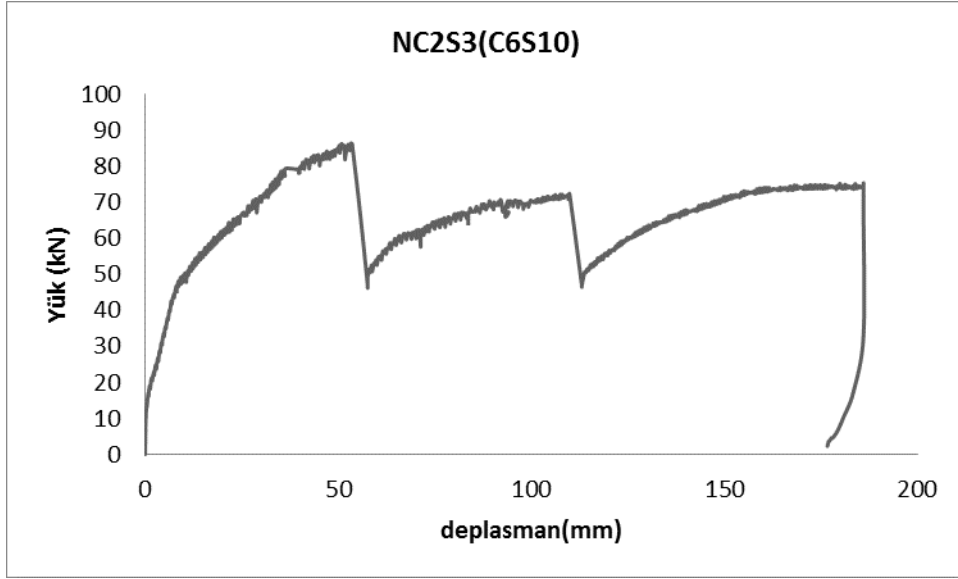
Bu deney elemanında C30 normal dayanımlı beton kullanılmıştır. Çekme bölgesinde 6 mm çaplı 2 adet karbon donatı ve 10 mm çaplı 3 adet çelik donatı kullanılmıştır. Normal dayanımlı beton kullanılan elemanlardaki dengeli donatı oranı $\rho_{f,b}=0.13\%$ 'dir. Hibrit kirişte kullanılan etkili donatı oranı $\rho_{eff}=0.23\%$ 'dür. Kiriş denge üstü olacak şekilde tasarlanmıştır. 50 kN yük ve 10.61 mm deplasman değerinde kirişte 11 adet eğilme çatlakları belirlenmiştir. Bu çatlaklardan basınç yüzüne en yakını 10 cm mesafededir. 70 kN yük değerinde eğilme çatlaklarından basınç yüzüne en yakın olanın mesafesi 3 cm dir. Yük mesnedine yakın basınç yüzünde kabarmalar belirlenmiştir. Yük 85 kN dan kopma ile 46 kN a düşmüştür. Deplasman 58 mm seviyelerindedir. Yük 72 kN deplasman yaklaşık 110 mm iken kopma ile yük 47 kN seviyelerine düşmüştür. Daha sonra yük toparlanarak 75 kN seviyelerine gelmiştir. Yaklaşık 176 mm deplasman değerinde deney güvenliği için deneye son verilmiştir.



Şekil 2.15. NC2S3 (C6S10) Deneyi Yükleme sonrası görünüşü



Şekil 2.16. NC2S3 (C6S10) Elemanı çatlak gelişimi



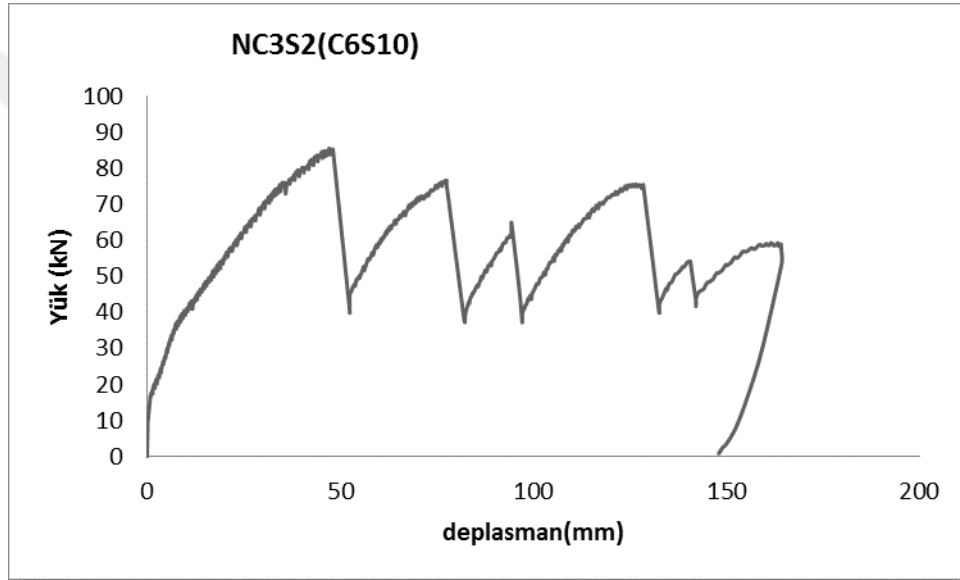
Şekil 2.17. NC2S3 (C6S10) Elemanı Yük Deplasman Grafiği

2.5.3. NC3S2 (C6S10) Deneyi

Bu deney elemanında C30 normal dayanımlı beton kullanılmıştır. Çekme bölgesinde 6 mm çaplı 3 adet karbon donatı ve 10 mm çaplı 2 adet çelik donatı kullanılmıştır. Normal dayanımlı beton kullanılan elemanlardaki dengeli donatı oranı $\rho_{f.b}=0.13\%$ 'dir. Hibrit kırıta kullanılan etkili donatı oranı $\rho_{eff}=0.26\%$ 'dür. Kiriş denge üstü olacak şekilde tasarlanmıştır. 42 kN yük ve 11.26 mm deplasmanda 9 adet eğilme çatlak belirlenmiştir. Bu çatlaklarda basınç yüzüne en yakın çatlak mesafesi 8 cm dir. 75 kN yük ve 35.10 mm deplasmanda 11 adet eğilme çatlak gözlenmiştir. Bu çatlaklardan en uzununun basınç yüzüne mesafesi 4 cm dir. 85 kN yük ve 48 mm deplasmanda 1. kopma gerçekleşmiştir. Yük 39 kN a düşmüştür. Yük mesnedi altında kabuklaşma görülmüştür, Bunun dışında ezilme yoktur. 75 kN yük ve 78 mm deplasmanda 2. kopma gerçekleşmiştir. Sol mesnet altında kabuk betonu kabarmıştır. Ezilme belirginleşmiştir. Yük 37 kN a düşmüştür. Yük tekrar 75 kN seviyelerine toparlanmıştır. Bu aşamada tekrar kopma olmuş ve yük 40 kN seviyelerine düşmüştür. Deplasman 128 mm dir. Daha sonra yük 54 kN a çıkmış ve 42 kN seviyelerine kopma ile düşmüştür. Yaklaşık 164 mm deplasman değerinde yük 56 kN a çıkmış, karbon liflerin kopmasıyla tekrar 29 kN seviyelerine düşmüştür. Yaklaşık 148 mm deplasman değerinde deney güvenliği için deneye son verilmiştir.



