

**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**BETONARME KİRİŞLERDE CAM ELYAF DONATILARIN EĞİLME  
DAVRANIŞINA ETKİSİ**

**Mehmet YAZ**

**AĞUSTOS 2014**

**İnşaat Anabilim Dalında** Mehmet YAZ tarafından hazırlanan BETONARME KİRİŞLERDE CAM ELYAF DONATILARIN EĞİLME DAVRANIŞINA ETKİSİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr .Ali Payıdar AKGÜNGÖR  
Anabilim Dalı Başkanı

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

Yrd. Doç. Dr. Şule BAKIRCI ER  
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. İlker KALKAN\_\_\_\_\_

Üye (Danışman) : Yrd. Doç. Dr. Şule BAKIRCI ER\_\_\_\_\_

Üye : Yrd. Doç. DR. Eda AVANOĞLU SICACIK\_\_\_\_\_

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

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

Doç. Dr. Erdem Kamil YILDIRIM  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ÖZET

### BETONARME KİRİŞLERDE CAM ELYAF DONATILARIN EĞİLME DAVRANIŞINA ETKİSİ

YAZ, Mehmet

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Şule BAKIRCI ER

Ağustos 2014, 61 sayfa

Son yıllarda cam elyaf (GFRP) donatılar yüksek dayanımları, düşük özgül ağırlıkları ve korozyona uğramamaları nedeniyle çelik donatılara alternatif olarak kullanılmaktadır. GFRP donatılar göçmeye kadar doğrusal gerilme-şekil değiştirme davranışı göstermektedir. Ayrıca elastisite modülleri çeliğe göre daha düşüktür. Bu nedenlerle bu donatıların davranışlarının iyi anlaşılması, avantaj ve dezavantajların belirlenmesi gerekmektedir. Ülkemizde bu konu ile yapılmış yeteri kadar çalışma mevcut değildir. Bu çalışma çelik donatıya iyi bir alternatif olarak düşünülen GFRP donatılı betonarme kirişlerin davranışlarını tespit etmek ve iyileştirmek amacıyla gerçekleştirilmiş deneysel bir çalışmadır. Çalışmada kiriş çekme donatısı olarak, çelik donatının yanında cam elyaf donatılar da kullanılmıştır. Bu donatılar sadece çelik, sadece cam elyaf, cam elyaf ve çelik donatılar birlikte kullanılacak şekilde düzenlenmiştir. Basınç donatıları ise tüm elemanlarda aynıdır. ½ ölçekli yedi adet betonarme kiriş elemanı hazırlanmış ve eğilme altında test edilmiştir. Deneyler sonunda elemanların süneklik oranları, enerji sönümlenme kapasiteleri, akma yükleri ve rijitlikleri değerlendirilmiştir. GFRP donatılar kirişlerin davranışlarının gevrekleşmesine neden olmuş ancak GFRP donatı kullanılan kirişlerin taşıma gücü kapasitesinde çelik donatılı kirişlere göre artış olmuştur.

**Anahtar Sözcükler:** Betonarme kiriş, eğilme, süneklik, cam elyaf donatı, çekme donatısı

## ABSTRACT

### THE EFFECT OF GFRP BARS TO FLEXURAL BEHAVIOUR IN REINFORCED CONCRETE BEAMS

YAZ, Mehmet

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, M. Sc. Thesis

Co-Supervisor: Asst. Prof. Dr. Şule BAKIRCI ER

August 2014, 61 pages

Glass fiber reinforced polymer (GFRP) rebars have been identified as an alternative construction material for reinforcing concrete during the last decade owing to their high strength, low self-weight and non-corrodible nature. These materials have linear stress-strain behavior up to failure. Furthermore, the modulus of elasticity of GFRP is significantly lower than that of steel. Therefore behavior of GFRP bars should be well understood and it is necessary to determine the advantages and disadvantages of GFRP bars. There are not enough studies about this topic in Turkey. This experimental study is planned for understanding the mechanical properties of GFRP bars that will be used as an alternative to steel bars in future. Steel and GFRP bars were used as tensile reinforcement in beams. Only steel bars, only GFRP bars or steel and GFRP bars together were used as tensile reinforcement in test beams. Steel compression reinforcement was used in all specimens. 7 half scale reinforced concrete beams were tested under four-point bending. After the tests ductility ratio, energy dissipation capacity, yielding load and stiffness values were evaluated. GFRP reinforcement resulted in brittle behaviour in reinforced beams but an increase at ultimate bearing capacity was observed in GFRP reinforced beam compared to steel reinforced beam.

**Key Words:** Reinforced concrete beam, bending, ductility, glass fiber reinforced polymer, tension reinforcement

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardımını esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini her daim genç mühendislere aktarma gayretinde olan, tezimin tamamlanmasında çok büyük emek sarf eden tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Şule BAKIRCI ER ve yine her konuda yardımını esirgemeyen çok değerli Sayın Yrd. Doç. Dr. Eda AVANOĞLU SICACIK hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatın getirdiği bütün zorluklar karşısında dik duruşlarıyla her zaman bana örnek olan ve daima yardımına koşan çok değerli aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca beni hiç yalnız bırakmayan, büyük fedakarlıklarla yardımlarını esirgemeyen çok değerli arkadaşım Saruhan KARTAL'a, çalışmalarım boyunca bana yardımcı olan dostum Arş. Gör. Akın DUVAN'a ve İnşaat Mühendisliği bölümü ÖYP asistanlarına çok teşekkür ederim.

Çalışmalarımda, teknik ekipman desteklerinden dolayı Sayın Mahmut GÜLAP'a teşekkür ederim.

Yapmış olduğum bu çalışma Kırıkkale Üniversitesi BAP biriminin desteği ile hazırlanan 2013/47 nolu projenin ürünüdür. Değerli katkılarından dolayı Kırıkkale Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Çalışmalarımda katkılarından dolayı ESA KİMYA'ya teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	iii
<b>İÇİNDEKİLER DİZİNİ</b> .....	iv
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	vi
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	viii
<b>SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	ix
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Literatür Özetleri .....	2
<b>2. DENEYSEL ÇALIŞMA</b> .....	12
2.1. Deney Programı .....	12
2.2. Malzeme Özellik ve Dayanımları .....	18
2.3. Deney Düzeneği .....	21
2.3.1. Ölçüm Düzeneği .....	24
2.4. Deneyler .....	26
2.4.1. S5G0 Elemanı Deneyi .....	26
2.4.2. S4G1 Elemanı Deneyi .....	29
2.4.3. S3G2 Elemanı Deneyi .....	32
2.4.4. S2G3 (SGGGS) Elemanı Deneyi .....	35
2.4.5. S2G3 (GSGSG) Elemanı Deneyi .....	38
2.4.6. S1G4 Elemanı Deneyi .....	41
2.4.7. S0G5 Elemanı Deneyi .....	44
<b>3. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....	47
3.1. Taşıma Gücü .....	47
3.2. Süneklik .....	48
3.3. Enerji Sönümleme .....	50
3.4. Eğilme Rijitliği .....	51
3.5. Deney Elemanlarının Birbiriyle Karşılaştırılması .....	52

<b>4. SONUÇLAR</b> .....	56
<b>KAYNAKLAR</b> .....	58

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1.a S5G0 Elemanı Detay Çizimi .....	14
2.1.b S4G1 Elemanı Detay Çizimi .....	14
2.2.a S3G2 Elemanı Detay Çizimi .....	15
2.2.b S2G3 (SGGGS) Elemanı Detay Çizimi .....	15
2.3.a S2G3 (GSGSG) Elemanı Detay Çizimi .....	16
2.3.b S1G4 Elemanı Detay Çizimi .....	16
2.4. S0G5 Elemanı Detay Çizimi .....	17
2.5. Deney Elemanlarında Kullanılan GFRP Donatı .....	19
2.6. S0G5 (Referans) Elemanının Beton Dökümü Öncesi Görünüşü .....	20
2.7. Deney Elemanlarının Beton Dökümü Öncesi Görünüşü .....	20
2.8. Deney Elemanlarının Beton Dökümü Sonrası Görünüşü .....	21
2.9. Deney Düzeneği .....	22
2.10. Yükleme Çerçevesi ve Deney Düzeneği .....	23
2.11. Deney Elemanı Yükleme Düzeneği .....	24
2.12. Yük-Ölçüm Sistemi .....	25
2.13. S5G0 Deney Elemanı .....	26
2.14. S5G0 Elemanında Oluşan Çatlak Gelişimi .....	27
2.15. S5G0 Elemanının Deney Sonunda Genel Hasar Durumu .....	28
2.16. S5G0 Elemanının Orta Noktasından Alınmış Yük-Sehim Grafiği .....	28
2.17. S4G1 Deney Elemanı .....	29
2.18. S4G1 Elemanında Oluşan Çatlak Gelişimi .....	30
2.19. S4G1 Elemanının Deney Sonunda Genel Hasar Durumu .....	31
2.20. S4G1 Elemanının Orta Noktasından Alınmış Yük-Sehim Grafiği .....	31
2.21. S3G2 Deney Elemanı .....	32
2.22. S3G2 Elemanında Oluşan Çatlak Gelişimi .....	33
2.23. S3G2 Elemanının Deney Sonunda Genel Hasar Durumu .....	34
2.24. S3G2 Elemanının Orta Noktasından Alınmış Yük-Sehim Grafiği .....	34
2.25. S2G3 (SGGGS) Deney Elemanı .....	35
2.26. S2G3 (SGGGS) Elemanında Oluşan Çatlak Gelişimi .....	36



2.27. S2G3 (SGGGS) Elemanının Deney Sonunda Genel Hasar Durumu.....	37
2.28. S2G3 (SGGGS) Elemanının Orta Noktasından Alınmış Yük-Sehim Grafığı.....	37
2.29. S2G3 (GSGSG) Deney Elemanı .....	38
2.30. S2G3 (GSGSG) Elemanında Oluşan Çatlak Gelişimi .....	39
2.31. S2G3 (GSGSG) Elemanının Deney Sonunda Genel Hasar Durumu.....	40
2.32. S2G3 (GSGSG) Elemanının Orta Noktasından Alınmış Yük-Sehim Grafığı.....	40
2.33. S1G4 Deney Elemanı .....	41
2.34. S1G4 Elemanında Oluşan Çatlak Gelişimi .....	42
2.35. S1G4 Elemanının Deney Sonunda Genel Hasar Durumu.....	43
2.36. S1G4 Elemanının Orta Noktasından Alınmış Yük-Sehim Grafığı .....	43
2.37. S0G5 Deney Elemanı .....	44
2.38. S0G5 Elemanında Oluşan Çatlak Gelişimi .....	45
2.39. S0G5 Elemanının Deney Sonunda Genel Hasar Durumu.....	46
2.40. S0G5 Elemanının Orta Noktasından Alınmış Yük-Sehim Grafığı .....	46
3.1. Deney Elemanlarının Birlikte Verilmiş Yük-Sehim Grafikleri .....	55

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### ÇİZELGE

	<u>Sayfa</u>
2.1. Deneş Elemanlarının Özellikleri .....	13
2.2. Deneş Elemanlarında Kullanılan Betonun Basınç Dayanım Değerleri.....	18
2.3. Deneş Elemanlarında Kullanılan Donatıların Çekme Dayanım Değerleri...	19
3.1. Elemanların Akma Yüklere ve Maksimum Yüklere .....	47
3.2. Elemanların Süneklik ve Göreceli Süneklik Oranları .....	49
3.3. Elemanların Tokluk Modülü ve Göreceli Tokluk Modülü Değerleri .....	51
3.4. Elemanların Rijitlik ve Göreceli Rijitlik Değerleri .....	52
3.5. Elemanların Göreceli Yük, Göreceli Süneklik, Göreceli Enerji Sönümleme ve Göreceli Rijitlik Değerleri .....	53
3.6. Elemanların İlk Çatlak Yük - Şehim Değerleri.....	54
3.7. Elemanların Yük Toparlama Oranları.....	54

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER DİZİNİ

$\emptyset$	Donatı çapı
$\delta_u$	Donatıda kopma gerçekleşen elemanlarda donatı kopmadan maksimum dayanıma ulaşıldığı andaki deformasyon, donatıda kopma gerçekleşmeyen elemanlarda ulaşılan maksimum dayanımın % 15 kaybedildiği andaki deformasyon
$\delta_y$	Akma anındaki deplasman değeri
$\Delta P$	Yük - sehim grafiğinde iki yük değeri arasındaki fark
$\Delta \delta$	Yük - sehim grafiğinde iki sehim değeri arasındaki fark
$P_{ud}$	Deneysel olarak bulunmuş maksimum yük
$P_{yd}$	Deneysel olarak bulunmuş akma yükü
$P_{uh}$	Teorik hesaplarla bulunmuş taşıma gücü yükü

### KISALTMALAR DİZİNİ

FRP	Lif takviyeli polimer
G	Cam elyaf donatı
GFRP	Cam elyaf takviyeli polimer
LVDT	Elektronik deplasman ölçer
S	Çelik donatı

## 1. GİRİŞ

Beton ve demir geleneksel betonarmeyi oluşturan malzemelerdir. İnşaat sektöründeki yeniliklerle geleneksel malzemelerin dışında yeni malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca yapı malzemelerinde karşılaşılan problemler ve bu problemlere çözüm çalışmaları ile yeni malzeme türleri ve uygulamaları ortaya çıkmaktadır [1].

Mevcut çözümlerden birisi farklı kombinasyonlarda üretilen kompozit malzemeleri kullanmak ve geliştirmek amacıyla ortaya çıkmıştır. Kompozit malzeme, binlerce yıldır insanların farkında olarak ya da olmayarak, sorunların çözümü için kullandıkları, iki veya daha fazla sayıdaki farklı özelliklere sahip malzemelerin mikro veya makro seviyede birleştirilmesiyle elde edilen yeni bir üründür [2].

İlk modern sentetik plastikler 1900'lü yılların başlarında geliştirilmiş, 1930'lu yıllarda plastik malzemelerin özellikleri diğer malzeme çeşitleri ile boy ölçüşür düzeye gelmiştir. Birçok üstün özelliklerinin yanında sertlik ve dayanıklılık özelliklerinin düşük olması nedeniyle plastik malzemelerin güçlendirilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu eksikliğin giderilmesi amacıyla 1950'lerde polimer esaslı kompozit malzemeler geliştirilmiş ve değişik türde matris ve takviye elemanı kullanılarak farklı yapıda kompozitler üretilmiştir. En çok kullanılan kompozit malzeme kombinasyonları; cam elyaf takviyeli plastik, karbon elyaf takviyeli epoksi ve aramid elyaf takviyeli epoksi bileşenleridir [3]. Son yıllarda çalışmalar beton ile GFRP (cam lifi takviyeli polimer) kompozit malzemelerin birlikte kullanıldığı hibrit sistemler üzerine yoğunlaşmıştır. Bu yöndeki çalışmalar kullanılan yapı malzemelerinin özelliklerini iyileştirmekte ve bir çok alternatif yapı malzemesi oluşturarak yapısal sistemlerin gerek ekonomik gerekse durabilite açısından eksiklerinin daha rahat giderilmesine yardımcı olmaktadır. Hibrit malzemeler elemanların sünekliğini, ekonomiklik derecesini, enerji sönümleme kapasitesini arttırarak elemanların özelliklerini daha iyi bir duruma getirebilmektedir.

Pultruzyon metodu ile üretilen cam elyaf donatı üstün mekanik dayanımının yanı sıra hafifliği, korozyon dayanımı, düşük yoğunluk ve dayanım/yoğunluk oranının yüksekliği, düşük ısı iletkenliğine sahip olması, uzun yıllar bakım ve boya gibi ek bir hizmete ihtiyaç duymaması, üretimin düşük iş gücü ile yapılabilir olması, kolay kesilebilir ve işlenebilir olması gibi özelliklerinden dolayı cam elyaf profilleri inşaat sektöründe birçok malzemenin alternatifi olma yönünde hızla ilerlemektedir [4].

Cam elyaf donatının kullanımının en önemli nedenleri çelik donatıya oranla daha hafif olması ve korozyona karşı daha dayanıklı olmasıdır. Yapılar deprem kuvvetlerini ağırlıkları ile orantılı olarak alırlar. Bu nedenle hafif taşıyıcı yapı malzemelerinin kullanılması tercih edilmektedir. Ayrıca çelik donatı beton içerisinde donatı alanıyla orantılı olarak çekme kuvvetlerini karşıladığı için kesit kaybına uğramış donatının taşıyacağı kuvvet azalmaktadır. Özellikle paspayı ile yeterince korunamamış donatı zaman içinde korozyona uğramakta ve kesit kaybı oluşmaktadır. Bu gibi durumlarda cam elyaf donatıların korozyona uğramaması nedeniyle su ile teması bulunan yapılarda kullanılabilir.

Bu çalışmada amaç, kirişlerde çelik donatıya alternatif olarak kullanılacak cam elyaf donatının eğilme altındaki davranışının incelenmesidir. Bu amaç doğrultusunda ½ ölçekli yedi adet deney elemanı üretilmiştir. Deney elemanları basit mesnetli olarak düzenlenmiştir. Aynı zamanda düzgün yayılı yük etkisinde oluşacak moment diyagramını kapsayacak şekilde iki noktalı yükleme yapılmıştır. Çelik ve/veya cam elyaf donatı kombinasyonlarıyla oluşturulmuş elemanların eğilme altındaki davranışları test edilmiştir.

## **1.1. Literatür Özetleri**

Betonarme kirişler üzerine geçmişte yapılan çalışmalar kullanılan malzeme bakımından 3 grupta incelenebilir. Bunlar;

- i. Çelik,
- ii. Kompozit,
- iii. Hibrit

olarak gruplandırılabilir. Donatı olarak GFRP ve çelik malzemelerin birlikte bulunduğu kirişler hibrit kirişler olarak adlandırılmaktadır. Hibrit kirişler üzerine yapılan deneysel ve analitik çalışmaların sayısı son yıllarda artmış olsa da yeterli değildir. Cam elyaf donatılar düşük elektrik iletkenliği ve manyetik alan oluşturmaması gibi nedenlerle özellikle tüneller, havaalanları, MR odaları, röntgen odaları, istihbarat yapıları ve uzay araştırma merkezleri gibi elektromanyetik alanların bulunduğu ya da elektromanyetik alan oluşmaması gereken yapılarda kullanılabilir. Ayrıca korozyona uğramamaları nedeniyle su ile temasta olan veya açık hava şartlarından etkilenecek yapı elemanlarında kullanılabilir.