Sekil 2.18 NC3S2 (C6S10) Elemanı Deneyi



Sekil 2.19. NC3S2 (C6S10) Elemanı Yük Deplasman Grafiği

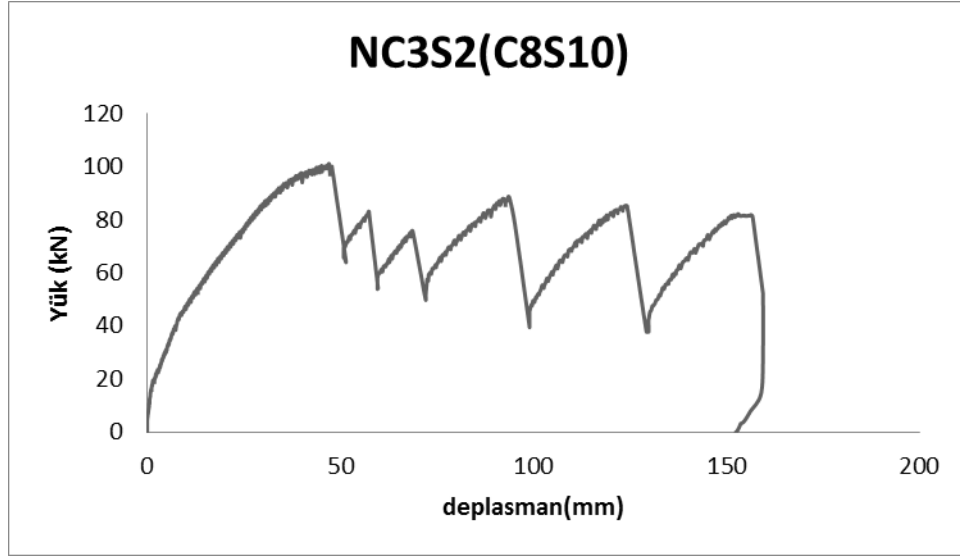
2.5.4. NC3S2 (C8S10) Deneyi

Bu deney elemanında C30 normal dayanımlı beton kullanılmıştır. Çekme bölgesinde 8 mm çaplı 3 adet karbon donatı ve 10 mm çaplı 2 adet çelik donatı kullanılmıştır. Normal dayanımlı beton kullanılan elemanlardaki dengeli donatı oranı $\rho_{f,b}=0.13\%$ 'dir. Hibrit kirişte kullanılan etkili donatı oranı $\rho_{eff}=0.42\%$ 'dür. Kiriş denge üstü olacak şekilde tasarlanmıştır. 40 kN yük ve 7.30 mm deplasmanda 6 adet eğilme çatlakları belirlenmiştir. Bu çatlaklardan basınç yüzüne en yakın olanın mesafesi

11 cm dir. Yük 75 kN a ulaştığında 10 adet eğilme çatlağı gözlenmiştir. Bu çatlakların basınç yüzüne en yakın olanın mesafesi 8 cm dir. Yük 98 kN deplasman 41 mm ye ulaştığında eğilme çatlakları basınç yüzüne 6 cm mesafededir. Ezilme yk plakasının altında gözlenmiştir. Yük 100 kN deplasman yaklaşık 48 mm iken 1. kopma gerçekleşmiştir. Yük aniden 66 kN a düşmüştür. Yük toparlanmış ancak 81 kN seviyelerinde tekrar bir kopma olmuştur. Yük 54 kN a düşmüştür. Tekrar toparlanmış ve 73 kN seviyelerine gelmiştir. Aniden kopma ile 51 kN a düşmüştür. Tekrar 81 kN seviyelerine çıkmıştır. Bu aşamada sol yk mesnedine yakın basınç bölgesindeki kabuk betonunda ezilme gözlenmiştir. Yük 87 kN dan 39 kN a düşmüştür. Donatı liflerinde bir kopma daha gerçekleşmiştir. Yük tekrar toparlanmış 85 kN a ulaşmıştır. Bu esnada yine ani bir kopma ile yük 39 kN a düşmüştür. Yük toparlanarak 81 kN seviyesine ulaşmıştır. Bu asamadan sonra deney güvenliği için deneye son verilmiştir. Bu elemanda yükleme kirişi mesnet altlarındaki ezilme dışında basınç bölgesinde betonda ezilme pek olmamıştır. Basınç bölgesindeki kabukta belirgin ezilme daha sonra gözlenmiştir.



Sekil 2.20. NC3S2 (C8S10) Elemanı Deneyi



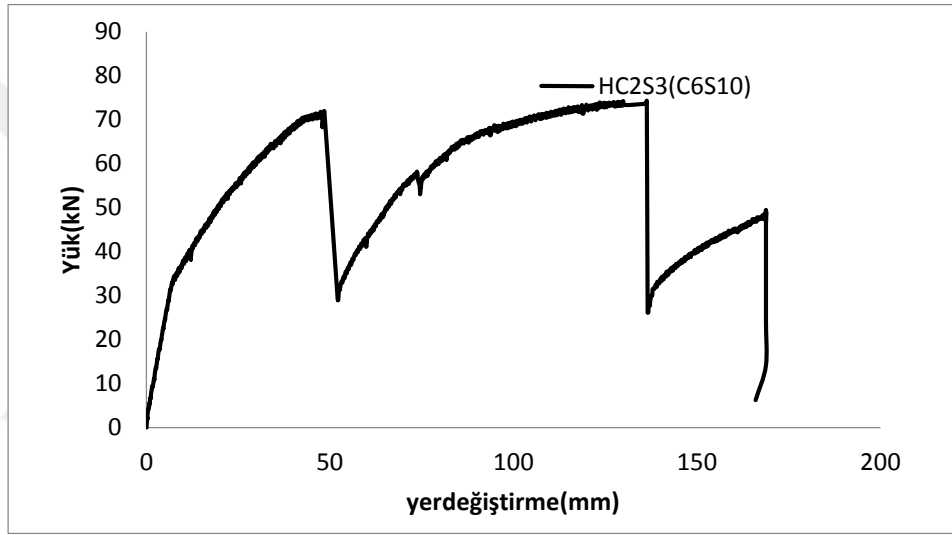
Sekil 2.21. NC3S2 (C8S10) Elemanı Yük Deplasman Grafiği

2.5.5. HC2S3 (C6S10) Deneyi

Bu deney elemanında C60 yüksek dayanımlı beton kullanılmıştır. Çekme bölgesinde 6 mm çaplı 2 adet karbon donatı ve 10 mm çaplı 3 adet çelik donatı kullanılmıştır. Normal dayanımlı beton kullanılan elemanlardaki dengeli donatı oranı $\rho_{f,b}=0.2\%$ 'dir. Hibrit kirişte kullanılan etkili donatı oranı $\rho_{eff}=0.22\%$ 'dür. Kiriş denge üstü olacak şekilde tasarlanmıştır. 40 kN yük ve 11.84 mm deplasman değerinde 6 tane eğilme çatlakları belirlenmiştir. Bu çatlaklardan basınç yüzüne en yakın olanı 6 cm mesafededir. 71 kN yük ve 46 mm deplasman değerinde kabuk betonunda ezilme belirlenmiştir. Sol yük mesnedine yakın basınç bölgesi betonunda kabarma olmuştur. Eğilme çatlaklarından basınç yüzüne en yakın olanı 4 cm mesafededir. Sağ yük mesnedinde de az miktarda ezilme belirlenmiştir. Donatıda kopma gerçekleşmiştir. Yük aniden 31 kN düşmüştür. Deplasman 53 mm olarak belirlenmiştir. Yük tekrar toparlanmıştır. 56 kN yük ve 72 mm deplasmanda basınç bölgesi betonunda ezilme iyice belirginleşmiştir. Sağ yük mesnedine yakın bölgede kabarma gözlenmiştir. Yük 73 kN deplasman yaklaşık 135 mm iken yine kopma gerçekleşmiştir. Yük aniden 28 kN a düşmüştür. Yük tekrar toparlanmıştır. 48 kN değerine ulaştığında deney güvenliği için deneye son verilmiştir.