Yapılan çalışmalarda farklı elastisite modülü değerlerine ve farklı kopma dayanımı değerlerine sahip GFRP donatılar kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan GFRP donatıların elastisite modülü ve kopma dayanımı nispeten daha düşüktür. Ancak yerli üretim, kolay elde edilebilir ve daha düşük maliyetli olmaları nedeniyle tercih edilmişlerdir. Bu bölümde araştırmacılar tarafından yapılmış, GFRP donatılar kullanılarak hazırlanmış elemanların bulunduğu, çalışmalar incelenmiştir.

C. Barris ve arkadaşları [5], yaptıkları çalışmada lif takviyeli polimer donatıların betonarme yapılarda kullanımının sert çevre koşullarında geleneksel betonarmedeki çeliğin korozyona uğraması nedeniyle bir alternatif olarak ortaya çıktığı belirtilmiştir. Bu makalede yüksek elastisite modülüne sahip cam lifi takviyeli polimer donatılarla ilgili deneysel çalışmanın sonuçları ve tartışması sunulmaktadır. Bu çalışmanın esas amacı donatı oranı ve etkili derinlik-yükseklik oranı ile kısa dönem eğilme davranışını değerlendirmektir. Yönetmelik formülasyonları ve diğer tahmin modelleri, servis ve nihai limit durumları için incelenmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Test edilen kirişlerin davranışı ve yapılan tahminler arasında servis yüküne kadar iyi bir uyum gözlemlenmiştir. Ancak yapılan tahminlerde nihai yük kapasitesi deneysel sonuçlara göre düşük değerler vermiştir.

C. Mias ve arkadaşları [6], yaptıkları çalışmada lif takviyeli polimer donatıların mekanik özelliklerinden dolayı, deformasyonların çoğu kez betonarme eğilme elemanlarının tasarımını yönlendirdiği ve bu durumun lif takviyeli polimer donatılı betonarme kirişlerin kısa dönem deformasyonlarının incelenmesi üzerine çalışmaların artmasına neden olduğu belirtilmiştir. Buna rağmen uzun süreli deformasyonlar üzerine odaklanmış incelemeler ve deneysel verilerin az olduğu belirtilmiştir. Betonarme kirişlerde zamana bağlı deformasyonun, eleman geometrisi, malzeme özellikleri ve yükleme özelliklerinin bir fonksiyonu olduğu belirtilmiştir. Bu makale servis yükünde 250 gün boyunca sürekli yüke tabi tutulan sekiz adet cam elyaf takviyeli polimer donatılı betonarme kirişlerin deneysel çalışmasının sonuçlarını ve tartışmasını sunmaktadır. Çalışmada iki donatı oranı ve iki sürekli yük seviyesi dikkate alınmıştır. Deneysel sonuçlar, yükleme - boşaltma işlemlerinin ve donatı oranının, anlık ve zamana bağlı deformasyonlar üzerindeki etkisini ortaya çıkarmıştır. Sürekli yük seviyesinin etkisi gözlenmemiştir. Ayrıca değişik modeller için elde edilen tahminler deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sürekli yük nedeniyle oluşan anlık deformasyonları hesaplayan denklem, ACI 440.1 R-06'da verilen zamana bağlı faktör ve Biscoff'un denklemiyle modifiye edilmiştir. Buradan hesaplanan deformasyon değerleri ile deneysel olarak elde edilmiş deformasyon değerlerinin yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

C. Mias ve arkadaşları [7], yaptıkları çalışmada beton basınç dayanımı ve donatı oranının cam elyaf donatılı betonarme kirişlerdeki etkisini araştırmışlardır. İki farklı beton dayanımında (30 MPa ve 50 MPa) ve farklı cam elyaf ve çelik donatı oranlarında toplam 20 kiriş dökülmüştür. Kirişler kısa süreli yüklemeye ve 250 ile 700 gün arasında farklı seviyelerde sürekli yüklemeye tabi tutularak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar beton ve donatı özelliklerinin uzun süreli deformasyonlara etkisini açıklığa kavuşturmuştur. Donatı oranının artışı ve beton basınç dayanımının düşüşünün, toplam sehimin ani gelişen sehime oranını artırdığı gözlemlenmiştir. Ölçülen uzun dönem deformasyonlar ACI 440.1R-06 ve CSA-S806-02, CEB-FIP prosedürü gibi lif takviyeli polimer yapılar için uygun tasarım denklemleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. İlave olarak deneysel veriler yazarlar tarafından önerilen analitik bir yöntemle değerlendirilmiştir. CEB-FIB ile elde edilmiş uzun dönem deformasyon değerleri ve önerilen metodoloji, deneysel verilerle iyi bir uyum

göstermiştir. Buna rağmen ACI 440.1 R-06 veya CSA-S806-02 prosedürleri kullanıldığında değerler arasında farklılıklar olduğu görülmüştür.

A.F. Ashour [8], çalışmasında dört noktalı eğilme durumunda cam lif takviyeli polimer donatılı 12 adet betonarme kirişi test etmiştir. Bütün test elemanları enine kesme donatısız ve basınç donatısız yapılmıştır. Elemanlar beton basınç dayanımına göre iki sınıfa ayrılmıştır. Kiriş derinliği ve cam lif takviyeli polimer donatı miktarı her bir grupta incelenen esas parametrelerdir. Eğilme ve kesme olarak iki göçme modu gözlemlenmiştir. Eğilme kırılması en çok açıklık orta bölgesinde veya yük uygulama noktası altında cam lif takviyeli polimer donatıların çekme kırılması ile oluşmaktadır. Kesme kırılması, kiriş kesme açıklığındaki en büyük diagonal çatlakla başlamaktadır. Diagonal çatlak, cam lif takviyeli polimer donatılar seviyesinde yatay ilerleyerek aderans kırılmasını göstermektedir. Test edilen kirişlerin eğilme ve kesme kapasitelerini hesaplamak için basitleştirilmiş metodlar sunulmuştur. Eğilme kapasitesi, birim şekil değiştirme ve kuvvetler dengesinin uygunluğuna dayanarak hesaplanmaktadır. Elde edilmiş eğilme kapasitelerinin karşılaştırmaları sonucunda birbirlerine yakın değerler bulunmuştur. Test edilen kirişlerin kesme kapasitelerini tahmin etmek için son dönemlerde GFRP donatılı betonarme kirişler için literatürde önerilen dört yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemlerden elde edilen kesme kapasitesi tahminlerinin tutarsız olduğu ve GFRP donatılı betonarme kirişlerin kesme kapasitelerinin hesaplanmasında rasyonel metod oluşturmak için daha gelişmiş araştırmaların yapılması gerektiği belirlenmiştir.

S. H. Alsayed [9], yaptığı çalışmada GFRP donatılı veya çelik donatılı 12 adet kirişin tahmin edilen ve ölçülen yük-deformasyon ilişkilerini karşılaştırmıştır. Çalışmanın nümerik kısmı, kompozit bileşenlerin gerçek özelliklerini hesaba katan bilgisayar modeli geliştirilerek, ACI yük sehim deformasyon modeli ve lif takviyeli polimer donatılı kirişler için geliştirilmiş literatürde mevcut yük-deformasyon modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test edilen kirişlerin tasarımında deformasyon limiti ve betonun nihai dayanımı parametre olarak kullanılmıştır. Bilgisayar modeli ile elde edilmiş yük deformasyon eğrileri servis ve nihai yük değerlerinde doğru tahminler yapmıştır. Servis yükü altında, tahminden ve deney sonucundan elde edilen



deformasyon değerleri arasındaki fark %10'dan ve nihai eğilme dayanımı değerleri arasındaki fark %1'den düşük değerlerde olduğu görülmüştür.

C. Barris ve arkadaşları [10], yaptıkları çalışmada düşük elastisite modülüne sahip FRP (lif takviyeli polimer) donatıların betonarme elemanlarda, geniş çatlak açıklıklarına ve sehimlere sebep olabileceğini göstermiştir. Bunun sonucunda FRP donatılı betonarme elemanların servis sınır durumu kriterine göre dizayn edilmesi gerektiği belirtilmiştir. Bu çalışmada 14 adet GFRP donatılı betonarme kirişin çatlama ve deformasyonları üzerine deneysel çalışmanın sonuçları sunulmaktadır. Deneysel parametrelerin etkisi, deneysel katsayılar ile farklı tahmin modellerinin uygunluğu analiz edilmiş ve tartışılmıştır.

Tarek H. Almusallam ve arkadaşları [11], yaptıkları çalışmada betonarme kirişlerin eğilme kapasitelerinin arttırılmasında yüzeye yakın monteli donatıların etkisi deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Çalışılan parametreler yüzeye yakın monteli donatıların tipi (çelik veya GFRP) ve yüzeye yakın monteli donatı oranı (yüzeye yakın monteli donatıların sayısı ve çapı) olarak seçilmiştir. Toplam sekiz gruptan oluşan 16 adet kiriş dört noktalı eğilme altında test edilmiştir. Test sonuçları, çekme bölgesindeki donatı eksiğini telafi etmek için yerleştirilen yüzeye yakın monteli (çelik veya GFRP) donatı kullanımıyla kontrol kirişinin orijinal yük kapasitesine başarıyla ulaşıldığını göstermiştir. Kirişlerin nihai yük taşıma kapasiteleri ACI 318-11 şartnamesi ve ACI 440.1R-06 rehberliğinde belirlenmiştir. Nümerik araştırma, LS-DYNA sonlu elemanlar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlar arasında bir karşılaştırma yapılmıştır ve iyi bir uyum elde edilmiştir. FRP yüzeye yakın monteli donatıların elastisite modülü düşük olduğu ve bunların kullanımı kirişlerin efektif rijitliğini düşürdüğü belirtilmiştir.

Dong-Uk Choi ve arkadaşları [12], çalışmalarında köprü döşemelerinde, çelik donatıların korozyonundan kaçınmak için GFRP donatıların kullanılabilceğini belirtilmişlerdir. Bu çalışmada ek GFRP donatıların aderans dayanımlarını belirlemek amacıyla etriyesiz 35 adet kiriş ve döşemenin eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel parametreleri donatı ek boyu, kabuk kalınlığı ve donatı

aralığından oluşmaktadır. Deneylede kullanılan ek boyları standart ek boylarına göre nispeten büyüktür (çoğu deneyde donatı çapının 30 katından daha büyüktür). İlave olarak GFRP donatıların aderans dayanımlarını karşılaştırmak amacıyla, ek donatı olarak çelik donatı kullanılan dört adet referans kirişi de test edilmiştir. Test sonuçlarından GFRP donatılı elemanların aderans dayanımlarının çelik donatılı elemanların aderans dayanımlarından daha düşük oldukları belirlenmiştir. Deneyle sonucunda GFRP donatılı kiriş ve döşemelerin aderans mukavemeti tahmini için iki denklem önerilmiştir.

İlker Fatih Kara ve arkadaşları [13], sürekli mesnetli (orta açıklıkta yüklemeli) ve basit mesnetli (iki nokta yüklemeli) FRP donatılı betonarme elemanlarda rijitlik matrisi metoduna dayalı sehım tahminini analitik olarak sunmuşlardır. Çatlamış FRP donatılı betonarme elemanların eğilme rijitliğinin değişimi, efektif atalet momenti için çeşitli mevcut modeller kullanılarak değerlendirilmiştir. Önerilen analitik model ile deneysel çalışmalar uyumlu sonuçlar vermiştir. Çatlak bölgesinde, kesme rijitliğinin hesaplanmasında azaltılmış kesme rijitliği modeli kullanılmıştır. ACI modeli basit mesnetli betonarme yapılarda sehım tahminlerinde deneysel verilere yakın değerler bulmuş fakat sürekli mesnetli FRP donatılı elemanlarda deneysel verilerden daha düşük değerler bulmuştur. FRP donatı oranının basit mesnetli veya sürekli mesnetli kirişlerde sehım üzerinde önemli etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Basit mesnetli kirişlerde kesme deformasyonunun toplam sehım üzerindeki etkisi, sürekli mesnetli kirişlerdeki etkisine göre daha düşük olduğu görülmüştür.

Pedro Santos ve arkadaşları [14], yaptıkları deneysel ve nümerik çalışmada, GFRP donatılı betonarme kirişlerin eğilme davranışlarını, özellikle de iç kuvvetlerin tekrar dağıtım kapasitesini araştırmışlardır. Ölçekli olarak küçültülmüş iki açıklıklı ve T kesitli yedi adet kiriş üzerinde deneyle gerçekleştirilmiştir. Ana parametre donatı oranı olarak seçilmiştir. Kirişlerin davranışları analiz edilmiş, servis yeteneği ve kopma davranışlarına göre kıyaslanmıştır. Nümerik araştırmalar sonlu elemanlar modeli kullanılarak yapılmıştır. Kapsamlı parametrik çalışmada açıklığın, kesit geometrisinin, GFRP donatı oranının moment dağıtım kapasitesi üzerinde etkisi araştırılmıştır. Çekme donatısı olarak GFRP kullanılması, rijitliği artırmış, yükleme

sonrası boşaltmada sehim değerlerinde iyileşme sağlamıştır, yüklemelerde daha yüksek kopma dayanımı vermiştir. Çekme donatısı olarak çelik yerine GFRP donatı kullanılması veya kullanılan GFRP donatı oranının artırılması, analizden elde edilen kopma yükü değerlerinin deneysel verilerden elde edilenlerle daha uyumlu sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Zheng He ve Feng Qiu [15], GFRP donatılar kullanılmış betonarme kirişlerin eğilme tasarımını ACI 440.1R-06 rehberliğinde oluşturmuş olup, Rackwitz–Fiessler metodunun olasılıksal bakış açısından değerlendirmişlerdir. Değerlendirmeler sonucunda ACI rehberliğindeki tasarım hükümlerinin uygun olduğu görülmüştür. Göçme modunda, parametreler arasında kesit genişliği ve yükseklik/genişlik oranının güvenilirlik seviyesi üzerine etkisi oldukça net bir şekilde gözlemlenmiştir. GFRP mukavemetinin beton kırılma modunun güvenilirlik derecesi üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı gibi beton mukavemetinin GFRP kopma modu üzerindeki etkisinin de yok sayılabilecek kadar az olduğu tespit edilmiştir. GFRP kopma durumunda, ortalama/nominal gerilme oranı yükseldikçe, ortalama güvenilirlik indeksinin önceleri arttığı sonradan ise düştüğü gözlemlenmiştir. Sert çevre koşullarına maruz bırakılan GFRP donatılı betonarme yapıların tasarımında daha yüksek güvenilirlik derecesi kullanılması gerektiği gözlemlenmiştir. Ortalama güvenilirlik indeksi ve direnç azaltma faktörü arasındaki bağıntı araştırılmış ve bir değer elde edilmiştir.

Abdelmonem Masmoudi ve arkadaşları [16], GFRP donatılı kirişleri incelemişlerdir. GFRP ve çelik donatılı altı beton kiriş dökülmüş ve eğilme davranışları test edilmiştir. GFRP donatılı kesitler ile çelik donatılı betonarme kesitlerin birbirleriyle karşılaştırması yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda mühendislere düşük maliyetli GFRP donatılı beton kirişlerin tasarımında rehberlik edebilecek bir donatı oranı önerilmiştir. Çalışmalar sonucunda eğilmeye maruz kalan kirişlerin hesabı için GFRP deformasyon kriteri önerilmiştir.

Mohamed S. Issa ve arkadaşları [17], yaptıkları çalışmada fiberlerin GFRP donatılı beton kirişlerin eğilme davranışı ve sünekliği üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Deneysel programı yedi adet kiriş içermektedir. Test edilen kirişlerde polipropilen

fiberlerin, cam fiberlerin ve çelik fiberlerin beton karışımındaki etkisi incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre beton kirişlerde ana donatı olarak GFRP kullanımı gerekli eğilme mukavemetini sağlamıştır. Ayrıca ACI 440 rehberliğinde hesaplanarak elde edilmiş sonuçlar (%20 hata sınırları içinde) deneysel sonuçlarla uyum göstermiştir. Araştırma sonuçları, FRP takviyeli betonarme kirişlerde kullanılan her tip fiberin sünekliği geliştirdiğini göstermiştir. Bunların içinde çelik fiberin sünekliği en fazla artıran tip olduğu tespit edilmiştir. Faza ve GangaRao'nun kullandığı efektif atalet momenti denklemi sehim tahminlerinde en iyi sonuçları vermiştir.

Xian Li ve arkadaşları [18], sünekliği geliştirmek ve aynı zamanda korozyon direncini artırmak amacıyla bu çalışmayı gerçekleştirmişlerdir. FRP donatılı ve çelik profil takviyeli betonarme kompozit kirişlerin; çelik profil takviyesi ile sünekliği, FRP donatı ile korozyon direnci yükseltilmiştir. Basit mesnetli olarak hazırlanmış yedi adet kiriş dört noktalı eğilme durumunda yüklenerek, çelik profil kullanılmış FRP donatılı kompozit kirişlerin eğilme davranışı incelenmiştir. Bu çalışmadaki ana parametreler, beton basınç mukavemetinden, GFRP donatı oranından ve çelik profilin kiriş içindeki konumundan oluşmaktadır. Deney sonuçlarına göre çelik profil kullanımı yük taşıma kapasitesi, rijitlik, süneklik ve enerji sönümlenme kapasitesinde artış sağlamıştır. Test edilen FRP betonarme kirişlerden, sadece GFRP donatılı kirişte gevrek göçme meydana gelirken, FRP - çelik profil takviyeli kompozit kirişlerde, çelik profil kullanımından dolayı sünek bir davranış gözlemlenmiştir. Ayrıca FRP - çelik profil takviyeli kompozit kirişlerin yük taşıma kapasitesini tahmin edebilmek için analitik bir metod önerilmiştir.

Nawy ve Neuwerth [19, 20], yaptıkları deneysel çalışmada GFRP donatılı kirişlerin eğilme davranışını incelemişlerdir. Deneyler sonucunda GFRP donatılı elemanlarda çelik donatılı elemanlara göre nihai yükte yaklaşık 3 kat daha iyi sonuç elde edilmiştir. Çelik donatılı elemanlara göre GFRP donatılı elemanlarda çatlakların sayısı daha fazla ve çatlakların kiriş yüzeyinde dağınık bir şekilde bulunması, beton ile GFRP arasında iyi bir aderans olduğunu göstermektedir.

Saadatmanesh ve Ehsani [21], betonarme kirişlerde GFRP donatının uyumluluğunu araştırmışlardır. Beş adet dikdörtgen, bir adet T kesitli etriyeli GFRP ve çelik

donatıların kombinasyonlarıyla oluşturulmuş elemanlar deneye tabii tutulmuştur. Deneyle sonrasındaki gözlemlere göre çok sayıda uniform dağılmış çatlaklar belirlenmiştir. Bu çatlaklar da GFRP ile beton arasında iyi bir aderans olduğunu göstermektedir. Etriyeleri GFRP donatıdan yapılmış ve boyuna donatısı çelik olan numuneler beton kırılana kadar büyük plastik deformasyonların akabinde çeliğin akması sonucu eleman göçmüştür. Çelik donatılı kirişlerin analizi için hesaplanan maksimum yükler ölçülen değerlere yakın çıkmıştır. Bu korelasyona göre çelik donatıların analizine uygun olan klasik teorilerin GFRP donatılı kirişlerin davranışlarının tahmininde kullanılabileceği belirtilmiştir.

Challal ve arkadaşları [22], yaptıkları çalışmada sıcaklığın GFRP donatıların üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yedi adet basit kiriş hazırlamış ve bunlar iki noktalı yükleme altında  $-30^{\circ}\text{C}$  ve  $20^{\circ}\text{C}$ 'de deneye tabii tutulmuşlardır. GFRP donatılar  $-30^{\circ}\text{C}$ 'de çelik donatı ile benzer davranış göstermiştir. GFRP donatılarda düşük sıcaklığın eğilme davranışı üzerine etki etmediğini gözlemlenmiştir.

GangaRao ve Faza [23], yaptıkları çalışmada 27 adet dikdörtgen kirişin eğilme altında davranışını incelemişlerdir. Farklı donatı çapları, farklı donatı yüzeyleri (düz, nervürlü, yüzeyi kumlanmış), ve etriye tiplerinde farklı malzemeler (çelik, düz yüzeyli GFRP ve nervürlü GFRP) kullanarak deney elemanlarını hazırlamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre 9,5 ve 25,4 mm çaplı GFRP donatılı numunelerde yüksek basınç dayanımlı beton kullanıldığında nihai moment kapasitesinin önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. 25,4 mm çaplı GFRP donatı kullanılmış kirişlerde donatılar nihai gerilmeye ulaşmadan önce kesme kırılması olmuşken 9,5 mm çaplı GFRP donatı kullanılmış kirişlerde de eğilme kırılması olmuştur. Yüksek dayanıma sahip beton kullanılmasının çatlak genişliğini azalttığı ve çatlakların basınç bölgesine aniden yayılmasını engellediği gözlemlenmiştir.

Faza ve GangaRao [24, 25], yaptıkları deneysel çalışmanın sonuçlarına dayanarak GFRP donatılı kirişlerin teorik olarak tahmin edilen sehim değerlerinin daha düşük olmasının sebebini ACI 318'in efektif atalet momentini kullanarak çözüm yapıldığından kaynaklandığı şeklinde açıklamışlardır.

Nanni ve arkadaşları [26], GFRP donatı (düz yüzeyli ve kumlanmış yüzeyli), hibrit donatı (düz yüzeyli ve kumlanmış yüzeyli) ve çelik donatıdan yapılmış beş adet kirişin eğilme davranışlarını incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre yüzeyi kumlanmış GFRP ve hibrit donatılar iyi sonuçlar vermiş ve nihai eğilme kapasitesini %25'e kadar arttırmışlardır aynı zamanda daha küçük çatlak genişlikleri oluşmasını sağlamışlardır.

Nanni [27], değişik FRP dizaynları ile eğilme davranışı üzerine araştırma yapmıştır. Bu çalışmada nihai dayanım metodu veya çalışma basınç metodu kullanılabilceği sonucuna varmıştır. FRP donatıların kopana kadar lineer elastik olduğundan, rijitliklerinin çelik donatıya göre önemli ölçüde düşük olduğundan ve maksimum moment kapasitesinin bir hayli değişken olduğundan çalışma basınç metodunun daha uygun olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak basınç dayanımı yüksek betonlarda FRP kullanımının iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.

Benmokrane ve arkadaşları [28], yaptıkları çalışmayı GFRP donatılı kirişlerin eğilme davranışını tespit edebilmek amacıyla gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışma 3300 mm uzunluğundaki kirişlerde 2 tip GFRP (Kodiak ve Isorod) kullanılarak çelik donatı ile karşılaştırma yapılmıştır. ACI formülleri, deneysel olarak elde edilmiş eğilme değerleri ile yakın sonuçlar vermiş, ancak bu formüller nihai momenti biraz yüksek bir değerde tahmin etmiştir. Bu nedenle GFRP donatıların güvenle kullanılabilceği sonucuna varılmıştır. İki tip GFRP donatının farklı üretilmelerine ve farklı yüzey deformasyonlarına sahip olmalarına rağmen bu çalışmada benzer davranış gösterdikleri tespit edilmiştir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 2.1. Deney Programı

Bu çalışmada, yedi adet ½ ölçekli kiriş üretilip deneye tabi tutulmuştur. Deney elemanları 150 mm genişliğinde, 300 mm yüksekliğinde ve 3200 mm boyunda dikdörtgen kesitli kirişlerden oluşmaktadır.

Çalışmada çekme donatısı olarak kullanılan çelik ve GFRP donatıların alanları başlıca parametre olarak ele alınmıştır.

Tüm deney elemanlarında basınç donatısı olarak 2Ø10 nervürlü çelik donatı kullanılmıştır. Ayrıca tüm kirişlerde etriye olarak Ø5/75 mm düz çelik donatı kullanılmıştır. Çekme donatıları çelik, GFRP, çelik ve GFRP olarak düzenlenmiştir. Kullanılan tüm boyuna çelik donatılar 10 mm çaplı ve nervürlü, tüm GFRP donatılar 13 mm çaplı ve nervürlüdür.

Deney elemanlarının adlandırılmasında birbirini takip eden “sayı-rakam-sayı-rakam” şeklinde semboller kullanılmıştır. İlk büyük harf elemanın çekme bölgesinde kullanılan çelik donatıları, takip eden rakam ise çelik donatı sayısını ifade etmektedir. Devamında ikinci büyük harf elemanın çekme bölgesinde kullanılan GFRP donatıları, takip eden rakam ise GFRP donatı sayısını ifade etmektedir.

Deney elemanlarının adları aşağıda açıklanmıştır.

S5G0: 5 adet çelik çekme donatısı bulunan ve GFRP çekme donatısı bulunmayan eleman

S4G1: 4 adet çelik çekme donatısı ve 1 adet GFRP çekme donatısı bulunan eleman

S3G2: 3 adet çelik çekme donatısı ve 2 adet GFRP çekme donatısı bulunan eleman

S2G3: 2 adet çelik çekme donatısı ve 3 adet GFRP çekme donatısı bulunan eleman

S1G4: 1 adet çelik çekme donatısı ve 4 adet GFRP çekme donatısı bulunan eleman

S0G5: Çelik çekme donatısı bulunmayan ve 5 adet GFRP çekme donatısı bulunan eleman

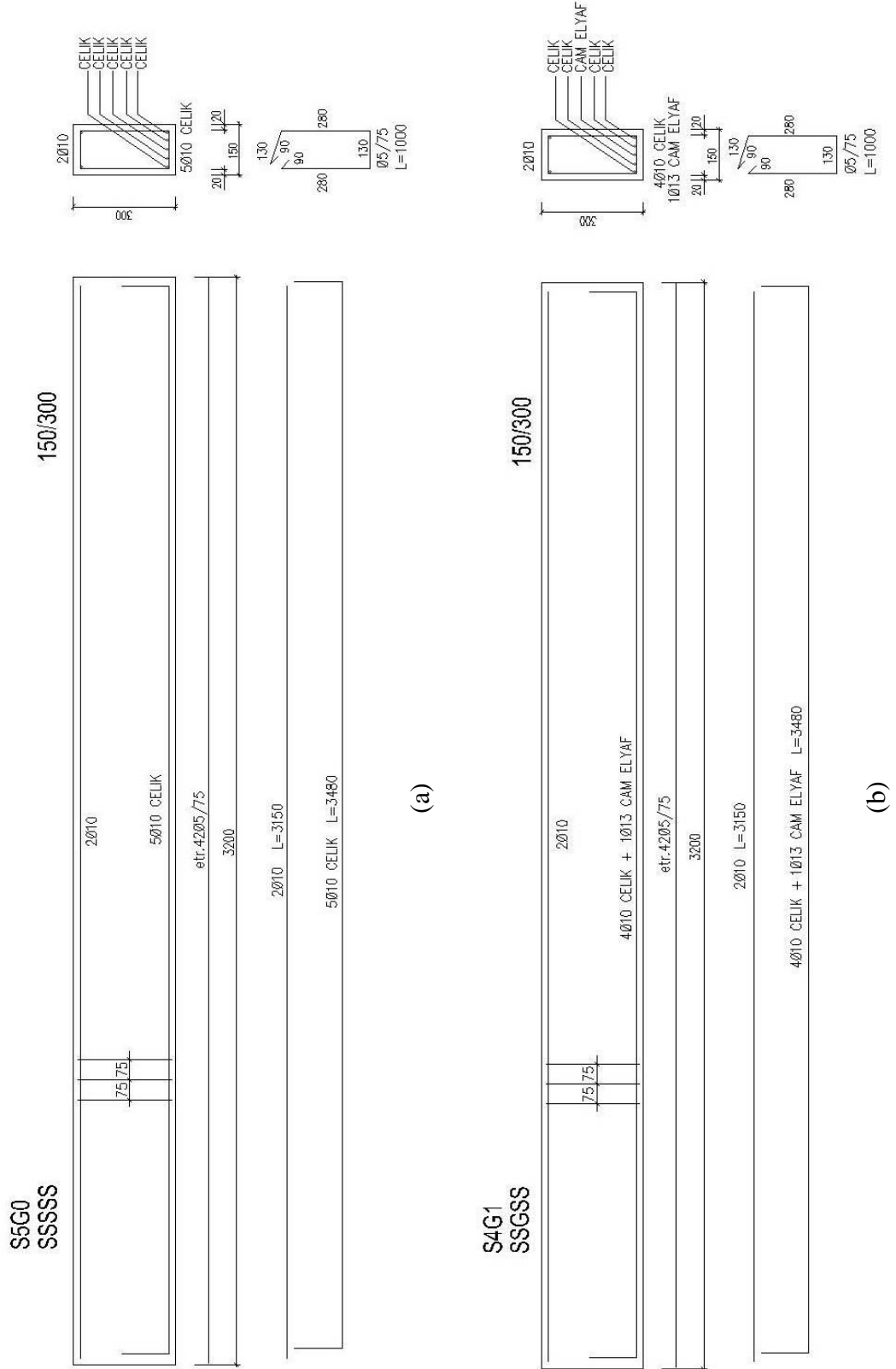
Deney elemanlarının adları, çekme donatılarının cinsi, sayıları, sıralamaları ve çekme bölgesindeki cam elyaf donatı yüzdesi Çizelge 2.1.de verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Deney elemanlarının özellikleri

<b>Deney Elemanı Adı</b>	<b>Çekme Bölgesinde Kullanılan Çelik Donatı Sayısı</b>	<b>Çekme Bölgesinde Kullanılan Cam Elyaf Donatı Sayısı</b>	<b>Çekme Bölgesinde Kullanılan Donatıların Sıralaması</b>	<b>Referans Eleman</b>	<b>Çekme Bölgesinde Kullanılan Cam Elyaf Donatı Yüzdesi</b>
<b>S5G0</b>	5	0	S S S S S		%0
<b>S4G1</b>	4	1	S S G S S		%20
<b>S3G2</b>	3	2	S G S G S		%40
<b>S2G3</b>	2	3	S G G G S		%60
<b>S2G3</b>	2	3	G S G S G		%60
<b>S1G4</b>	1	4	G G S G G		%80
<b>S0G5</b>	0	5	G G G G G	Referans	%100

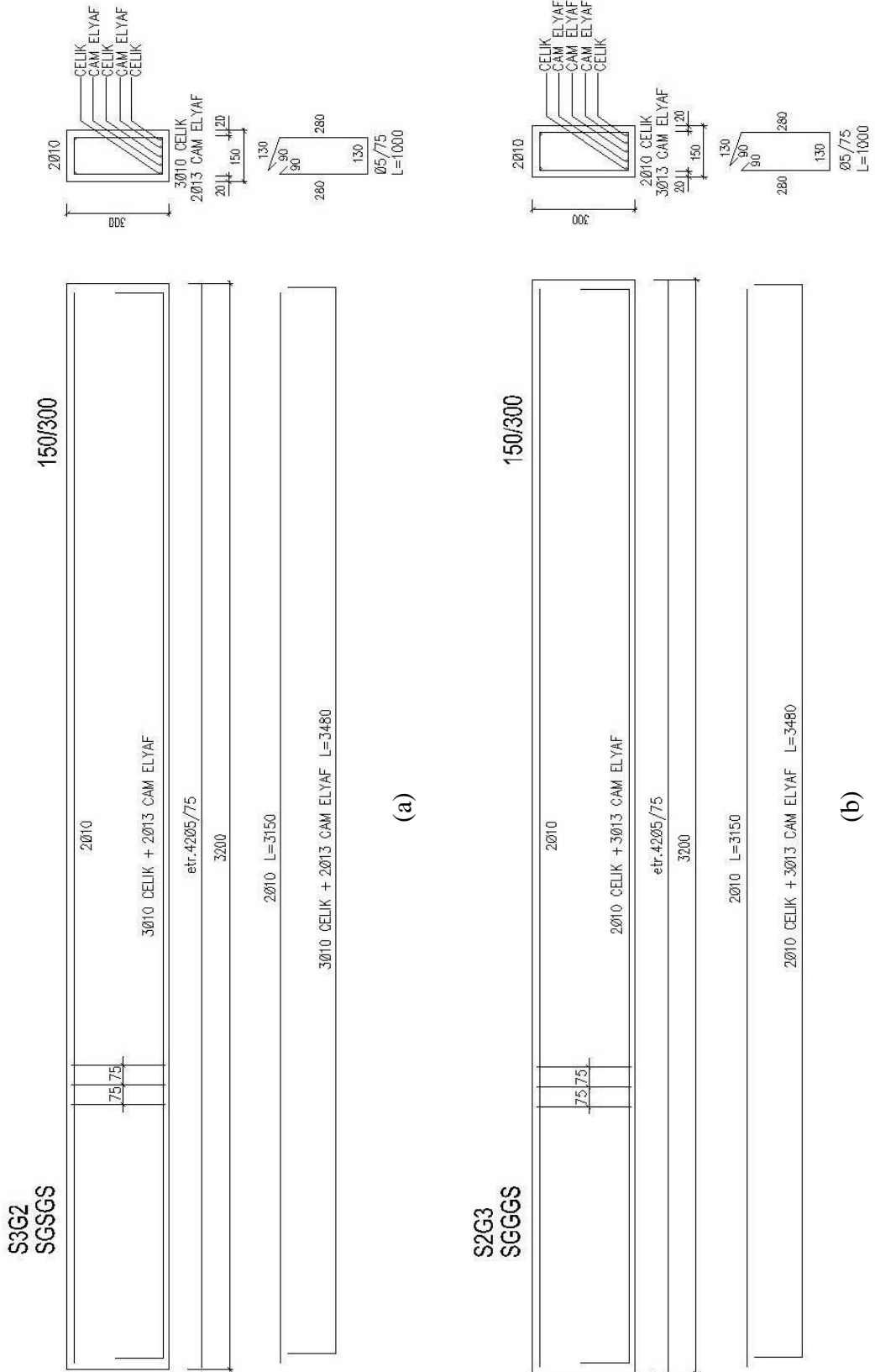
Deney elemanlarının boyutları ve donatı detayları Şekil 2.1.den Şekil 2.4.e kadar gösterilmektedir.