Sekil 2.22. HC2S3 (C6S10) Elemanı deneyi

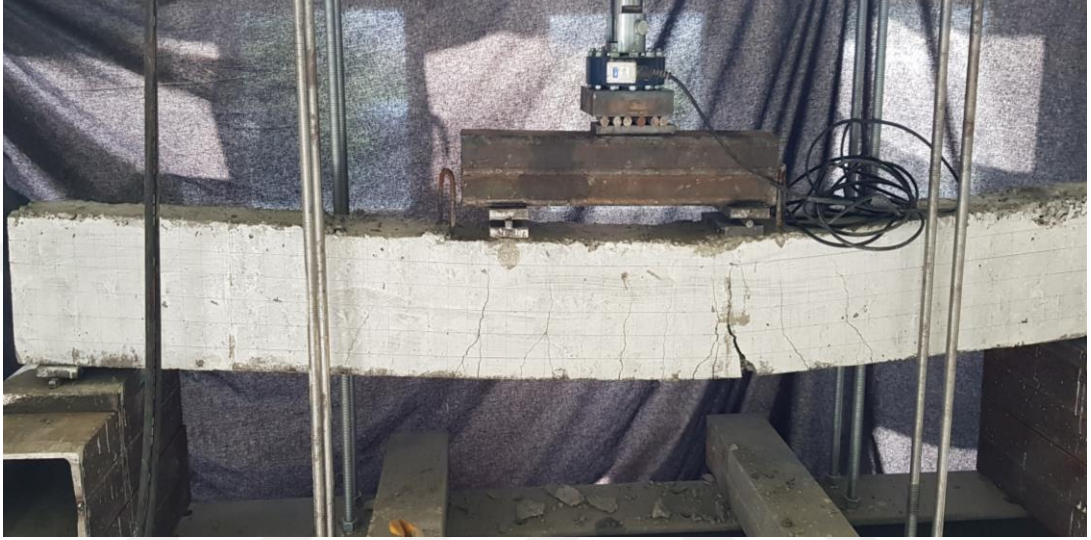


Sekil 2.23. HC2S3 (C6S10) Elemanı Yük Deplasman Grafiği

2.5.6. HC3S2 (C8S10) Deneyi

Bu deney elemanında C60 yüksek dayanımlı beton kullanılmıştır. Çekme bölgesinde 8 mm çaplı 3 adet karbon donatı ve 10 mm çaplı 2 adet çelik donatı kullanılmıştır. Normal dayanımlı beton kullanılan elemanlardaki dengeli donatı oranı $\rho_{f,b}=0.2\%$ 'dir. Hibrit kirişte kullanılan etkili donatı oranı $\rho_{eff}=0.42\%$ 'dür. Kiriş denge üstü olacak şekilde tasarlanmıştır. 50 kN yük ve 10.08 mm deplasman değerinde 8 adet eğilme çatlakları belirlenmiştir. Bu çatlaklardan basınç yüzüne en yakın olanın mesafesi 6 cm dir. Yük 80 kN ve deplasman 22.7 mm iken eğilme çatlaklarından basınç yüzüne

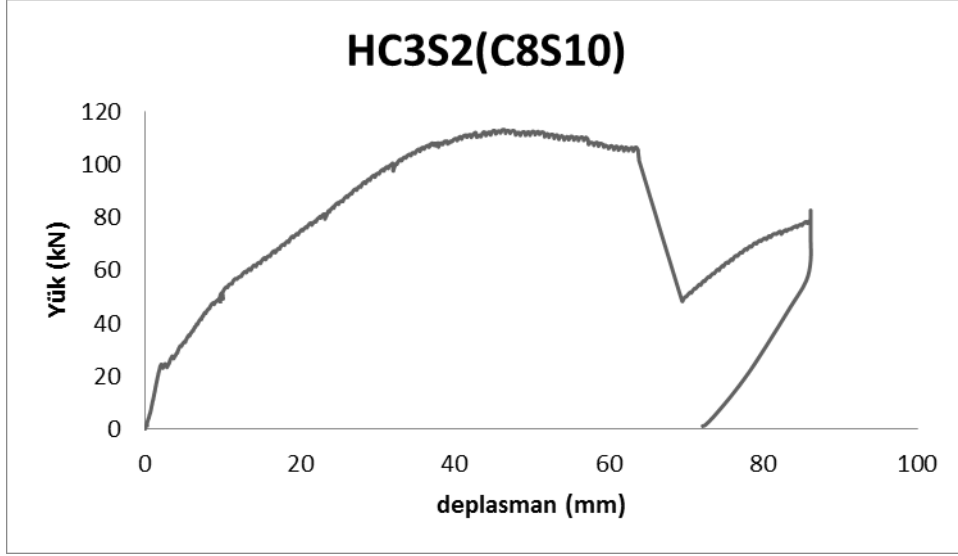
en yakın olanın mesafesi 4 cm olarak belirlenmiştir. Yük 100 kN a ulaştığında deplasman 32 mm değerindedir. Yük 110 kN a çıkmıştır. 106 kN yük değerinde kabuk betonunun ezilmeye başladığı belirlenmiştir. Donatıda kopma gerçekleşmiştir. Yük 35 kN a düşmüş deplasman yaklaşık 69 mm seviyelerindedir. Yük toparlanmıştır. 81 kN yük ve 86 mm deplasmanda LVDT nin kapasitesi bittiği için deneye son verilmiştir.



Sekil 2.24. HC3S2 (C8S10) Deneyi Yükleme sonrası görünüşü



Sekil 2.25. HC3S2 (C8S10) Elemanı çatlak gelişimi



Sekil 2.26. HC3S2 (C8S10) Elemanı Yük Deplasman Grafiği

2.5.7. HC2S3 (C8S12) Deneyi

Bu deney elemanında C60 yüksek dayanımlı beton kullanılmıştır. Çekme bölgesinde 8 mm çaplı 2 adet karbon donatı ve 12 mm çaplı 3 adet çelik donatı kullanılmıştır. Normal dayanımlı beton kullanılan elemanlardaki dengeli donatı oranı $\rho_{f,b}=0.2\%$ 'dir. Hibrit kirişte kullanılan etkili donatı oranı $\rho_{eff}=0.37\%$ 'dür. Kiriş denge üstü olacak şekilde tasarlanmıştır. 30 kN yük ve 3.63 mm deplasmanda 2 tane eğilme çatlakı görülmüştür. Bunlardan biri tam kirisin ortasında diğeri ortanın sağındadır. Yük 51 kN deplasman 7.35 mm ye ulaştığında 4 eğilme çatlakı belirlenmiştir. Bunlardan basınç yüzüne en yakını 13 cm mesafededir. 80 kN yük ve 17 mm deplasmanda basınç yüzüne en yakın eğilme çatlakının mesafesi 7 cm dir. 100 kN yük ve 31.90 mm de en uzun eğilme çatlakının basınç yüzüne mesafesi 3 cm olarak belirlenmiştir. 106 kN yük ve 37 mm deplasmanda basınç bölgesindeki kabuk betonunda kabarma belirlenmiştir. 109 kN yük ve 41 mm deplasmanda kopma gerçekleşmiş ve yük 70 kN a düşmüş deplasman ise 43 mm ye ulaşmıştır. Yük toparlanmıştır. 85 kN yük ve 49 mm deplasmanda kabuk betonundaki ezilmenin sağ yük mesnedine yakın olduğu belirlenmiştir. 92 kN yük ve 56 mm deplasmanda basınç yüzündeki ezilme belirginleşmiştir. 110 kN yük ve 82 mm deplasman seviyesinde kopma

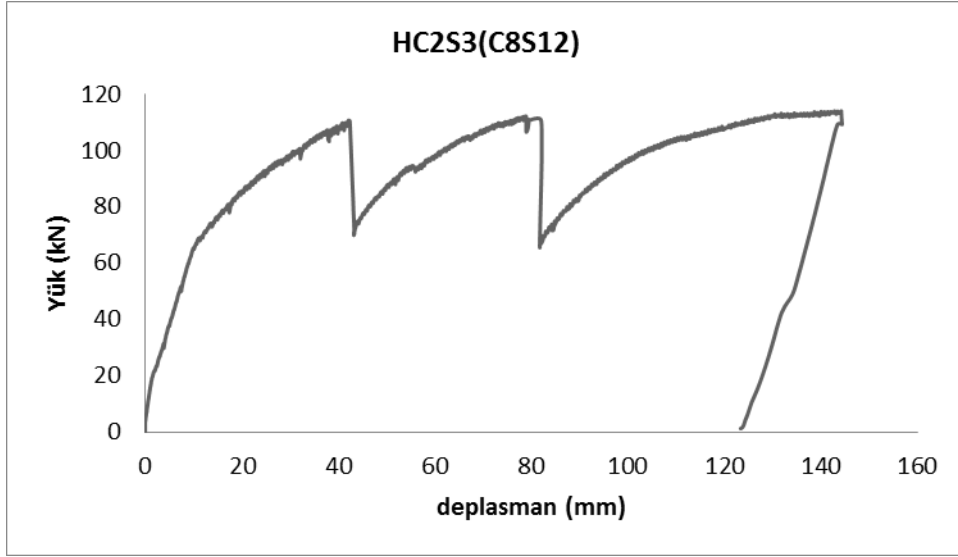
gerçekleşmiştir ve yük 70 kN seviyelerine düşmüştür. Yük tekrar toparlanmıştır. Yaklaşık 113 kN yük ve 144 mm deplasman değerinde deney güvenliği için deneye son verilmiştir.