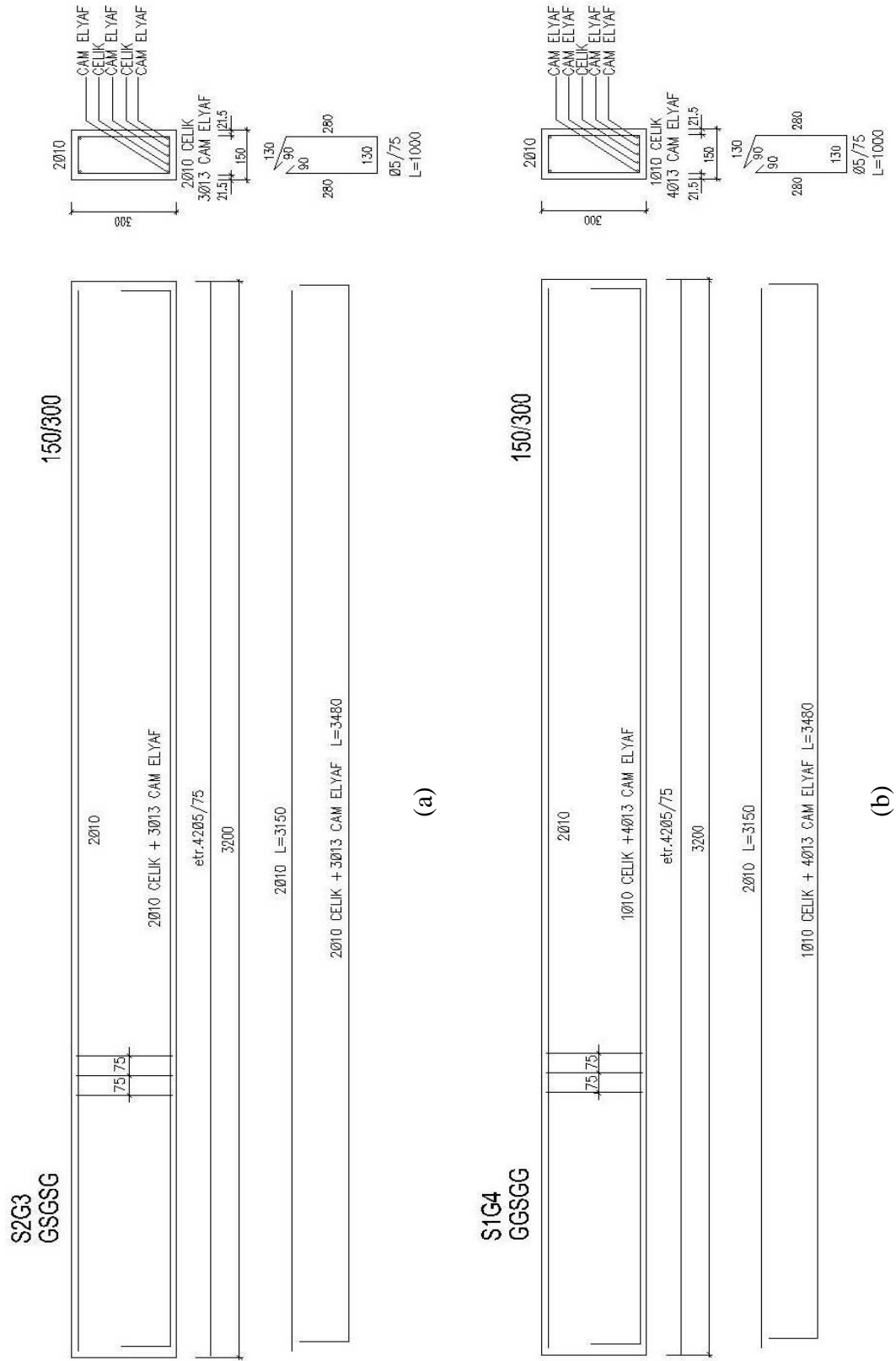
Şekil 2.1.a S5G0 elemanı detay çizimi

Şekil 2.1.b S4G1 elemanı detay çizimi



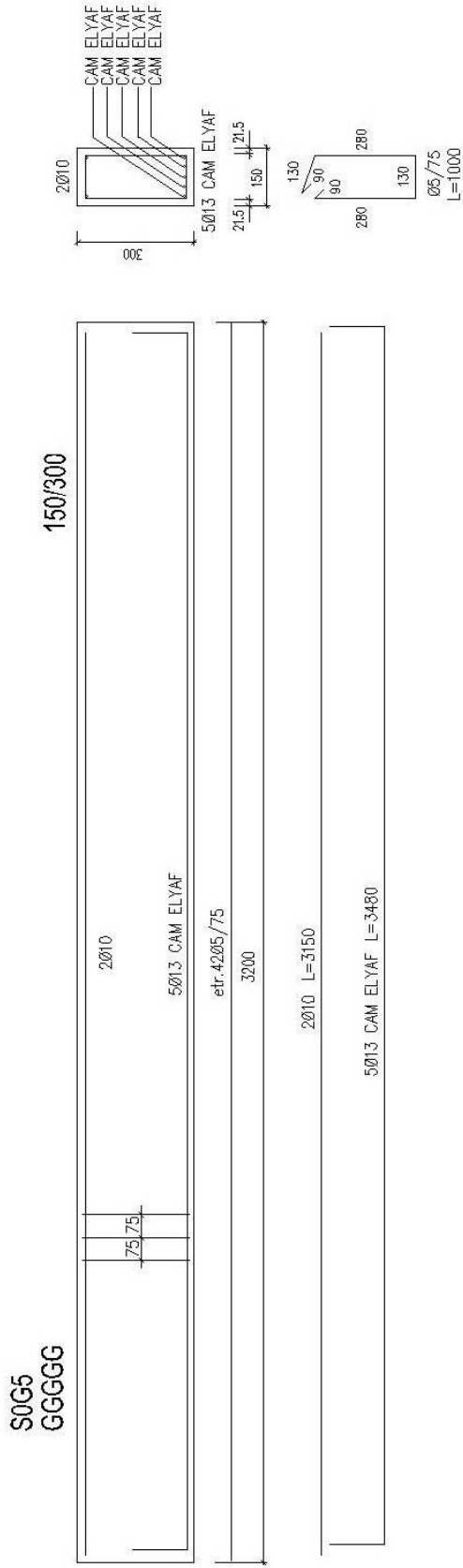
Şekil 2.2.a S3G2 elemanı detay çizimi

Şekil 2.2.b S2G3 (SGGGS) elemanı detay çizimi



**Şekil 2.3.a** S2G3 (GSGSG) elemanı detay çizimi

**Şekil 2.3.b** S1G4 elemanı detay çizimi



Şekil 2.4. S0G5 elemanı detay çizimi

## 2.2.Malzeme Özellik ve Dayanımları

Deneyleer sonucunda sağlıklı karşılaştırmalar yapılabilmesi amacıyla kirişlerin hazırlanmasında kullanılan beton ve donatıların yaklaşık olarak aynı mekanik özelliklere sahip olması önemlidir. Bu nedenle, tüm deney elemanlarında aynı beton sınıfını yakalayabilmek için aynı hazır beton santralinden tek seferde getirtilen beton kullanılmıştır. Donatılar ise tek seferde aynı üreticiden temin edilmiştir. Elemanlarda kullanılan Ø10 çelik donatılar S420 kalitesinde ve Ø5 çelik donatılar S220 kalitesindedir.

Deney elemanlarının tümü aynı anda, tek seferde dökülerek ve aynı kür koşullarına tabi tutulmuştur. Kullanılan beton sınıfı C25/30 (25 MPa) olarak belirlenmiştir. Numunelerin 28 günlük 150x150x150 mm'lik küp basınç dayanımları ve bunların standart silindir basınç dayanımına çevrilmiş değerleri çizelge 2.2.de verilmiştir.

**Çizelge 2.2.** Deney elemanlarında kullanılan betonun basınç dayanım değerleri

Numune No	Boyutlar(mm)	Küp basınç dayanımı (MPa)	Silindir basınç dayanımı (MPa)
1	150x150	36	29,2
2	150x150	36,2	29,5
3	150x150	36,9	30
4	150x150	37,7	30,7
5	150x150	36,5	29,7
6	150x150	37,4	30,4
7	150x150	37,8	30,7
8	150x150	38	30,9
9	150x150	37,6	30,5
10	150x150	33,8	27,5
11	150x150	37,3	30,3
12	150x150	37,6	30,5
		Ortalama: 36,9	Ortalama: 30

**Çizelge 2.3.** Deney elemanlarında kullanılan donatıların çekme dayanım değerleri

<b>Malzeme</b>	<b>Akma Dayanımı (<math>f_{yk}</math>)</b>	<b>Kopma Dayanımı (<math>f_u</math>)</b>
<b>5 mm çaplı düz çelik donatı</b>	220 MPa	340 MPa
<b>10 mm çaplı nervürlü çelik donatı</b>	420 MPa	500 MPa
<b>13 mm çaplı cam elyaf donatı</b>	.....	350 MPa



**Şekil 2.5.** Deney elemanlarında kullanılan GFRP donatı



**Şekil 2.6.** SOG5 (referans) elemanın beton dökümü öncesi görünüşü



**Şekil 2.7.** Deney elemanlarının beton dökümü öncesi görünüşü



**Şekil 2.8.** Deney elemanlarının beton dökümü sonrası görünüşü

### **2.3. Deney Düzenegi**

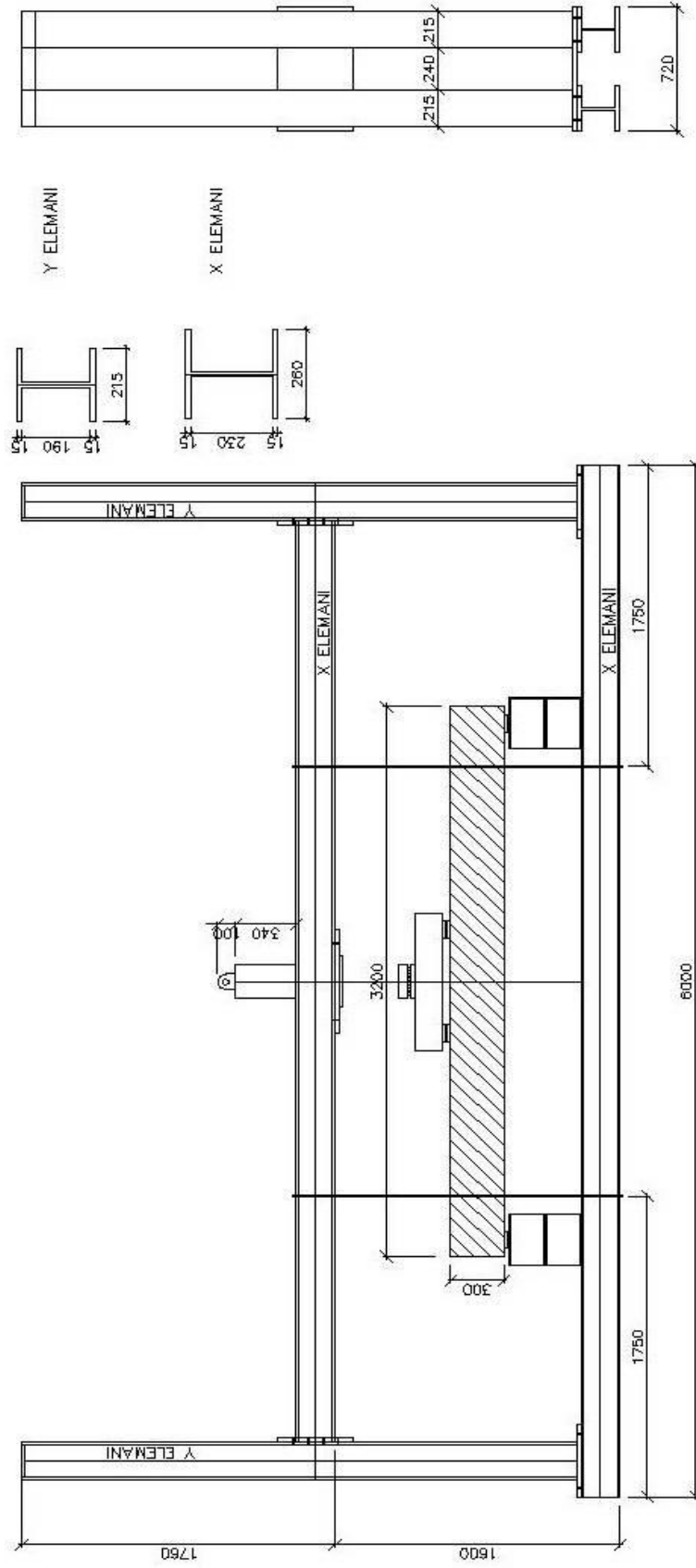
Deney elemanları hazırlanırken Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Mekaniği Laboratuvarı kullanılmış ve deneyler bu laboratuvarda gerçekleştirilmiştir. Kiriş deneylerinin yapılması planlanan yükleme çerçevesi yaklaşık 80 kN kapasiteli çelik bir çerçevedir. Deneylere hazırlık aşamasında her biri 30 mm çaplı 8 adet sonsuz dişli kullanılarak çerçeve yük kapasitesi artırılmıştır. Deney düzeneginde yük, hidrolik bir kriko tarafından önce bir çelik yükleme kirişine tek noktadan uygulanmıştır. Yükleme kirişi bir tarafı sabit ve bir tarafı kayıcı (basit) mesnetli olacak şekilde deney elemanının üzerine yerleştirilerek izostatik bir yükleme sistemi oluşturulmuştur. Dolayısıyla deney elemanına iki noktalı yükleme (dört noktalı eğilme durumu) yapılmıştır (Şekil 2.12.). Her bir yük uygulama noktası, açıklık ortasından 300 mm uzaktadır (Şekil 2.13.). Bu mesafe belirlenirken kirişte yayılı yük altında oluşacak moment diyagramını kapsayacak bir moment diyagramı oluşturacak uzaklık seçilmiştir. Deney kirişleri bir ucu sabit bir ucu kayıcı (basit) mesnetli olacak şekilde hazırlanmıştır.



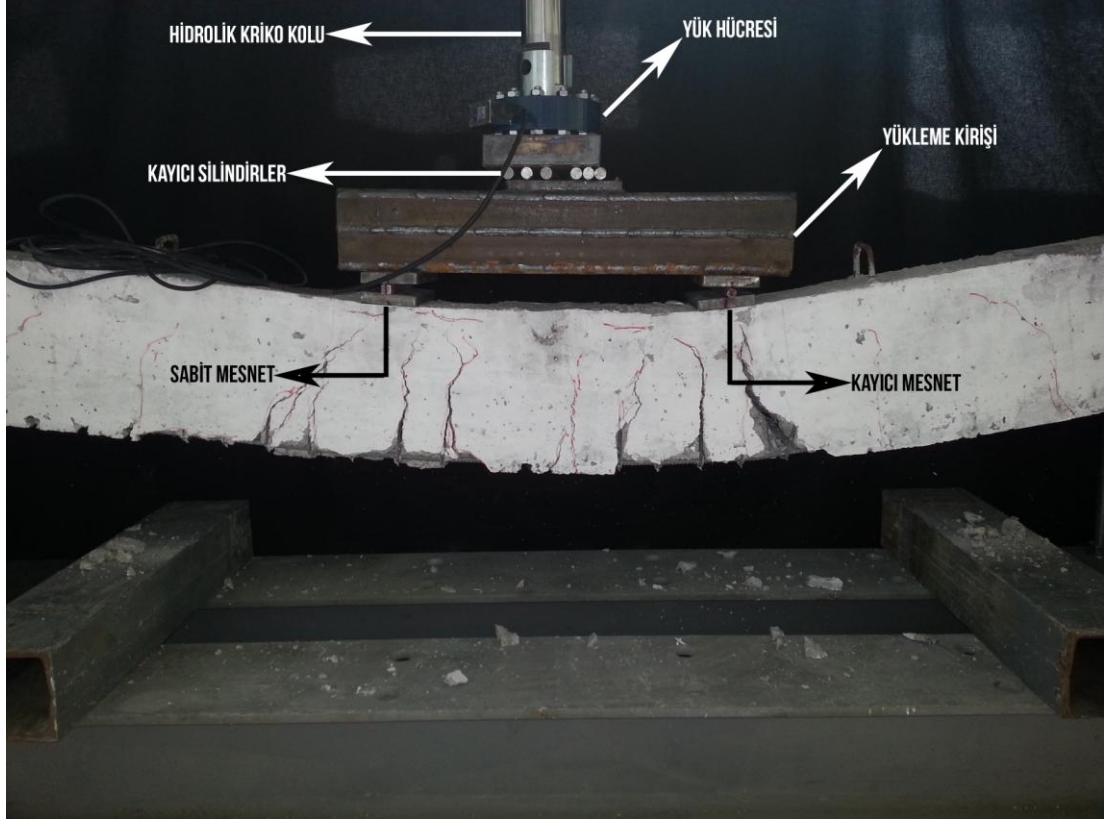


**Şekil 2.9.** Deney düzeneği

Hidrolik krikoyla yükleme kirişi arasına yük değerlerini ölçmek amacıyla bir yük hücresi (Load Cell) yerleştirilmiştir. Yük hücresi, yükleme kirişi üzerine doğrudan oturtulmamış, yük hücresi ile yükleme kirişi arasına kaymaya izin veren silindirler yerleştirilmiştir. Bu silindirler, deney elemanının yer değiştirmelerinin kriko kolunun düşey eksenindeki çalışma doğrultusunu değiştirerek, krikoya zarar vermesini önlemek amacıyla kullanılmışlardır.



Şekil 2.10. Yükleme çerçevesi ve deney düzeneği



Şekil 2.11. Deney elemanı yükleme düzeneği

### 2.3.1. Ölçüm Düzeneği

Deney elemanlarının çeşitli noktalarındaki sehimlerini ölçmek amacıyla 3 adet LVDT (elektronik deplasman ölçer) kullanılmıştır. Bu LVDT'ler 1'den 3'e kadar numaralandırılmıştır. Ölçüm düzeneği şekil 2.15.te verilmiştir. Bu LVDT'lerin yerleri ve kullanım amaçları aşağıda belirtilmiştir.

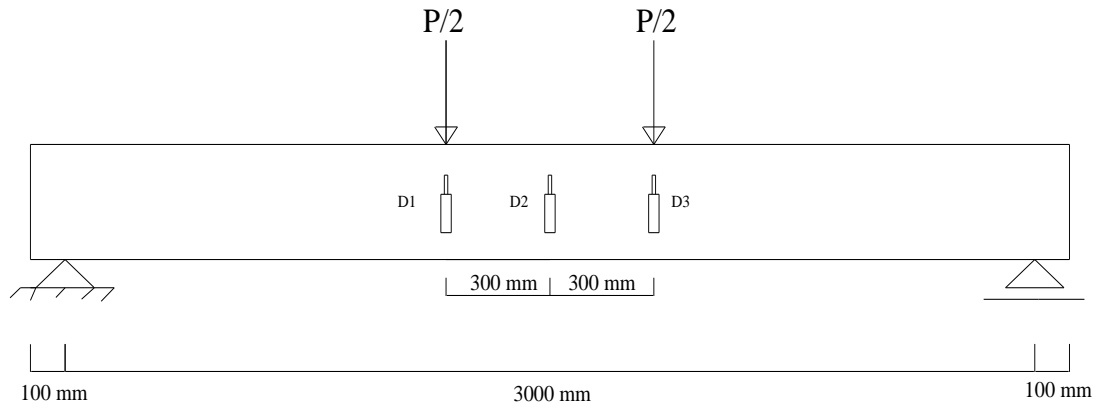
LVDT1 (D1): Deney elemanının sol yük uygulama noktasının altındaki sehimleri tespit etmek amacıyla kullanılan 100 mm kapasiteye sahip deplasman ölçerdir.

LVDT2 (D2): Deney elemanının orta noktasındaki sehimleri tespit etmek amacıyla kullanılan 100 mm kapasiteye sahip deplasman ölçerdir.

LVDT3 (D3): Deney elemanının sağ yük uygulama noktasının altındaki sehimleri tespit etmek amacıyla kullanılan 100 mm kapasiteye sahip deplasman ölçerdir. 100 mm'den fazla olan sehimleri ölçmek için kapasitesi dolan LVDT'ler sıfırlanarak tekrar deneye devam edilmiştir.

Yükleme altında çerçevenin yere göre fazla sehim yapmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle LVDT'ler deney sırasında çerçevenin üzerine konulmuştur.

Deney elemanlarının yüklenmesinde kullanılan yük hücresi 50 ton kapasiteye sahiptir.



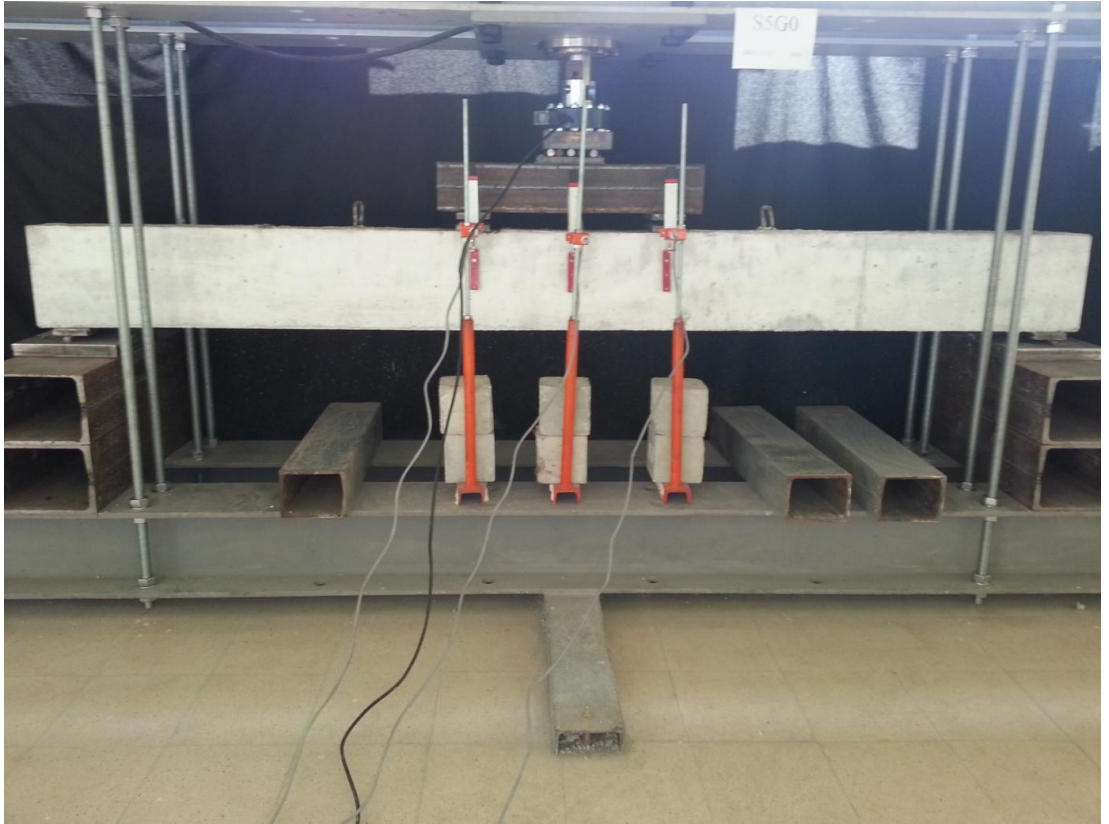
**Şekil 2.12.** Yük-Ölçüm sistemi

## 2.4. Deneyler

Deney elemanları hazırlandıktan sonra deney sistemine yerleştirilmiştir. Ölçüm cihazları bağlanmış, cihazların hepsi kontrol edilmiş ve yüklemeye hazır hale getirilmiştir. Yüklemeye başlamadan önce ölçüm aletlerinin ve yükün sıfırlaması yapılmıştır. Deneyler sırasında bir veri okuyucu ve bilgisayar yardımıyla elemanların yük-deplasman eğrileri grafik olarak izlenebilmiştir. Ayrıca deney verilerinin kaydedilmesi sağlanmıştır. Deneyler sırasında, kirişlerdeki çatlak gelişimleri izlenmiş ve kiriş üzerine işaretlenmiştir.

### 2.4.1. S5G0 Elemanı Deneyi

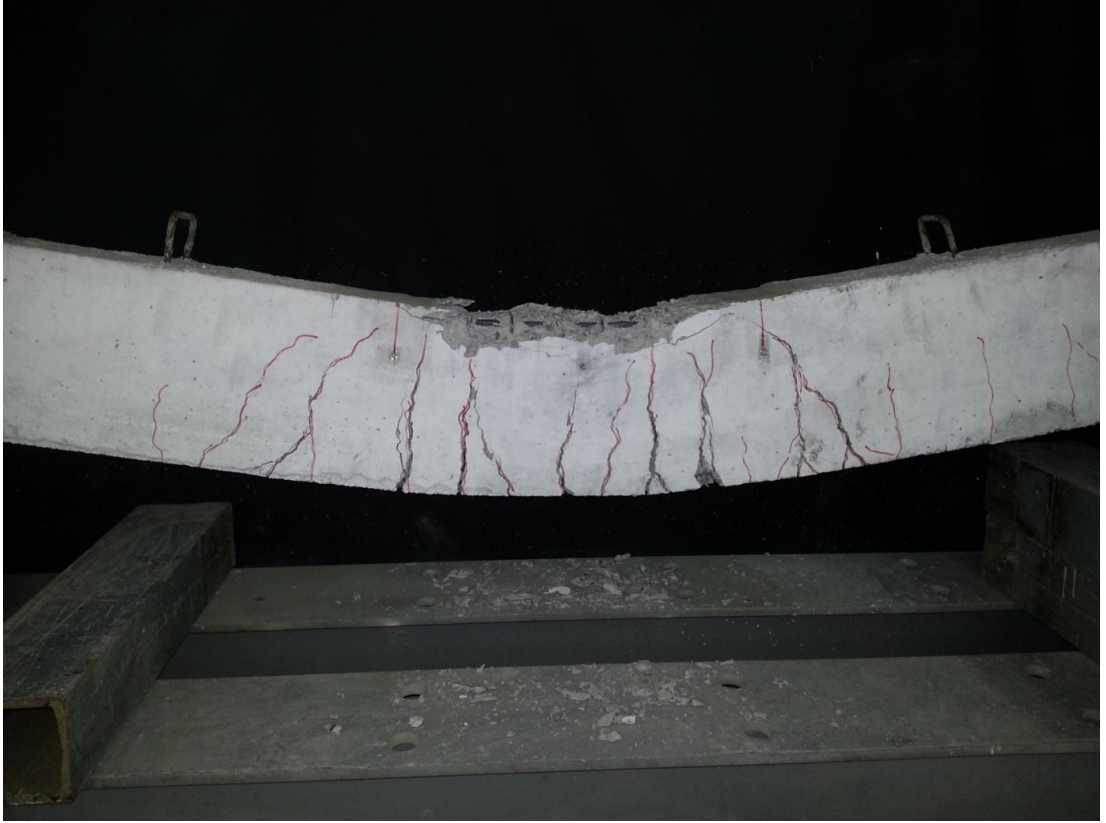
Çekme donatısı olarak 5Ø10 çelik donatının kullanıldığı, GFRP donatının bulunmadığı elemandır. Çekme bölgesindeki cam elyaf donatı oranı %0'dır.



Şekil 2.13. S5G0 deney elemanı

Deney sırasında kirişte gözlenen değişimler aşağıda belirtilmiştir.

27 kN'luk yük altında ve 4,5 mm sehim değerinde sabit moment bölgesinde ilk eğilme çatlağı oluşmuştur. 74 kN'luk yük altında ve 69 mm sehim değerinde sol yük noktası altındaki çatlağın genişliği (en geniş çatlak) 3 mm'dir. Diğer elemanlara göre çatlak sayısının fazla, çatlak genişliklerinin ise az olduğu grlmştir ve aderans çatlağı görülmemiştir. 80 kN'luk yük altında ve 118 mm sehim değerinde sol yük noktası altındaki çatlağın genişliği (en geniş çatlak) 5 mm olmuştur. Yük 79 kN ile 83 kN arasında değişip bu sınırı aşmamıştır. 83 kN'luk yük altında ve 228 mm sehim değerinde deney güvenliği için yükleme durdurulmuş ve deneye son verilmiştir.

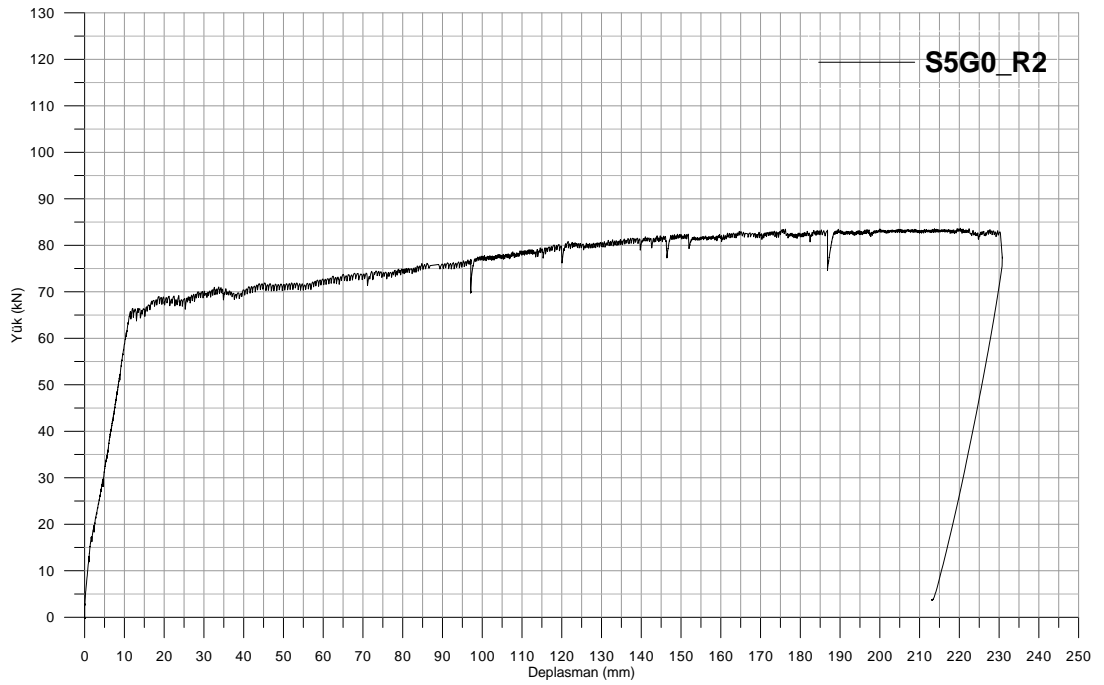


**şekil 2.14.** S5G0 elemanında oluşan çatlak gelişimi





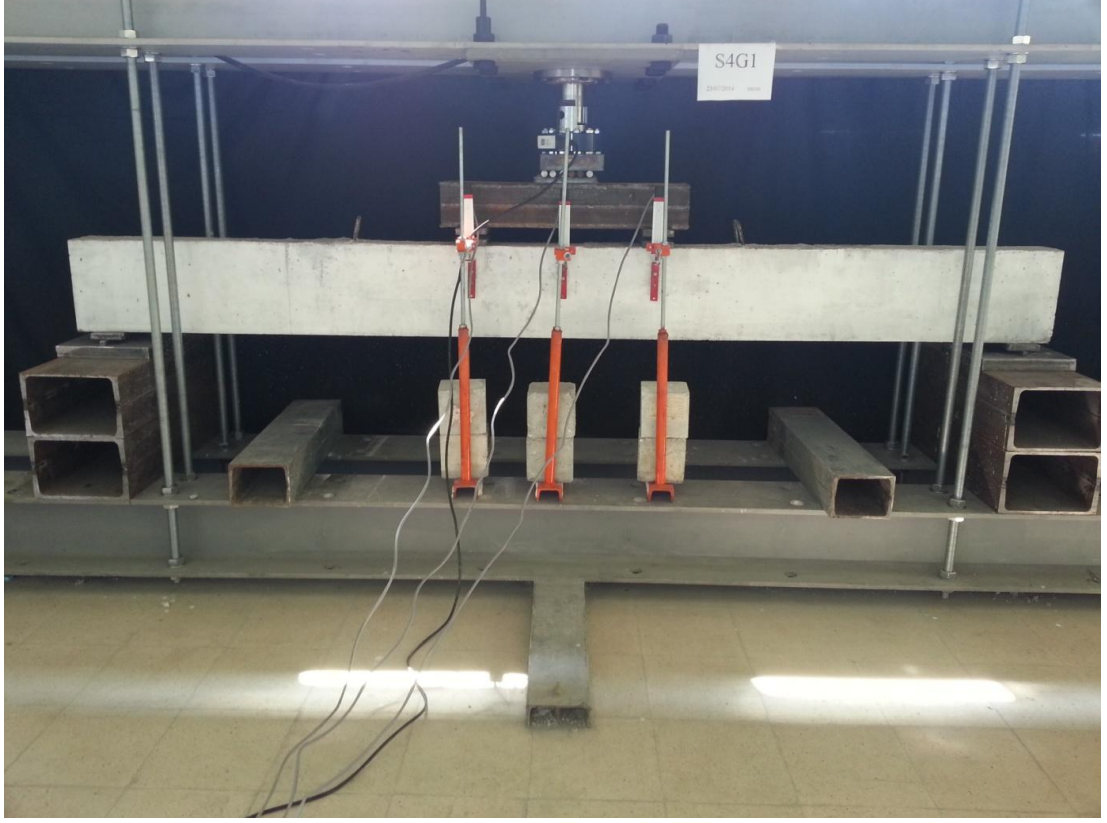
Şekil 2.15. S5G0 elemanın deney sonunda genel hasar durumu



Şekil 2.16. S5G0 elemanın orta noktasından alınmış yük-sehim grafiği

## 2.4.2. S4G1 Elemanı Deneyi

Çekme donatısı olarak 4Ø10 çelik donatının ve 1Ø13 GFRP donatının kullanıldığı elemandır. Çekme bölgesindeki cam elyaf donatı oranı %20'dir.



**Şekil 2.17.** S4G1 deney elemanı

Deney sırasında kirişte gözlenen değişimler aşağıda belirtilmiştir.

28 kN'luk yük altında 4,6 mm sehîm değeriinde kılcal eğilme çatlakları tespit edilmiştir. 57 kN'luk yük altında 13 mm sehîm değeriinde kirişin orta noktası ile sağ yükleme noktası arasında en geniş çatlak tespit edilmiştir. 66 kN'luk yük altında 29 mm sehîm değeriinde basınç yüzüne en yakın çatlak basınç yüzünden 65 mm uzaklıkta ölçülmüştür. 78 kN'luk yük altında 48 mm sehîm değeriinde sağ kesme bölgesindeki kesme çatlağı en geniş çatlak olarak gözlemlenmiştir. Eğilme çatlaklarının basınç yüzüne yakınlığı yaklaşık 45 mm'dir. Deney elemanında adersan çatlağı görülmemiştir. 87 kN'luk yük altında 72 mm sehîm değeriinde donatıda



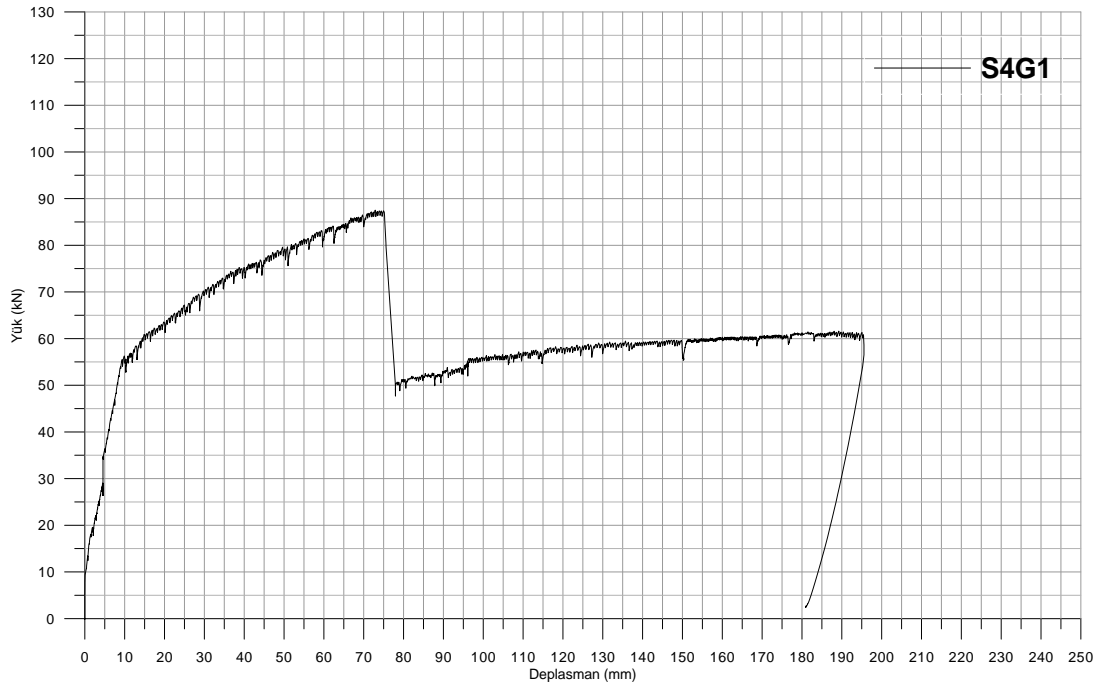
kopma olmuştur. Yük değeri 48 kN'a düşmüş, sehim değeri de 78 mm olarak ölçülmüştür. 52 kN'luk yük altında 88 mm sehim değerinde kiriş daha fazla yük almamaktadır. Sol yük noktasına yakın noktada GFRP donatının koptuğu düşünülmüştür. Betonda görülen çatlaklardan bir tanesi haricinde diğer çatlakların eğilme çatlakları olduğu görülmüştür. 58 kN'luk yük altında 195 mm sehim değerinde deney güvenliği için yükleme durdurulmuş ve deneye son verilmiştir.



**Şekil 2.18.** S4G1 elemanında oluşan çatlak gelişimi



Şekil 2.19. S4G1 elemanının deney sonunda genel hasar durumu



Şekil 2.20. S4G1 elemanının orta noktasından alınmış yük-sehim grafiği

### 2.4.3. S3G2 Elemanı Deneyi

Çekme donatısı olarak 3Ø10 çelik donatının ve 2Ø13 GFRP donatının kullanıldığı elemandır. Çekme bölgesindeki cam elyaf donatı oranı %40'tır.



**Şekil 2.21.** S3G2 deney elemanı

Deney sırasında kirişte gözlenen değişimler aşağıda belirtilmiştir.