Sekil 2.27. HC2S3 (C8S12) Deneyi Yükleme sonrası görünüşü



Sekil 2.28. HC2S3 (C8S12) Elemanı çatlak gelişimi



Sekil 2.29. HC2S3 (C8S12) Elemanı Yük Deplasman Grafiği



3. TEORİK ANALİZ

FRP donatılı kirişlerin eğilme davranışı incelendiğinde çelik donatılı kirişlere göre çatlak sayısının ve çatlak genişliklerinin fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni FRP donatının yüksek kopma dayanımına karşın elastisite modülünün küçük olmasıdır. FRP donatılı kirişler göçmeye kadar lineer bir davranış gösterirler ve akma olmaksızın taşıma kapasitesine ulaşırlar. Beton ve FRP gibi iki gevrek malzemenin bir arada kullanılmasında betonun FRP donatıdan daha gevrek olduğu göz önünde bulundurularak FRP donatılı kirişlerin denge üstü olarak tasarlanması gerektiği sonucunu kabul edilmektedir ACI 440.1R-15 [25].

ACI 440.1R-15 [25] yönetmeliğinde FRP donatı oranı ve dengeli donatı oranını hesaplanması için denklem (1) ve denklem (2) kullanılmaktadır. Donatı oranı (ρ_f), dengeli donatı oranı (ρ_{fb}), ile gösterilmiştir.

$$\rho_f = \frac{A_f}{b.d} \quad (3.1)$$

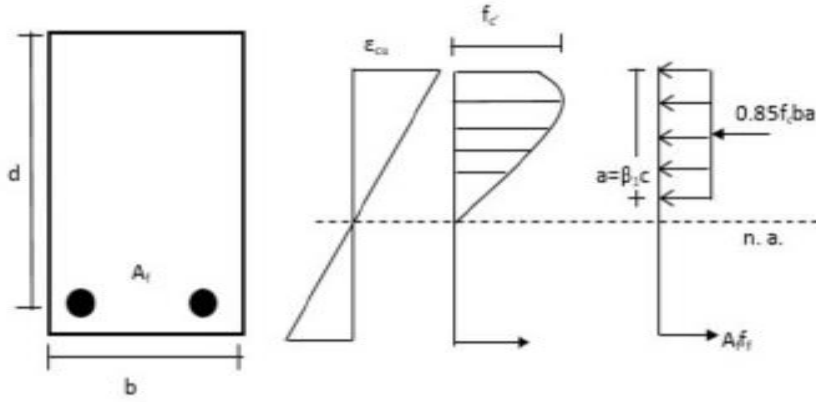
$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f_c}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (3.2)$$

Tez çalışması kapsamında deneyleri yapılan kirişlerin donatı oranları tablo3.1 de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Deney elemanları donatı oranları

Eleman	A_s	A_f	ρ_{eff} (%)	$\rho_{f.b}$ (%)	$\rho_{eff}/\rho_{f.b}$
HC2S3(C6S10)	235.6	56.5	0.22	0.20	1.1
HC3S2(C8S10)	157.1	150.8	0.42	0.20	2.1
HC2S3(C8S12)	339.3	100.5	0.37	0.20	1.85
NC2S3(C6S10)	235.6	56.5	0.23	0.13	1.77
NC2S3(C6S12)	339.3	56.5	0.27	0.13	2.08
NC3S2(C8S10)	157.1	150.8	0.42	0.13	3.24
NC3S2(C6S10)	157.1	84.8	0.26	0.13	2

Eğer $\rho_f > \rho_{fb}$ ise göçme betonun ezilmesi ile başlar. Kesitteki gerilme dağılımı şekil 3.1 de görülmektedir.



Sekil 3.1. Eşdeğer basınç bloğu ve kuvvetler dengesi

$$M_n = A_f f_f \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (3.3)$$

$$a = \frac{A_f f_f}{0.85 f_c b} \quad (3.4)$$

$$f_f = \sqrt{\left(\frac{E_f \varepsilon_{cu}}{4} \right)^2 + \frac{0.85 \beta_1 f_c}{\rho_f} E_f \varepsilon_{cu} - 0.5 E_f \varepsilon_{cu}} \leq f_{fu} \quad (3.5)$$

Hibrit kirişlerin tasarımı FRP donatı taşıma gücüne erişmeden önce çelik donatının aktığı kabulüne göre yapılmaktadır. Tarafsız eksenin derinliği çekme ve basınç bölgesindeki kuvvetlerin eşitliğinden faydalanarak hesaplanmaktadır (denklem 3.6). Betonun birim şekil değiştirmesi 0.003 alınarak çekme bölgesindeki donatıların birim şekil değiştirmesi hesaplanmaktadır. Aynı seviyedeki çelik ve FRP donatının eşit şekil değiştirme yaptığı kabulü ile donatılardaki birim şekil değiştirmeler hesaplanır ($\varepsilon_f, \varepsilon_s$).

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

$$F_c = F_s + F_f \quad (3.6)$$

$$F_c = 0.85 f_c b a \quad (3.7)$$

$$F_s = A_s f_y \quad (3.8)$$

$$F_f = A_f f_f \quad (3.9)$$

ACI-318 [26] dikdörtgen gerilme bloğu kabulü ile FRP çekme gerilmesi (f_f) denklem 3.10 ile hesaplanır. Tasarımda hedeflenen sünek davranışa ait taşıma kapasitesi (M_n) denklem 3.11 ile hesaplanır

$$f_f = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{A_s f_y}{A_f} + E_f \varepsilon_{cu} \right)^2 + \left(0.85 \frac{\beta_1 f_c}{\rho_f} - \frac{A_s f_y}{A_f} \right) E_f \varepsilon_{cu} - \frac{1}{2} \left(\frac{A_s f_y}{A_f} + E_f \varepsilon_{cu} \right)} \leq f_{fu} \quad (3.10)$$

$$M_n = (\rho_s f_y + \rho_f f_f) \left(1 - 0.59 \frac{\rho_s f_y + \rho_f f_f}{f_c} \right) b d^2 \quad (3.11)$$

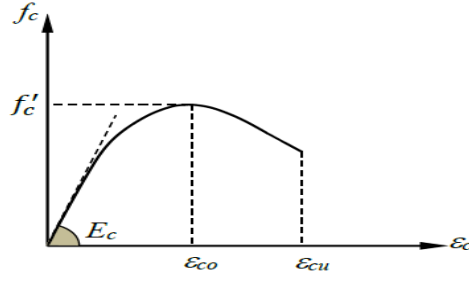
Çizelge 3.2 de görüldüğü gibi normal dayanımlı beton kullanılan kirişlerde teorik ve deneysel taşıma güçleri birbirine oldukça yakın elde edilmiştir. Yüksek dayanımlı beton kullanılan kirişlerde ise teorik taşıma güçleri deneysel taşıma gücünden büyüktür ve bu fark en fazla HC2S3(C6S10) elemanında belirgindir.

Çizelge 3.2. Deney elemanlarının teorik ve deneysel taşıma gücü değerleri

Eleman	ρ_{eff}/ρ_b	P_u Teorik (kN)	P_u deneysel (kN.)	$P_{u(teorik)}$ / $P_{u(deneysel)}$
HC2S3 (C6S10)	1.1	110,14	74,3	1,5
HC3S2 (C8S10)	2.1	144,84	113,3	1,3
HC2S3 (C8S12)	1.85	143,90	114,1	1,26
NC2S3 (C6S10)	1.77	89,02	86	1,04
NC2S3 (C6S12)	2.08	100,66	97	1,04
NC3S2 (C8S10)	3.24	110,66	101,2	1,09
NC3S2 (C6S10)	2	92,00	85,5	1,08

Bu çalışmada kullanılan sayısal yöntemde deney elemanlarının moment eğrilik ilişkilerinden faydalanarak yük deplasman eğrileri çizilmiş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Moment eğrilik bağıntıları elde edilirken betonun basınç altındaki gerilme birim şekil değiştirme ilişkisi Hognestad beton modeli ile tanımlanmıştır. (Şekil 3.2).çelik donatının gerilme birim şekil değiştirme ilişkisi ise akmaya kadar doğrusal akma anından sonra kopmaya kadar sabit tanımlanmıştır (Şekil 3.3). FRP

donatı ise gerilme şekil değiştirme ilişkisi doğrusal olacak şekilde modellenmiştir (Şekil.3.4.).