40 kN'luk yük altında 9 mm sehim değerinde yükleme noktaları arasında eğilme çatlakları görülmüştür. Çatlakların basınç yüzüne doğru uzanan yüksekliği yaklaşık 160 mm olarak ölçülmüştür. 84 kN'luk yük altında 49 mm sehim değerinde aderans çatlağı görülmemiştir. 93 kN'luk yük altında 68 mm sehim değerinde sağ yük noktasına yakın bir noktada oluşan çatlağın genişliği (en geniş çatlak) 4 mm olarak ölçülmüştür aynı yük ve sehim değerinde aderans çatlağı hala görülmemiştir. 98 kN'luk yük altında 73 mm sehim değerinde donatıda kopma olmuştur. Yük 71 kN değerine düşmüş ve sehim 76 mm olarak ölçülmüştür. İki yükleme noktası arasında

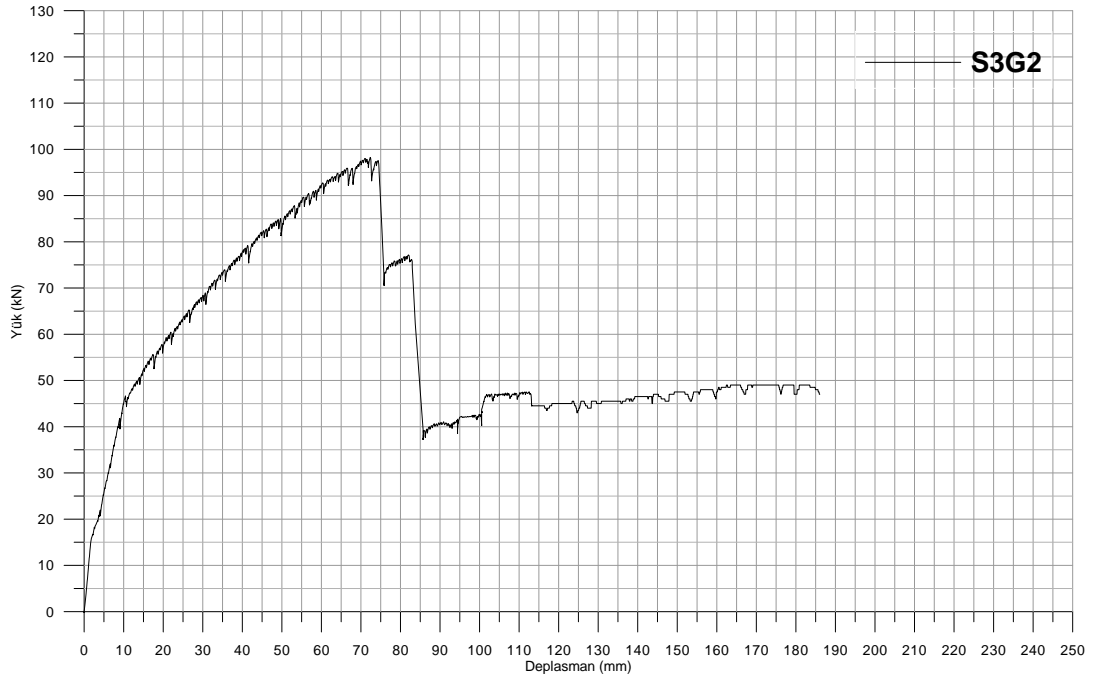
aderans çatlağı görülmüştür. Aderans çatlağı oluşmuş bölgenin uzunluğu yaklaşık 750 mm olarak ölçülmüştür. 77 kN'luk yük altında 83 mm sehim değerinde donatıda ikinci kopma olmuştur. Yük değeri 37 kN, sehim değeri 85 mm olarak ölçülmüştür. 41 kN'luk yük altında 94 mm sehim değerinde kirişin artık yük almadığı tespit edilmiştir. Kirişte sağ yükleme noktası ile kiriş açıklığının orta noktası arasında oluşmuş çatlağın genişliği (en geniş çatlak) 45 mm olarak ölçülmüştür. Hidrolik kriko ile yük daha hızlı yüklenmeye çalışılarak yük 49 kN'a kadar çıkarılmıştır, ölçülen son sehim değeri ise 177 mm'dir. Daha sonra deney güvenliği için yükleme durdurulmuş ve deneye son verilmiştir.



**Şekil 2.22.** S3G2 elemanında oluşan çatlak gelişimi



Şekil 2.23. S3G2 elemanın deney sonunda genel hasar durumu

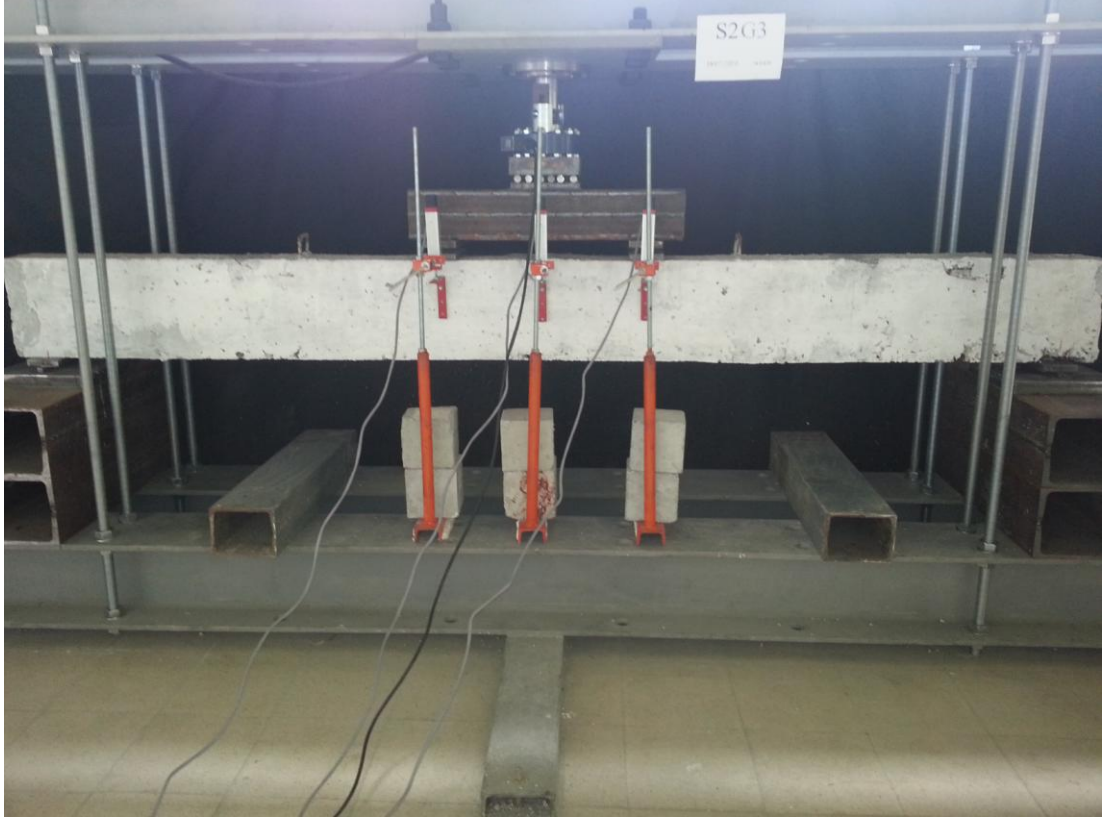


Şekil 2.24. S3G2 elemanın orta noktasından alınmış yük-sehim grafiği



#### 2.4.4. S2G3 (SGGGS) Elemanı Deneyi

Çekme donatısı olarak 2Ø10 çelik donatının ve 3Ø13 GFRP donatının kullanıldığı elemandır. Çekme bölgesindeki cam elyaf donatı oranı %60'tır. Aynı sayı ve sembolle isimlendirilmiş S2G3 (GSGSG) elemanı ile arasındaki fark çekme bölgesindeki çelik ve cam elyaf donatı sıralamasıdır.

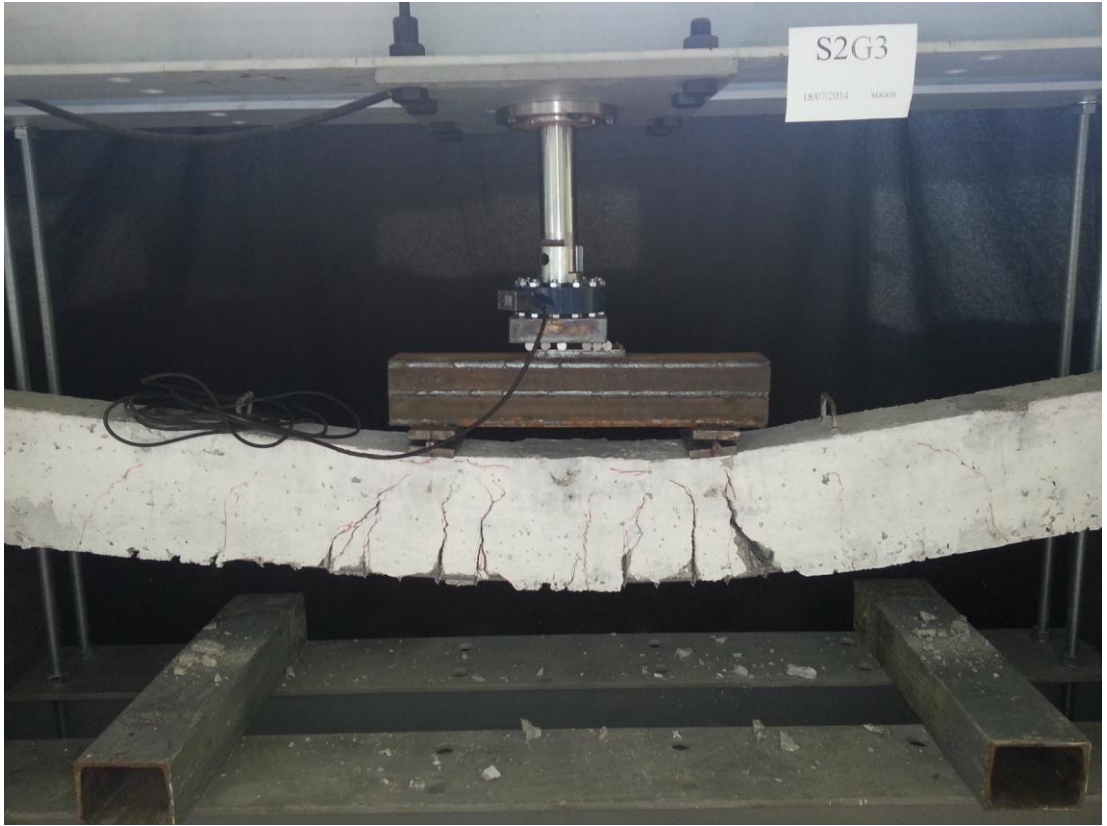


**Şekil 2.25.** S2G3 (SGGGS) deney elemanı

Deney sırasında kirişte gözlenen değişimler aşağıda belirtilmiştir.

20 kN'luk yük altında ve 4,86 mm sehim değerinde orta bölgede ilk eğilme çatlakı meydana gelmiş olup çatlakın basınç yüzüne doğru uzanan yüksekliği yaklaşık 150 mm'dir. 54 kN'luk yük altında ve 19 mm sehim değerinde sağ yük noktasına yakın ve genişliği 1 mm olan bir çatlak (en geniş çatlak) meydana gelmiştir. 70 kN'luk yük altında ve 31 mm sehim değerinde sağ yük noktasındaki çatlakın genişliği 2 mm'yi bulmuştur ve aderans çatlakı görülmemiştir. Sadece donatı sıralaması farklı olan

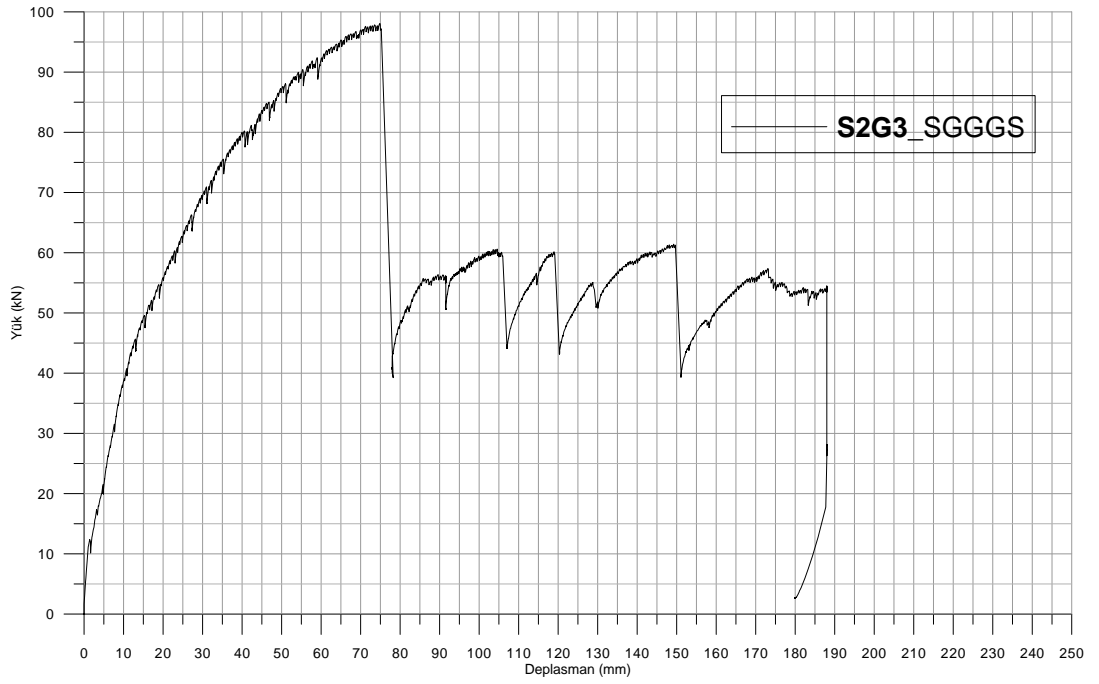
elemena göre aderans çatlağı oluşmamasının nedeni kiriş yan yzlerine yakın donatıların elik olması olarak yorumlanmıştır. 85 kN'luk yk altında ve 46,9 mm sehim değerinde sağ yk noktası altındaki çatlağın genişliği 4 mm'ye ulaşmıştır. 87 kN'luk yk altında ve 51 mm sehim değerinde aderans çatlakları oluşmaya başlamıştır. 91 kN'luk yk altında ve 59 mm sehim değerinde sağ yk noktası altındaki çatlağın genişliği 5 mm'ye ulaşmıştır. 98 kN'luk yk altında ve 77 mm sehim değerinde donatı kopmuştur ve ykkn 39 kN'a dultuğu tespit edilmiştir. 61 kN'luk yk altında ve 105,5 mm sehim değerinde ikinci donatı kopmuştur ve ykkn 44 kN'a dultuğu tespit edilmiştir. Deney guvenliği için ykleme durdurulmuş ve deneye son verilmiştir.



**şekil 2.26.** S2G3 (SGGGS) elemanında oluşan çatlak gelişimi



Şekil 2.27. S2G3 (SGGGS) elemanının deney sonunda genel hasar durumu



Şekil 2.28. S2G3 (SGGGS) elemanının orta noktasından alınmış yük-sehim grafiği



#### 2.4.5. S2G3 (GSGSG) Elemanı Deneyi

Çekme donatısı olarak 2Ø10 çelik donatının ve 3Ø13 GFRP donatının kullanıldığı deney elemanıdır. Çekme bölgesindeki cam elyaf donatı oranı %60'tır. Aynı sayı ve sembolle isimlendirilmiş S2G3 (SGGGS) elemanı ile arasındaki fark çekme bölgesindeki çelik ve cam elyaf donatı sıralamasıdır.



**Şekil 2.29.** S2G3 (GSGSG) deney elemanı

Kiriş kalıptan söküldüğünde görülmüş olan betonun kabuk kısmındaki boşluklar laboratuvarında CEM I 42,5 R çimento ve çok ince elenmiş kum ile hazırlanan nispeten yüksek mukavemetli harç ile onarılmıştır.

Deney sırasında kirişte gözlenen değişimler aşağıda belirtilmiştir.

24 kN'luk yük altında ve 7 mm sehim değerinde yük noktaları arasında eğilme çatlağı meydana gelmiştir. Donatına kopma meydana gelmeden hemen önce sol yük

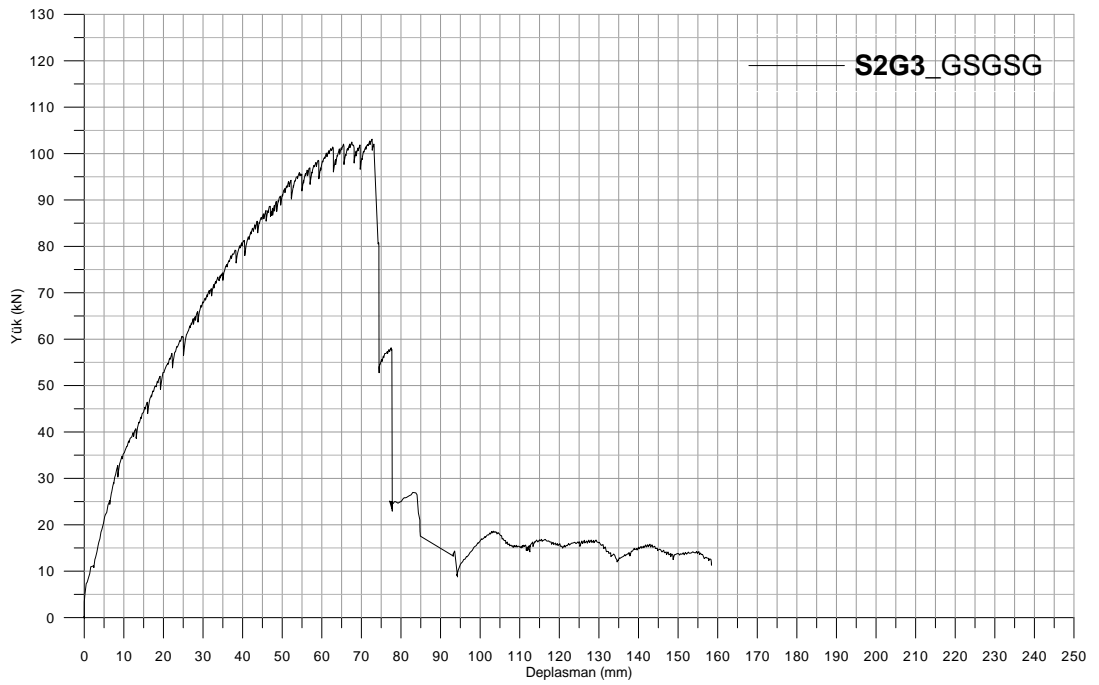
noktasının solundaki bölgede aderans çatlakları ile birlikte kabuk betonunun dökülmek üzere olduğu gözlemlenmiştir. 103 kN'luk yük altında ve 74 mm sehim değerinde kopma meydana gelmiştir. Kopmadan sonra yük 53 kN'a düşmüştür. Yükleme devam edilmiştir ve 58 kN'luk yük altında, 78 mm sehim değerinde ikinci kopma meydana gelmiştir. İkinci kopmadan sonra yük 24 kN'a düşmüştür. Yüklemenin yapıldığı hidrolik krikoda oluşan bir aksaklık nedeniyle yük istenmeden boşaltılmıştır (Yük boşaltılan kısım grafikte gösterilmemiştir). Daha sonra yüklemeye devam edilmiş, yük kaybı engellenememiştir ve sehim değeri 160 mm değerine ulaştığında deney güvenliği nedeniyle yükleme durdurulmuş ve deneye son verilmiştir.



**Şekil 2.30.** S2G3 (GSGSG) elemanında oluşan çatlak gelişimi



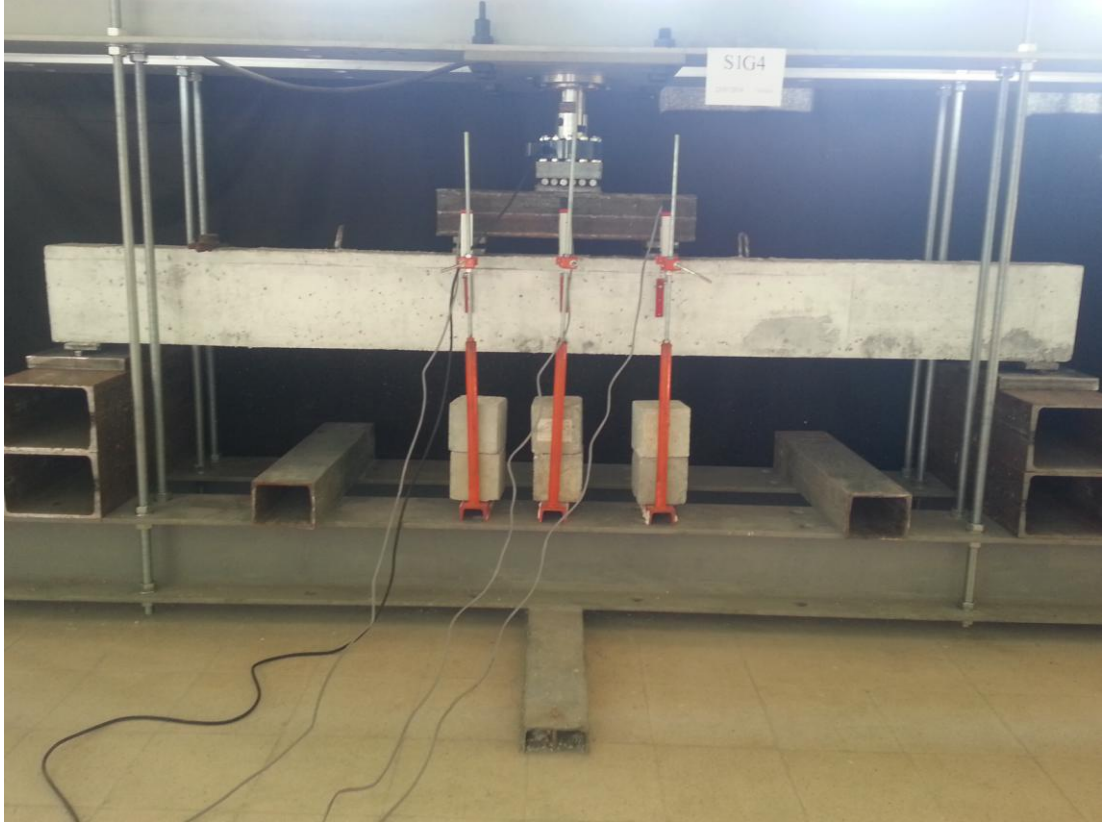
**Şekil 2.31.** S2G3 (GSGSG) elemanının deney sonunda genel hasar durumu



**Şekil 2.32.** S2G3 (GSGSG) elemanının orta noktasından alınmış yük-sehim grafiği

#### 2.4.6. S1G4 Elemanı Deneyi

Çekme donatısı olarak 1Ø10 çelik donatının ve 4Ø13 GFRP donatının kullanıldığı elemandır. Çekme bölgesindeki cam elyaf donatı oranı %80'dir.



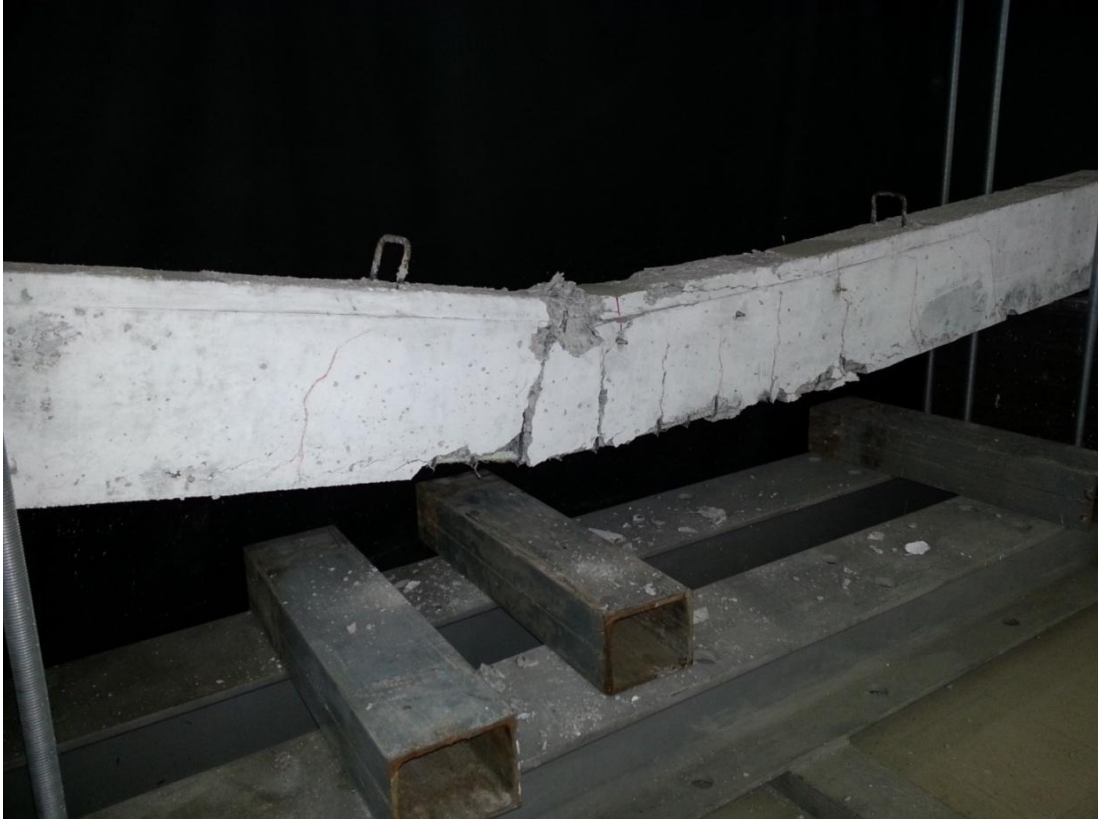
**Şekil 2.33.** S1G4 deney elemanı

Deney sırasında kirişte gözlenen değişimler aşağıda belirtilmiştir.

10 kN'luk yük altında 3,66 mm sehim değerinde kirişte eğilme çatlakları görülmüştür. 56 kN'luk yük altında 20 mm sehim değerinde çatlakların basınç yüzüne yakınlığı 65 mm olarak ölçülmüştür. 85 kN'luk yük altında 38 mm sehim değerinde en büyük çatlakların genişliği 2 mm olarak ölçülmüştür. Aderans çatlakları cam elyaf donatı oranı göz önüne alınarak düşünüldüğünde diğer kirişlere göre daha az olduğu belirlenmiştir. 110 kN'luk yük altında 60 mm sehim değerinde kirişin daha fazla yük almadığı gözlemlenmiştir. Hidrolik krikolarla yük daha hızlı yüklenmeye çalışılarak yük 120 kN'a, sehim değeri 87 mm'ye ulaştığında donatıda kopma olmuştur. Kirişin



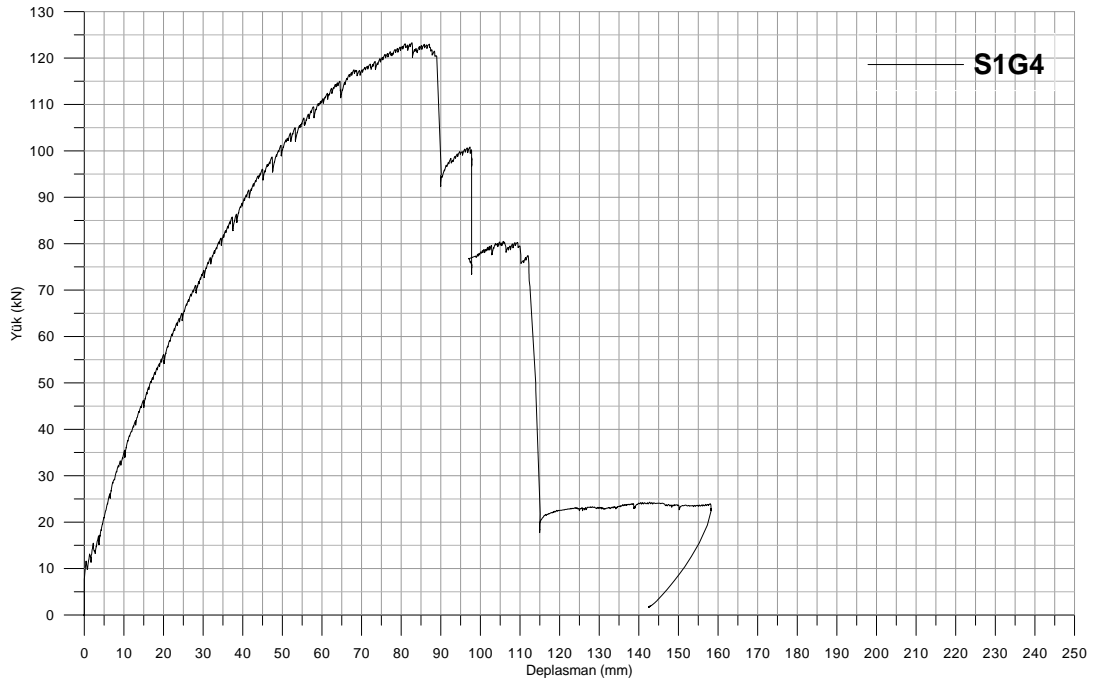
alt kısmında kabuk betonunda dökülme olmuştur. Yük değeri 92 kN ve sehim değeri 90 mm olarak ölçülmüştür. En geniş çatlak sol kesme bölgesinde ve yükleme noktasına yakın bir yerde oluşmuştur. 101 kN'luk yük altında 97 mm sehim değerinde donatıda ikinci kopma olmuştur. Yük değerinin 74 kN'a düştüğü gözlemlenmiştir. 80 kN'luk yük altında 107 mm sehim değerinde üçüncü kopma olmuştur. Yük değeri 18 kN'a düşmüş ve sehim değeri 117 mm olarak ölçülmüştür. 23 kN'luk yük altında 140 mm sehim değerinde yükleme yaptıkça kirişin yük almadığı belirlenmiştir. Deney güvenliği için yükleme durdurulmuş ve deneye son verilmiştir.



**Şekil 2.34.** S1G4 elemanında oluşan çatlak gelişimi



Şekil 2.35. S1G4 elemanın deney sonunda genel hasar durumu



Şekil 2.36. S1G4 elemanın orta noktasından alınmış yük-sehim grafiği

#### 2.4.7. S0G5 Elemanı Deneyi

Çekme donatısı olarak 5Ø13 GFRP donatının kullanıldığı, çelik donatının bulunmadığı referans elemanıdır. Çekme bölgesindeki cam elyaf donatı oranı %100'dür.



Şekil 2.37. S0G5 deney elemanı

Deney sırasında kirişte gözlenen değişimler aşağıda belirtilmiştir.

6 kN'luk yük altında 1,6 mm sehim değerinde ilk çatlak gözlemlenmiştir. Çatlak, kirişin tam orta noktasında oluşmuştur. 69 kN'luk yük altında 31,6 mm sehim değerinde diğer kirişlere göre çatlaklar arası mesafelerin fazla olduğu görülmüştür. 92,5 kN'luk yük altında 47 mm sehim değerinde aderans çatlakları oluşmaya başlamıştır. 103 kN'luk yük altında 57,2 mm sehim değerinde aderans çatlakları net olarak görülmüştür. Sağ kesme bölgesinde sağ yükleme noktasına yakın olan çatlağın genişliği (en geniş çatlak) 4 mm'dir. 109 kN'luk yük altında 70,3 mm sehim

değerinde kirişin daha fazla yük almadığı tespit edilmiştir. 108,5 kN'luk yük altında 77,4 mm sehim değerinde donatıda kopma olmuştur. Yük 2,3 kN'a düşmüş ve sehim 83,3 mm olmuştur. 34 kN'luk yük altında 123 mm sehim değerinde donatıda ikinci kopma olmuştur. Yük 10,2 kN'a düşmüş ve sehim 128 mm olarak ölçülmüştür. 20 kN'luk yük altında 132 mm sehim değerinde deney güvenliği için yükleme durdurulmuş ve deneye son verilmiştir.

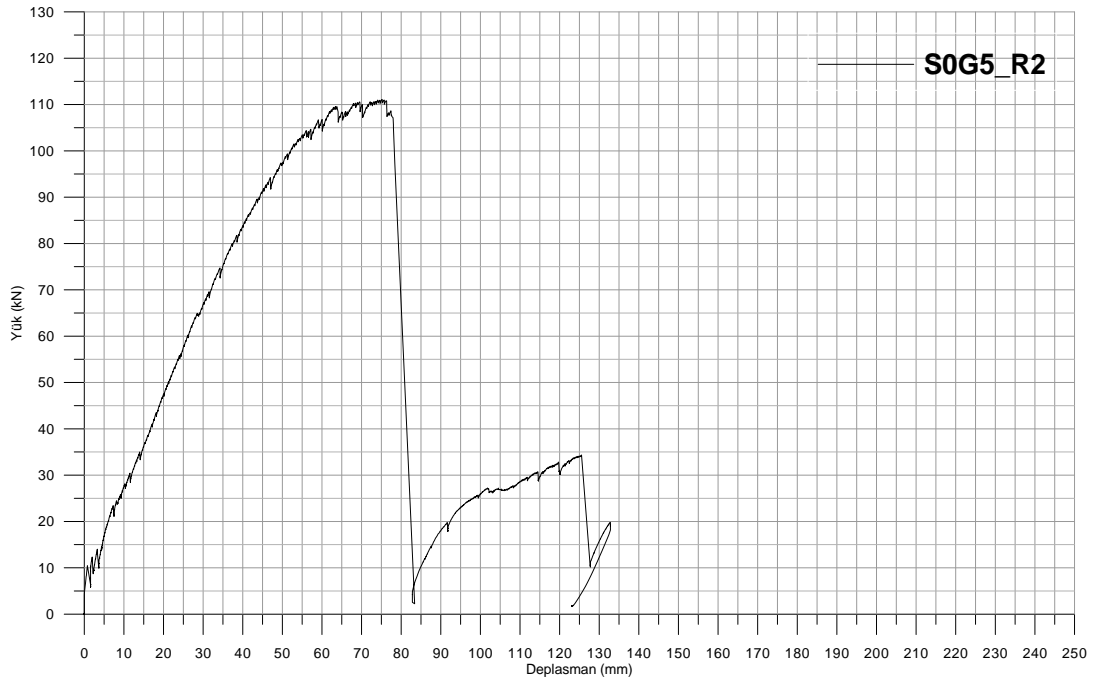


**Şekil 2.38.** S0G5 elemanında oluşan çatlak gelişimi





**Şekil 2.39.** S0G5 elemanının deney sonunda genel hasar durumu



**Şekil 2.40.** S0G5 elemanının orta noktasından alınmış yük-sehim grafiği

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, deneyler sırasında elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler taşıma güçleri, süneklik oranları, enerji sönümlenme kapasiteleri ve eğilme rijitliklerine göre yapılmıştır. Çizelge ve grafikler yardımıyla karşılaştırmalar sunulmuştur.

#### 3.1. Taşıma Gücü

Deneylein yapıldığı kirişlerin, deneysel verilerle elde edilmiş taşıma güçleri ( $P_{ud}$ ), deneysel verilerle elde edilmiş akma yükleri ( $P_{yd}$ ), teorik hesaplarla bulunmuş taşıma güçleri ( $P_{uh}$ ), deneysel taşıma güçleri ile deneysel akma yüklerinin birbirine oranı ( $P_{ud}/P_{yd}$ ), elemanların deneysel akma yükleri ile referans kirişinin deneysel akma yükünün oranı (göreceli deneysel akma yükü oranı) çizelge 3.1.de verilmiştir. Deneysel akma yükü ( $P_{yd}$ ) yük-sehim grafiğinin eğiminde ani ve önemsenebilecek büyüklükte bir düşme olan ilk yük değeridir. Kirişlerin deneysel taşıma gücü ( $P_{ud}$ ) elemanın yüklem sırasında gözlemlenen en büyük yük değeri olarak belirlenmiştir. Teorik hesaplarla bulunmuş taşıma gücü yükleri ( $P_{uh}$ ) ise eşdeğer basınç bloğu metodu kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.1. Elemanların akma yükleri ve maksimum yükleri

Eleman	Cam Elyaf Donatı Yüzdesi	$P_{yd}$ (kN)	$P_{ud}$ (kN)	$P_{uh}$ (kN)	$P_{ud}/P_{yd}$	Göreceli Deneysel Akma Yükü Oranı
S0G5	%100	84,87	111,10	65,2	1,31	1,00
S1G4	%80	70,13	123,28	64,92	1,76	0,83
S2G3 (GSGSG)	%60	35,06	103,10	64,54	2,94	0,41
S2G3 (SGGGS)	%60	40,26	98,06	64,54	2,44	0,47
S3G2	%40	38,47	98,25	64,01	2,55	0,45
S4G1	%20	51,80	87,53	63,28	1,69	0,61
S5G0	%0	62,43	>83,67	62,03	1,34	0,74

S5G0 elemanın deneysel taşıma gücünün ( $P_{ud}$ ) büyüktür işareti ile birlikte verilmesinin nedeni çerçevenin kapasitesinin sınırlı olmasından ve deney güvenliği sebepleriyle deney elemanlarının maksimum sehım değerlerine ulaşmadan deneyin erken sonlandırılmasındandır.

Çizelge 3.1. incelendiğinde deneysel akma yükü en büyük olan eleman S0G5 (84,87 kN), en küçük olan eleman ise S2G3 (GSGSG) (35,06 kN)'tür. En büyük deneysel yük ise S1G4 elemanına aittir (123,28 kN). Göreceli deneysel akma yükleri oranları 1,00 ile 0,41 değerleri arasında değişmektedir.

Tüm deney elemanlarının eşdeğer basınç bloğu metodu kullanılarak elde edilen teorik taşıma gücü değerleri, deneysel taşıma gücü değerlerinden küçüktür. Eşdeğer taşıma gücü hesaplamaları güvenli tarafta kalmaktadır.