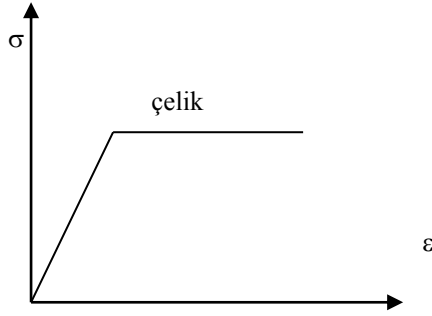


Şekil 3.2 Hognestad beton modeli

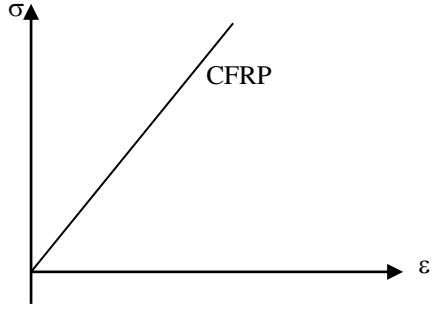
$$f_c = f_c \left(\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right) \quad \varepsilon_c \leq \varepsilon_{co} \quad (3.12)$$

$$f_c = f_c \left[1 - 0,15 \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{co}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co}} \right) \right] \quad \varepsilon_{co} \leq \varepsilon_c < \varepsilon_{cu} \quad (3.13)$$

Betonun çekme dayanımı dikkate alınmamıştır. Çelik donatının ve FRP donatının gerilme birim deformasyon ilişkileri Şekil 3.3 ve 3.4 te gösterildiği gibi kullanılmıştır.

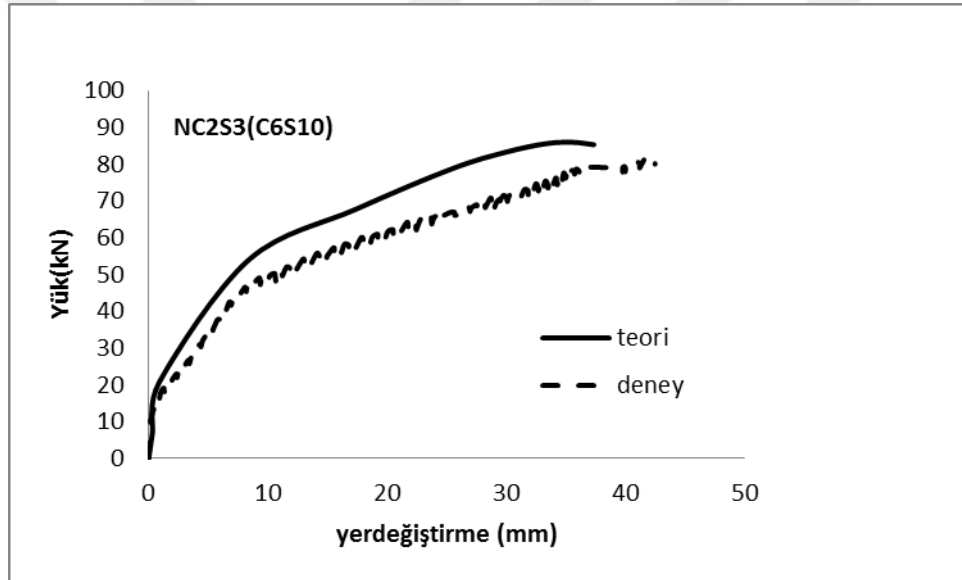


Şekil 3.3 Çelik donatı gerilme birim şekil değiştirme ilişkileri

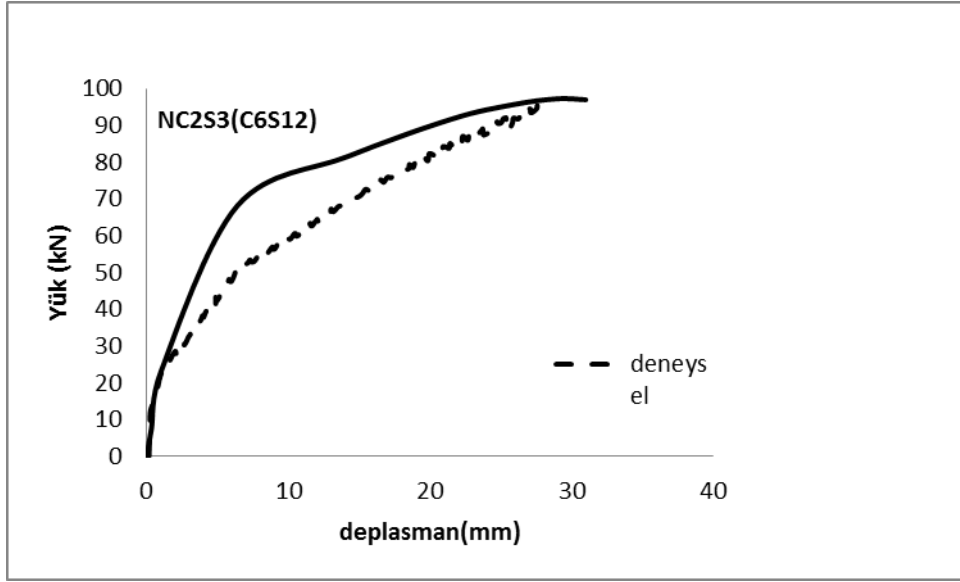


Şekil 3.4 CFRP gerilme birim şekil değıştirme ilişkileri

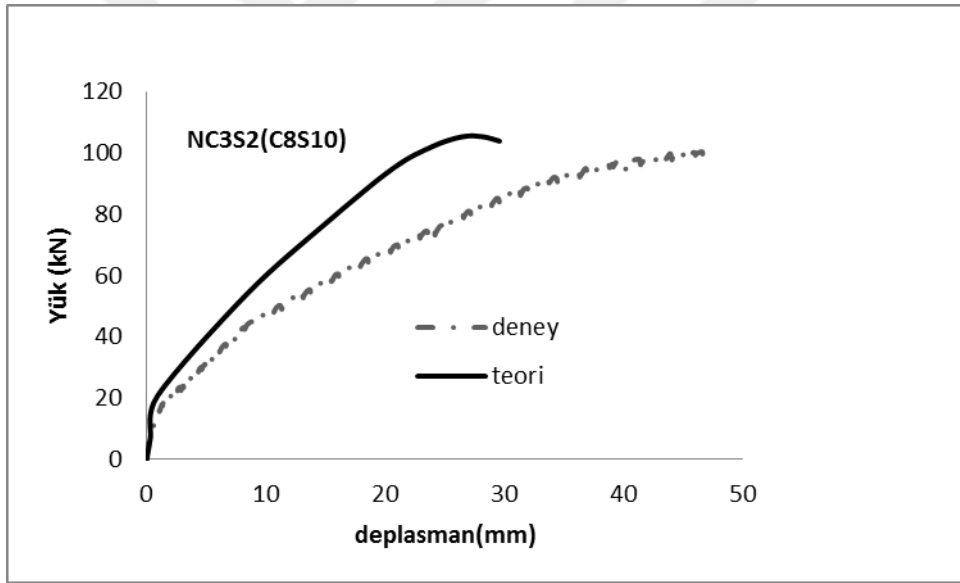
Şekil 3-5 ten Şekil 3-11'e kadar olan bölümde teorik taşıma gücüne kadar deneysel yük deplasman eğrileri ile teorik yük deplasman eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



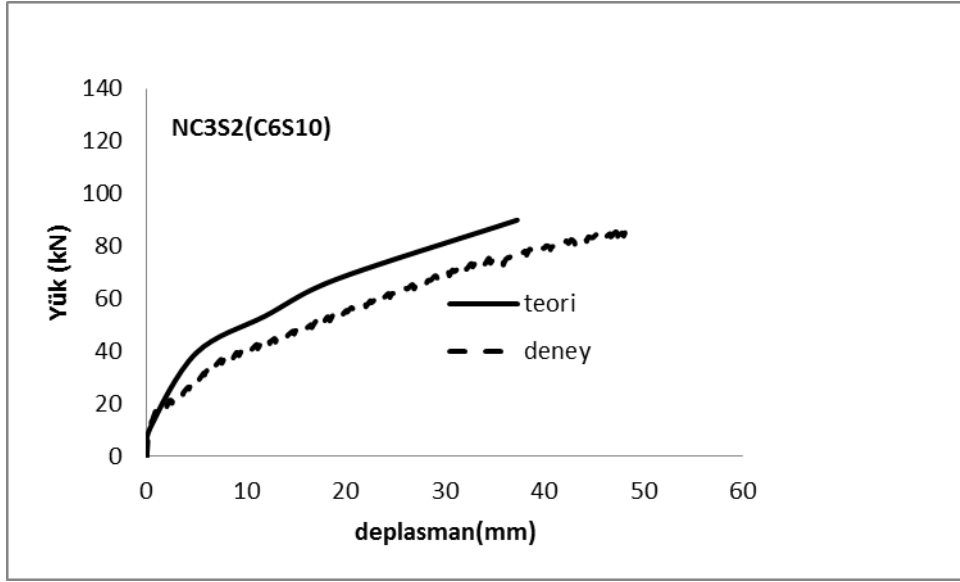
Şekil 3.5 NC2S3(C6S10) elemanı deneysel ve teorik yük deplasman grafiğı



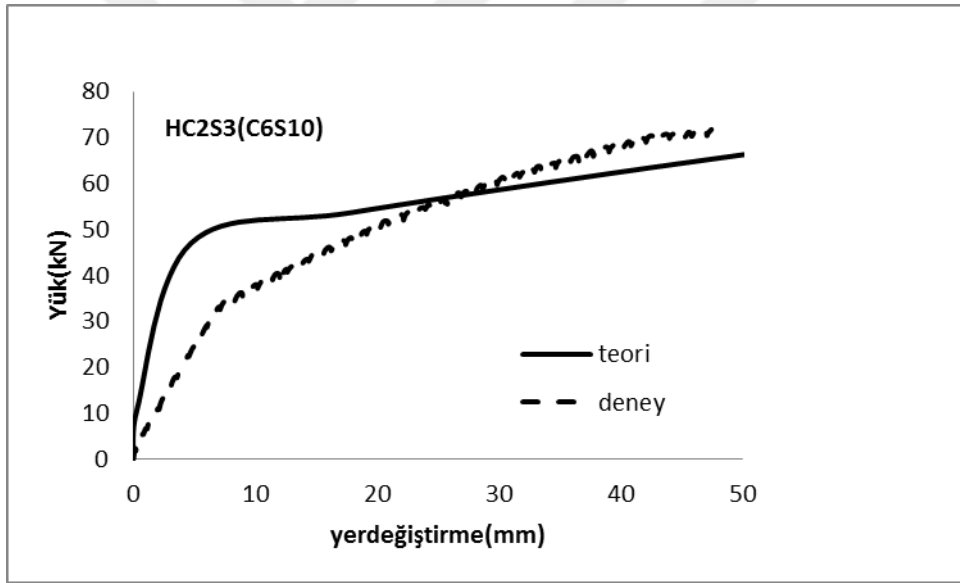
Şekil 3.6 NC2S3(C6S12) elemanı deneysel ve teorik yük deplasman grafiği



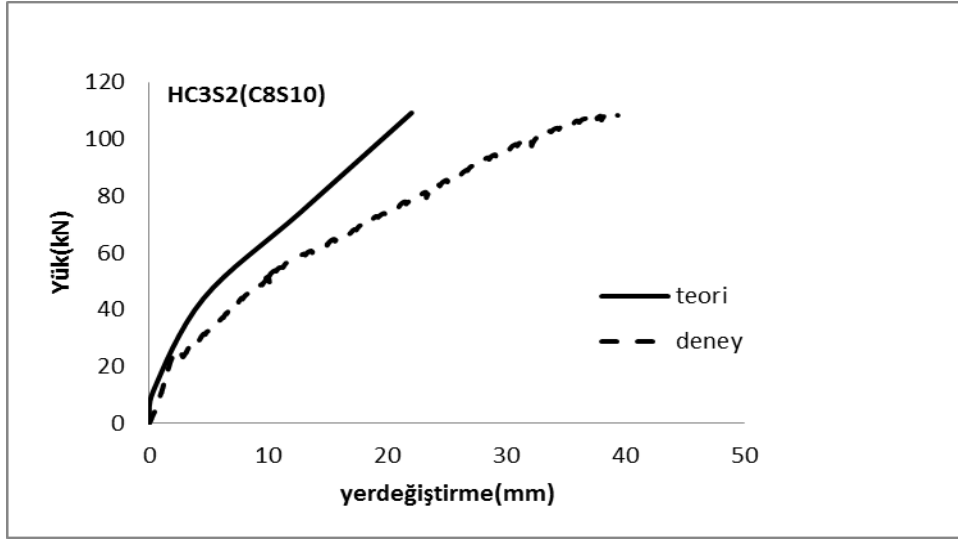
Şekil 3.7. NC3S2(C8S10) elemanı deneysel ve teorik yük deplasman grafiği



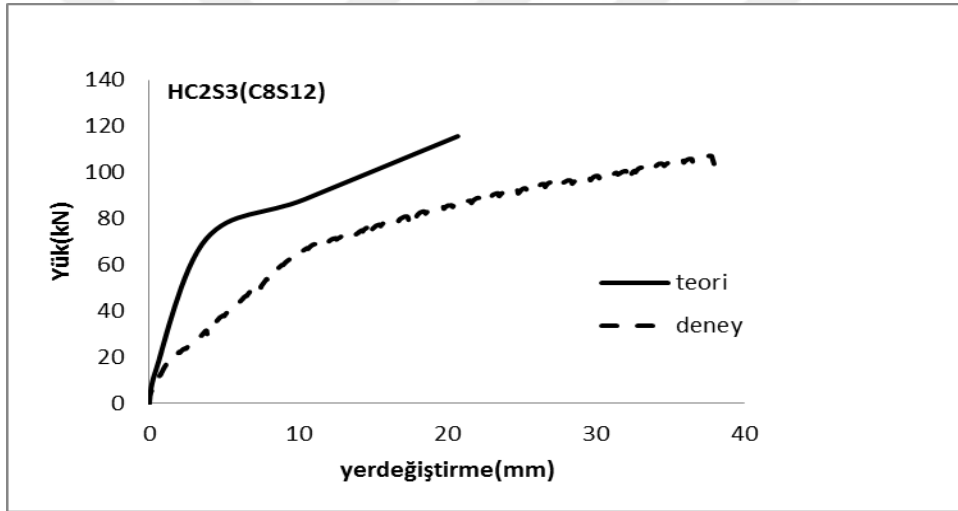
Şekil 3.8. NC3S2(C6S10) elemanı deneysel ve teorik yük deplasman grafiği



Şekil 3.9. HC2S3(C6S10) elemanı deneysel ve teorik yük deplasman grafiği



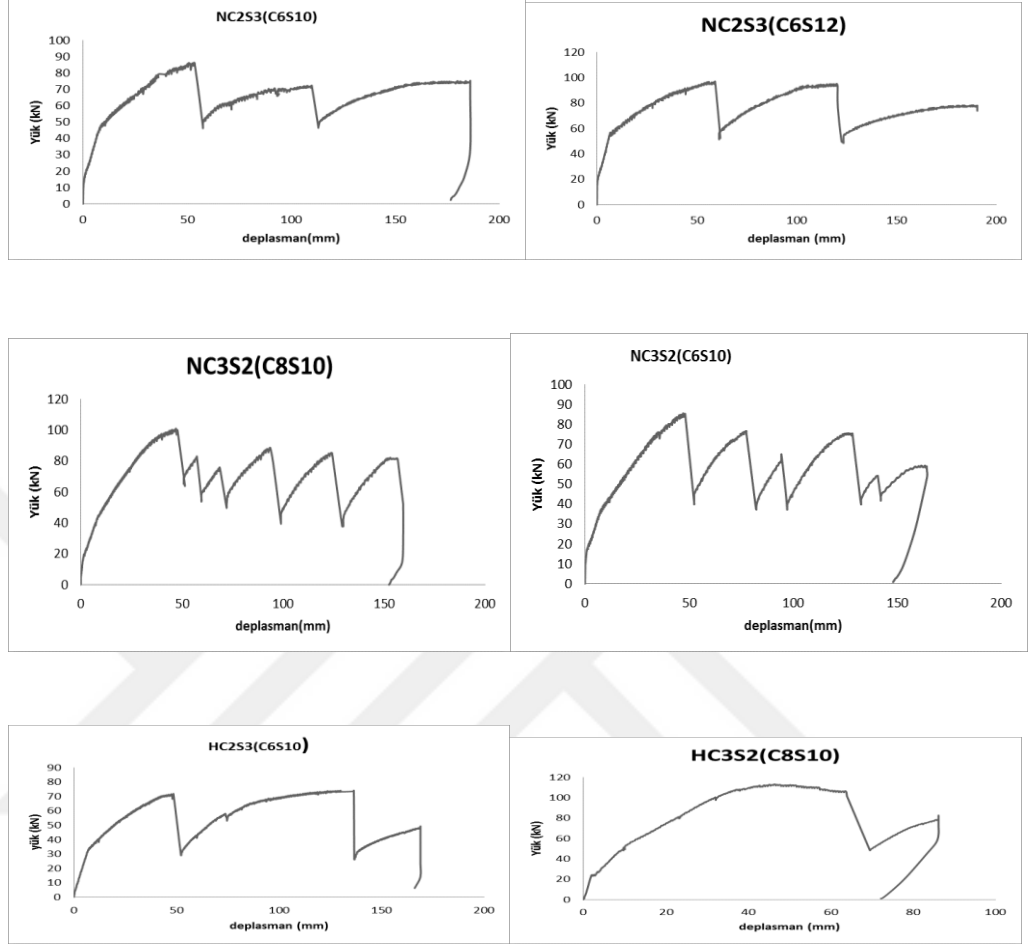
Şekil 3.10. HC3S2(C8S10) elemanı deneysel ve teorik yük deplasman grafiği



Şekil 3.11. HC2S3(C8S12) elemanı deneysel ve teorik yük deplasman grafiği

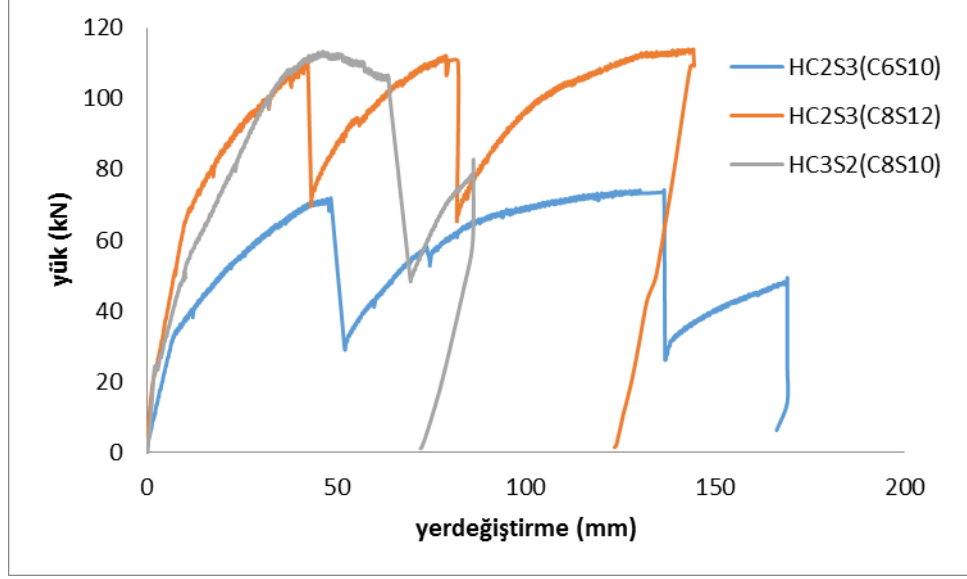
Şekil 3.5-3.8 de teorik taşıma gücü değerlerine kadar yük deplasman grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Normal dayanımlı beton kullanılan deney elemanlarında deneysel ve teorik yük deplasman eğrileri birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Şekil 3.9-3.11 de ise yüksek dayanımlı beton kullanılan kiriş elemanlarında deneysel ve teorik yük deplasman eğrileri arasındaki farklar artmıştır. Bu durumun moment eğrilik ilişkisi elde edilirken kullanılan beton modelinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ



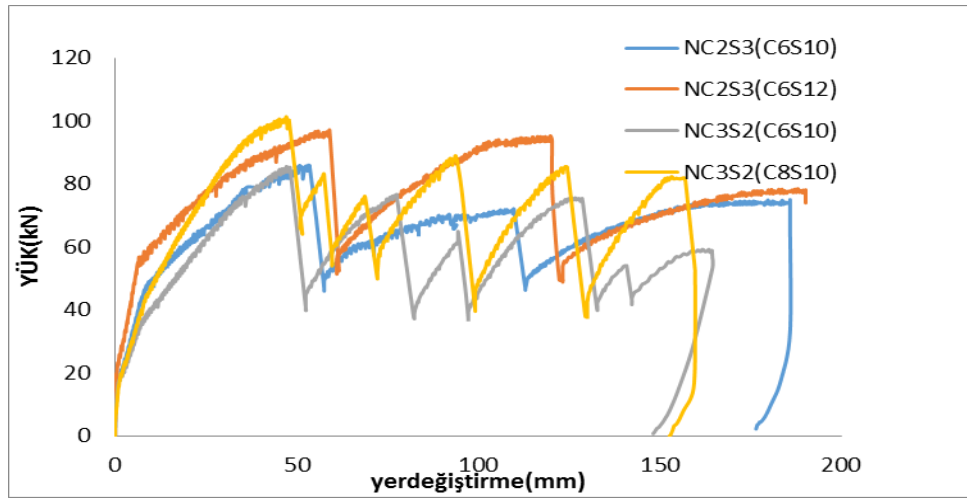
Sekil 4.1. Deney elemanları yük deplasman grafikler

Deney elemanlarının yük-deplasman grafikleri (Sekil 4.1)ayrı ayrı incelendiğinde, Karbon donatıda kopmanın gerçekleşmesiyle yükte ani düşüş olduğu görülmüştür. Kirişlerin içindeki çelik donatılar yükün toparlanarak artmasını ve deplasman artışını sağlamaktadır.



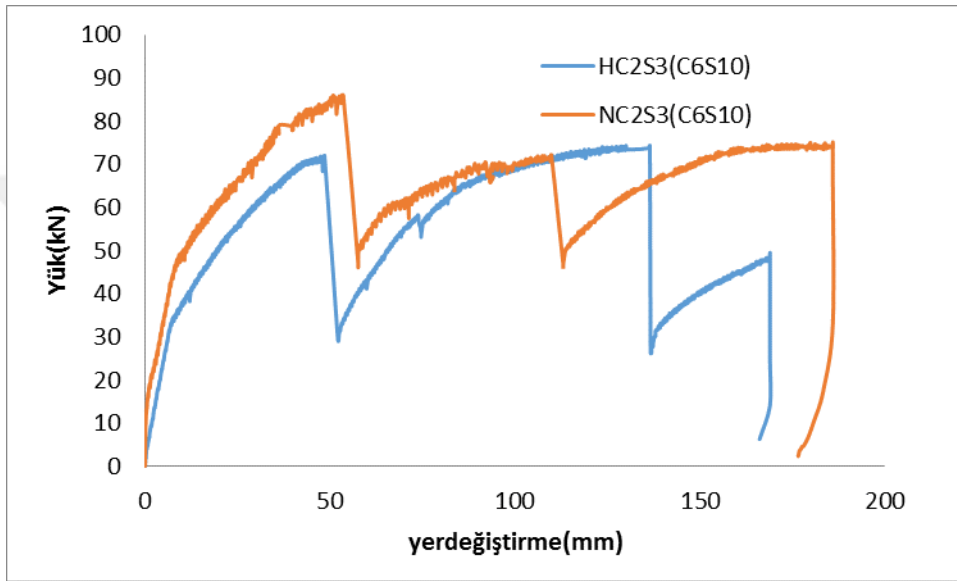
Sekil 4.2. Yüksek dayanımlı elemanların yük deplasman grafikleri

Yüksek dayanımlı elemanlar kendi aralarında değerlendirildiklerinde (Şekil 4.2) en yüksek dayanımın HC2S3 (C8S12) elemanında olduğu gözlenmiştir. HC2S3 (C6S10) ve HC2S3 (C8S12) birbirlerine yakın çelik donatı alanlarına sahip olmalarına rağmen karbon donatı çapının artması dayanımda yaklaşık %60 artışa neden olmuştur.

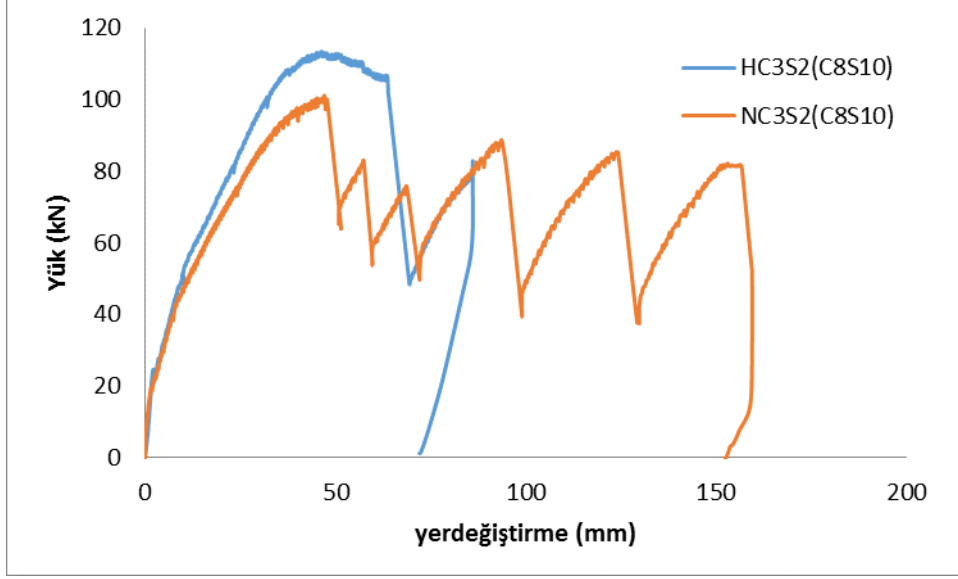


Sekil 4.3. Normal dayanımlı elemanların yük deplasman grafikleri

Normal dayanımlı elemanlar kendi aralarında karşılaştırıldıklarında(Sekil 4.3) aynı çelik donatı alanına sahip NC3S2 (C6S10) ve NC3S2 (C8S10) elemanlarında karbon donatı çapındaki artışın yaklaşık %15 dayanım artışı sağladığı belirlenmiştir. Aynı karbon donatı alanlarına sahip NC2S3 (C6S10) (Sekil 4.4)ve NC2S3 (C6S12) elemanlarında (Sekil 4.5) çelik donatı alanındaki artışın yaklaşık %10 dayanım artışı sağladığı tespit edilmiştir.



Sekil 4.4. HC2S3 (C6S10) ve NC2S3 (C6S10) elemanları yük deplasman grafikleri



Sekil 4.5. HC3S2 (C6S10) ve NC3S2 (C8S10) elemanları yük deplasman grafikleri

Normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı elemanların karşılaştırıldığı yukarıdaki iki grafik incelendiğinde beton dayanımındaki artışın eğilme etkisindeki kirişlerin dayanımında önemli bir artış sağlamadığı görülmektedir.

5.SONUÇLAR

Bu çalışmada normal ve yüksek dayanımlı CFRP (karbon) ve çelik donatı kullanılan hibrit kirişlerin eğilme altında davranışları incelenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Tüm deney elemanları denge üstü donatı oranına sahiptirler. Tüm kirişlerde önce basınç bölgesindeki beton ezilmiş, ardından karbon donatının kopmasıyla taşıma gücüne ulaşılmıştır.
- Karbon donatıların kopmasıyla yük değerlerinde düşüşler olmuştur ancak kirişteki mevcut çelik donatılarla yük tekrar artarak kiriş deplasman yapmaya devam etmiştir.
- Normal dayanımlı kirişlerin ve yüksek dayanımlı kirişlerin taşıma güçleri karşılaştırıldığında, beton basınç dayanımının; karbon-çelik donatılı hibrit kirişlerin eğilme davranışında kapasite üzerinde belirgin bir farklılık göstermediği tespit edilmiştir.
- Yüksek ve normal dayanımlı beton kullanılan kirişler için deneysel ve teorik yük deplasman eğrileri karşılaştırılmıştır. Normal dayanımlı beton kullanılan deney elemanlarında teorik ve deneysel taşıma gücü değerlerinin birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. Yüksek dayanımlı elemanlarda ise teorik taşıma gücü değerlerinin deneysel taşıma gücü değerlerinin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. (%26 ile %50 arasında)
- Daha genel sonuçlara ulaşabilmek için, ilave deneysel çalışmalar gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- 1) Kara I. F. , Ashour A. F., Koroglu, M. A. Flexural behavior of hybrid frp/steel reinforced concrete beams , Composite Structures, 129, 111–121, 2015.
- 2) El Refai, A.,Abed F.,Al Rahmani, A. Structural performance and servicibility of concrete beams reinforced with hybrid (gfrp and steel) bars, Construction and Building Materials, 96, 518-529, 2015.
- 3) Sovják R., Havlásek P., Vitek J., “Long-term behavior of concrete slabs with CFRP rebars subjected to four point bending prestressed”, Construction and Building Materials, 188, 781–792, 2018.
- 4) Wanga, Z., Zhao X. L, Xian G, Wuc G., Singh Raman S., Al-Saadi S. Durability study on interlaminar shear behaviour of basalt-, glass- and carbon-fibre reinforced polymer (B/G/CFRP) bars in seawater sea sand concrete environment, Construction and Building Materials 156, 985–1004,2017.
- 5) Ye Y, Guo Z, Liu Y, Wang L., Flexural behavior of stone beams reinforced with prestressed NSM CFRP bars, Construction and Building Materials 54, 466–476, 2014.
- 6) Arockiasamy , M., Chidambaram S, Amer, A. Shahawy M, “Time-dependent deformations of concrete beams reinforced with CFRP bars”, Composites: Part B, 31, 577-592, 2000.
- 7) Liu Y, Yong Yuan Y., Arrangement of hybrid rebars on flexural behavior of HSC beams, Composites: Part B 45, 22-31, 2013.
- 8) Rahal K. N. ,Rumaih H. A., Tests on Reinforced Concrete Beams Strengthened in Shear Using Near Surface Mounted CFRP and Steel Bars, Engineering Structures, 33, 53-62, 2011.

- 9) Mahroug, M. E. M., Ashour A. F., Lam, D. Tests of Continuous Concrete Slabs Reinforced with Carbon Fibre Reinforced Polymer Bars, *Composites: Part B*, 66, 348-357, 2014.
- 10) Firas, A. S., Gilles, F., Robert L. R., Bond between Carbon Fibre-Reinforced Polymer (CFRP) bars and Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRC): Experimental Study, *Construction and Building Materials*, 25, 479-485, 2011.
- 11) Rolland A., Quierant M., Khadour A., Chataigner S., Benzarti K, Argoul P. Experimental Investigations on the Bond Behavior Between Concrete and FRP Reinforcing Bars, *Construction and Building Materials*, 173, 136-148, 2018.
- 12) Aiello, M. A., Ombres L., Load –Deflection Analysis of FRP Reinforced Concrete Flexural Members, *Journal of Composites for Construction*, November, 164-171., 2000.
- 13) Dündar C., Tanrikulu A. K., Frosch R. J. Prediction of load-deflection behavior of multi-span FRP and Steel Reinforced Concrete Beams, *Composite Structures*, 132, 680-693, 2015.
- 14) 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.
- 15) Bischoff, P. H. Reevaluation of Deflection Prediction for Concrete Beams Reinforced with Steel and Fiber Reinforced Polymer Bars, *Journal of Structural engineering* , 131, 5, 752-767, 2005.
- 16) Bischoff, P. H. Deflection Calculation of FRP Reinforced Concrete Beams Based on Modifications to the Existing Branson Equation, *Journal of Composite Construction*, 11, 1, 4-14, 2007.

- 17)** Wang C., Yang C., Liu F., Wan C., Pu X., Preparation of Ultra-High Performance Concrete with Common Technology and Materials, *Cement & Composite Materials*, 34, 538-544, 2012.
- 18)** Habel K., Viviani M., Denarie E., Brühwiler E. Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRFC) *Cement and concrete Research* 36, 1362-1370, 2006.
- 19)** Ünsal İ., Dündar C., Tanrıkuş A., Çekme Rijitleşmesinin FRP ve Çelik donatılı betonarme kirişlerin Yük Deplasman Davranışı Üzerindeki Etkisi, *Çukurova Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 31(1), 429-439, 2016.
- 20)** Yoo D.Y., Kim S.W., Park J.J. Comparative flexural behaviour of ultra-high-performance concrete reinforced with hybrid straight steel fibers *Construction and Building Materials*, 132, 219-229, 2017
- 21)** Goldston M.W., Remennikov A., Neaz Sheikh M. Flexural behaviour of GFRP reinforced high strength and ultra high strength concrete beams, *Construction and Building Materials* 131, 600-617, 2017.
- 22)** Bywalski C., Drzazga M., Kaminski M., Kazmierowski M. Analysis of calculation methods for bending concrete elements reinforced with FRP bars, *Archives of Civil and mechanical engineering* 16 (2016) 901-912, 2016.
- 23)** Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing 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 440.1R15 (Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber- Reinforced with Fiber- Reinforced Polymer (FRP) Bars)

26) American Concrete Institute (ACI) Committee 318, Building code requirements for structural concrete and commentary, ACI 318-08, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA (2014)