### **3.2. Süneklik**

Deneye tabi tutulan kirişlerin tümü hesaplanan teorik dayanımlara ulaşmıştır. Bu ulaştıkları değerlerin yanında kirişlerin performans ve davranışlarını doğru olarak tespit edebilmek için bu yük değerini ne kadar koruyabildiği de çok önemli bir etkidir. Bu da elemanın aynı dayanım değerini koruyarak ne kadar deformasyon yapabileceği konusundaki yeteneğinden yani sünekliğinden bahsedebilmeyi sağlar. Elemanın bu davranış konusunda süneklik oranının 4-5 değerinden küçük olması istenmeyen durumdur. Bu çalışmada süneklik oranı, çekme donatısı olarak GFRP donatıların kullanıldığı elemanlarda en büyük yük değerine ulaşıldığı andaki sehım değerinin akma anındaki sehım değerine oranı olarak belirlenmiştir. Çekme donatılarının tamamının çelik donatılardan oluştuğu elemanlarda ise süneklik oranı, elemanın en büyük yük değerine ulaşmasından sonra %15 dayanım kaybettiği andaki sehım değerinin akma anındaki sehım değerine oranı olarak tanımlanmıştır. Çizelge 3.2.de donatısında kopma olmayan elemanların %15 dayanım kaybettiği andaki ( $\delta_u$ ) ve donatısında kopma olan kirişlerin maksimum dayanıma ulaştığı andaki ( $\delta_u$ ) deformasyon değerleri, akma anındaki ( $\delta_y$ ) deformasyon değerleriyle bu iki değer oranı olan süneklik oranı ( $\delta_u/\delta_y$ ) ve bütün deney elemanlarının süneklik oranının

referans elemanın süneklik oranına tek tek bölünmesiyle elde edilen göreceli süneklik oranı verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Elemanların süneklik ve göreceli süneklik oranları

<b>Eleman</b>	<b>Cam Elyaf Donatı Yüzdesi</b>	<b><math>\delta_u</math> (mm)</b>	<b><math>\delta_y</math> (mm)</b>	<b>Süneklik Oranı (<math>\delta_u/\delta_y</math>)</b>	<b>Göreceli Süneklik</b>
<b>S0G5</b>	%100	75,17	40,68	1,85	1,00
<b>S1G4</b>	%80	82,75	27,70	2,99	1,62
<b>S2G3 (GSGSG)</b>	%60	72,69	9,80	7,42	4,01
<b>S2G3 (SGGGS)</b>	%60	74,89	10,59	7,07	3,83
<b>S3G2</b>	%40	72,34	8,18	8,84	4,79
<b>S4G1</b>	%20	72,88	8,50	8,57	4,64
<b>S5G0</b>	%0	229,97	10,77	>21,35	11,56

Çizelge 3.2. incelendiğinde akma yüküne karşılık gelen  $\delta_y$  deplasmanlarının cam elyaf donatısı oransal olarak fazla olan elemanlarda daha büyük oldukları görülmektedir. S5G0 elemanında  $\delta_y$  deplasmanı 10,77 mm iken S0G5 elemanında bu değer 40,68 mm'ye kadar artmıştır. Aynı çizelgede çekme donatılarının tamamının çelikten oluştuğu elemanlarda süneklik oranının 21,35 olduğu, çekme donatılarının tamamının cam elyaf donatı olduğu elemanlarda ise süneklik oranının 1,85'e kadar değiştiği görülmektedir. Göreceli süneklik değeri S0G5 elemanında 1,00 iken S5G0 elemanında 11,56'ya kadar yükselmiştir.

Çizelge 3.2.de S5G0 elemanının sünekliği büyüktür işareti ile birlikte verilmiştir. Bu işaret, çerçevenin kapasitesinin sınırlı olmasından ve deney güvenliği sebepleriyle deney elemanlarının maksimum sehim değerlerine ulaşmadan deneyin erken sonlandırılmasından dolayı gerçek süneklik değerinin verilen değerden daha büyük olduğunu göstermek için kullanılmıştır.

### 3.3. Enerji Sönümlenme

Dış yükler altında betonarme taşıyıcı bir sistem elastik bölgede kalıyorsa bu sistem dış yükler tarafından kendine verilen enerjiyi geri iletebilmektedir. Böyle bir durum, ancak deprem etkisinin küçük olduğu zamanlarda veya yapının özellikle elastik bölgede kalacak şekilde tasarlanması ile olabilir ancak genellikle ekonomik olmaz. Bu nedenle ekonomik bir tasarım için büyük yükler altında taşıyıcı sistemin üzerindeki enerjinin bir kısmını başka enerjilere dönüştürebilmesi istenir. Enerjinin dönüştürülebilir kısmına tüketilen enerji denir. Betonarme taşıyıcılar bazı kurallara uyularak yapıldığında elasto-plastik bir davranış gösterirler. Böyle bir sistem üzerine gelen enerjinin bir kısmını deformasyon enerjisine dönüştürerek tüketir. Dönüştürülen enerji plastik bölgenin uzunluğu ile genellikle doğru orantılıdır. Bu nedenle taşıyıcı sistem elemanlarının enerji tüketebilme kapasiteleri oldukça önemlidir [29].

Herhangi bir elemanın kalıcı deformasyona uğramadan (yük-sehim grafiğinde elastik bölge içinde) alabileceği enerjiye (geri iletebilen enerji) rezilyans modülü adı verilir. Elemanlara yapılan yüklemelerde yük-sehim grafiğinde elastik bölge geçildikten sonra herhangi bir sehim değeri için o andaki toplam enerji, geri iletebilen enerji ve o ana kadar tüketilen enerjinin toplamına eşittir ve yine elemanlara yapılan yüklemelerde elemanın göçme anına kadar alabileceği tüm enerjiye tokluk modülü adı verilir. Rezilyans modülü yük – sehim grafiğinde akma noktasına kadar olan bölgede grafiğin altında kalan alanın tespitiyle hesaplanır. Tokluk modülü ise yük – sehim grafiğinin tümünün altında kalan toplam alanın tespitiyle hesaplanır. Ancak elemanlarda rezilyans modülünün tam olarak bulunamayacağı bilindiğinden ve yapı deprem tasarımının amaçlarından biri de yapının kalıcı deformasyonlara uğrasa bile deprem sırasında göçmemesi olduğu için çalışmada rezilyans modülünün yerine tokluk modülü değerleri verilmiştir.

Yük-sehim eğrilerinin altında kalan alandan elde edilen toplam enerji olarak tokluk modülleri kJoule birimi ile gösterilmiş ve göreceli tokluk modülü olan her elemanın tokluk modülünün referans elemanının tokluk modülüne oranı Çizelge 3.3.te ifade edilmiştir.

Tokluk modülünün büyüktür işareti ile birlikte verilmesinin nedeni çerçevenin kapasitesinin sınırlı olmasından ve deney güvenliği sebepleriyle deney elemanlarının maksimum sehim değerlerine ulaşmadan deneyin erken sonlandırılmasındandır.

**Çizelge 3.3.** Elemanların tokluk modülü ve göreceli tokluk modülü değerleri

Eleman	Cam Elyaf Donatı Yüzdesi	Tokluk Modülü (kJ)	Göreceli Tokluk Modülü
<b>S0G5</b>	%100	>7,20	1,00
<b>S1G4</b>	%80	>10,60	1,47
<b>S2G3 (GSGSG)</b>	%60	>6,70	0,93
<b>S2G3 (SGGGS)</b>	%60	>11,30	1,57
<b>S3G2</b>	%40	>10,70	1,49
<b>S4G1</b>	%20	>11,80	1,64
<b>S5G0</b>	%0	>16,80	2,33

Çizelge 3.3. incelendiğinde S5G0 elemanında tokluk modülü 16,80 kJ iken S0G5 elemanında 7,20 kJ olduğu görülmektedir. Göreceli tokluk modülü de 2,33 ile 0,93 arasında değişim göstermektedir. Çekme donatısı olarak çelik donatıların, GFRP donatılara göre oransal olarak fazla olduğu elemanlarda enerji tüketiminin bir ölçüsü olan tokluk modülünün daha büyük olduğu belirlenmiştir.

### 3.4. Eğilme Rijitliği

Moment-eğrilik grafiğinin yükselen kısmının eğiminden eğilme rijitliği bulunur. Deneyde kullanılan kirişlerin rijitliklerinin karşılaştırılmasında moment-eğrilik grafiğinden bulunan eğilme rijitliğinin kullanılması bir takım zorluklarla karşılaşılmasına neden olmaktadır. Eğrilik değeri tespit edilirken deney elemanında ölçümün alınacağı bölgenin uzunluğunu tam olarak belirlemek olanaksız sayılabilir. Bunun nedeni ölçüm alınan bölgenin uzunluğuna göre değişen çatlak sayısının ölçüm alınan bölgenin eğriliğini değiştirmesidir. Yük ve sehim, moment ile eğrilığe bağlı birer fonksiyondur. Elemanların rijitlikleri karşılaştırılırken yük-sehim grafiğinin eğiminin, moment-eğrilik grafiğinin eğimi yerine kullanılması herhangi bir sorun

teşkil etmemektedir. Bu yüzden eğilme rijitliğinin yerine yine eğilme rijitliğini ifade eden yük sehim grafiğinin sadece elastik bölümünün eğimi kullanılmıştır.

Çizelge 3.4.te deney elemanlarının rijitlik değerinin hesaplanmasında kullanılan yük - sehim grafiğinde elastik bölge içindeki iki nokta arasındaki yük ( $\Delta P$ ) ve sehim farkları ( $\Delta \delta$ ), yük-sehim eğrilerinden bulunan rijitlik değerleri ve her deney elemanının rijitlik değerinin referans elemanın rijitlik değerine oranı olan göreceli rijitlik değerleri verilmektedir. Yük ve sehim farkları alınan bölge seçilirken eğrinin en doğrusal olan kısmından seçilmeye çalışılmıştır.

**Çizelge 3.4.** Elemanların rijitlik ve göreceli rijitlik değerleri

Eleman	Cam Elyaf Donatı Yüzdesi	$\Delta P$ (kN)	$\Delta \delta$ (mm)	Rijitlik $\Delta P / \Delta \delta$ (kN/mm)	Göreceli Rijitlik
<b>S0G5</b>	%100	18,41	8,63	2,13	1,00
<b>S1G4</b>	%80	9,36	5,70	1,64	0,77
<b>S2G3 (GSGSG)</b>	%60	14,12	4,04	3,50	1,64
<b>S2G3 (SGGGS)</b>	%60	13,50	3,74	3,61	1,69
<b>S3G2</b>	%40	12,24	3,12	3,92	1,84
<b>S4G1</b>	%20	7,99	1,88	4,25	2,00
<b>S5G0</b>	%0	9,47	1,81	5,23	2,46

Rijitlik değerleri 1,64 ile 5,23 arasında değişmiştir. Göreceli rijitlik ise 0,77 ile 2,46 arasındadır. Rijitliği en büyük olan eleman S5G0, en küçük olan eleman ise S1G4 elemanıdır.

### 3.5. Deney Elemanlarının Birbiriyle Karşılaştırılması

Çekme bölgesinde 4 ve 5 adet GFRP donatı bulunduran elemanların akma anındaki deplasmanlarının diğer elemanlara göre fark edilir nispette büyük oldukları belirlenmiştir. Ancak çekme donatısı olarak GFRP donatı sayısı çelik donatı sayısından fazla olan elemanlarda en büyük yüke karşılık gelen  $\delta_u$  deplasmanlarının daha küçük olduğu tespit edilmiştir.

Süneklik oranlarına bakıldığında çelik çekme donatılarının oransal olarak fazla olduğu elemanlarda süneklik oranının daha büyük değerlerde olduğu gözlenmiştir.

Çelik çekme donatısı fazla olan elemanların enerji tüketme kapasitelerinin daha büyük olarak belirlenmiştir.

Rijitlikler incelendiğinde yine çelik donatıların oransal olarak fazla olduğu elemanlarda rijitlik değerlerinin daha büyük olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 3.5.te S5G0 elemanı esas alınarak akma yükü oranı, göreceli akma yükü, göreceli süneklik, göreceli enerji tüketimi ve göreceli rijitlik değerleri birarada verilmiştir.

**Çizelge 3.5.** Elemanların göreceli yük, göreceli süneklik, göreceli enerji sönümlenme ve göreceli rijitlik değerleri

Eleman	Taşıma Gücü-Akma Yükü Oranı	Göreceli Akma Yükü	Göreceli Süneklik	Göreceli Enerji Sönümlenme	Göreceli Rijitlik
<b>S0G5</b>	1,31	1,00	1,00	1,00	1,00
<b>S1G4</b>	1,76	0,93	1,62	1,48	0,77
<b>S2G3 (GSGSG)</b>	2,94	0,47	4,01	0,94	1,64
<b>S2G3 (SGGGS)</b>	2,44	0,54	3,83	1,58	1,69
<b>S3G2</b>	2,55	0,51	4,79	1,49	1,84
<b>S4G1</b>	1,69	0,69	4,64	1,65	2,00
<b>S5G0</b>	1,34	0,83	11,56	2,34	2,46

Deney elemanlarında oluşan ilk çatlak yükleri ve bu yükleme değerlerindeki deplasman değerleri çizelge 3.6.da verilmiştir. Çizelgede verilen değerler yük- sehim grafiğinde yükleme sırasında yükte düşme meydana gelmiş değerlere ait okumalardır. İlk çatlak değerlerinin kılcal çatlaklar olduğu için deney esnasında gözle görmek mümkün olmadığından yük-sehim değerleri grafikten okunmuştur.



**Çizelge 3.6.** Elemanların ilk çatlak yük - sehim değerleri

<b>Eleman</b>	<b>Cam Elyaf Donatı Yüzdesi</b>	<b>Elemanda Oluşan İlk Çatlak Yüğü (kN)</b>	<b>Elemanda Oluşan İlk Çatlak Deplasmanı (mm)</b>
<b>S0G5</b>	%100	10,46	0,78
<b>S1G4</b>	%80	11,63	0,45
<b>S2G3 (GSGSG)</b>	%60	11,17	2,36
<b>S2G3 (SGGGS)</b>	%60	12,38	1,42
<b>S3G2</b>	%40	16,75	2,18
<b>S4G1</b>	%20	13,45	0,71
<b>S5G0</b>	%0	13,14	1,10

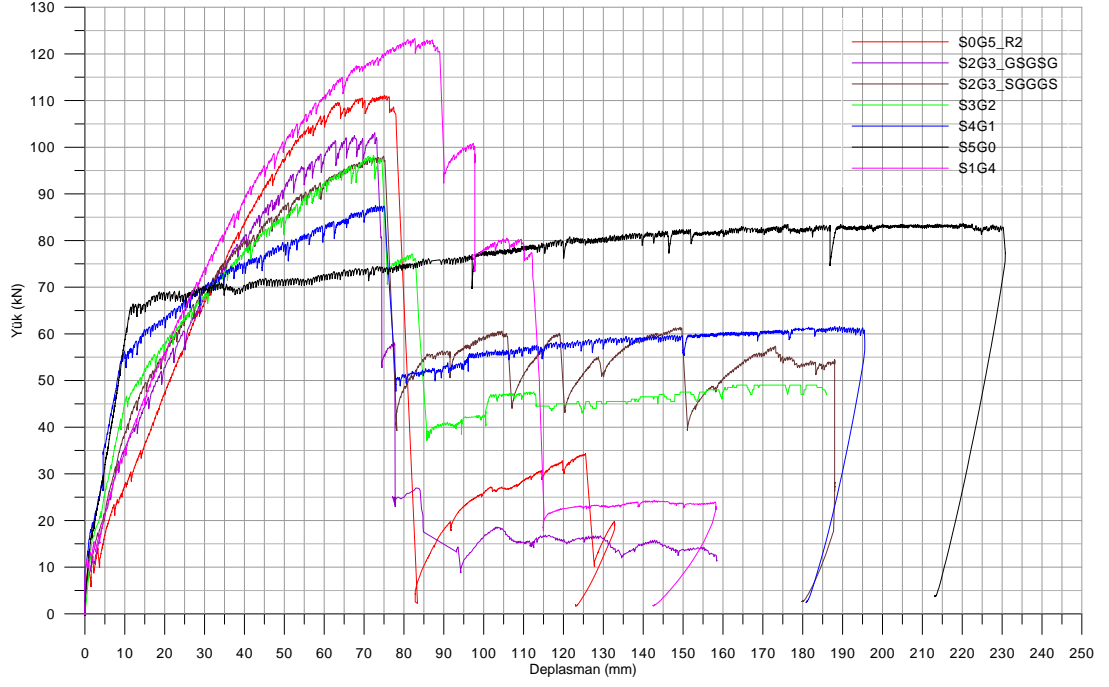
İlk çatlak yüğü en küçük olan eleman S0G5 elemanıdır. 10,46 kN yükte oluşun ilk çatlakta deplasman 0,78 mm'dir. İlk çatlak yüğü en büyük olan eleman S3G2 elemanıdır. 16,75 kN yük değerine karşılık 2,18 mm deplasman oluşmuştur.

Yapılan yüklemede donatıda kopmanın ardından yükün düştüğü değerin daha sonra yükleme devam edilerek ulaştığı yük toparlama yüzde değerleri çizelge 3.7.de verilmiştir. Çelik çekme donatılı elemanda herhangi bir donatı kopana kadar yükleme yapılmadığı için yük toparlama değeri hesaplanamamıştır.

**Çizelge 3.7.** Elemanların yük toparlama oranları

<b>Eleman</b>	<b>Cam Elyaf Donatı Yüzdesi</b>	<b>Ulaşılan Max. Yük Değeri</b>	<b>1. Kopmadan Sonraki Yük Değeri (kN)</b>	<b>1. Kopmadan Sonra Çıkılan Max. Yük Değeri (kN)</b>	<b>Ulaşılan Max.Yüğe Göre Geri Toparlama Yüzdesi</b>
<b>S0G5</b>	%100	111,1	2,25	34,36	%30,93
<b>S1G4</b>	%80	123,28	92,33	100,82	%81,78
<b>S2G3 (GSGSG)</b>	%60	103,1	54,04	58,15	%56,40
<b>S2G3 (SGGGS)</b>	%60	98,06	39,26	60,61	%61,81
<b>S3G2</b>	%40	98,25	70,65	77,16	%78,53
<b>S4G1</b>	%20	87,53	47,72	61,61	%70,39

Çizelge 3.7 incelendiğinde en büyük yüke göre donatı koptuktan sonra yükün toparlanma yüzdesi en büyük olan eleman S1G4 elemanıdır ve toparlanma yüzdesi %81,78'tür. Donatı koptuktan sonra yükte en küçük toparlanma S0G5 elemanında görülmüştür. Toparlanma yüzdesi %30,93'tür.



Şekil 3.1. Deney elemanlarının birlikte verilmiş yük-sehim grafikleri

#### 4. SONUÇLAR

Dış çevre koşullarına maruz kalmış betonarme elemanlarda zaman içinde korozyon etkisi ile çelik donatılarda kesit kaybı yaşanabilmektedir. Bu kesit kaybı yapı elemanının taşıma gücünü azaltmaktadır. Bu çalışmada korozyon etkisinin betonarme elemanlara olumsuz etkisini gidermek amacıyla çelik donatıyla birlikte kirişte çekme donatısı olarak kullanılan GFRP donatıların kirişin eğilme davranışı üzerindeki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Deneysel bir çalışma planlanmış ve yedi adet betonarme kiriş iki noktalı yükleme altında test edilmiştir. Çalışmada çekme donatısı olarak kullanılan çelik ve GFRP donatı toplam alanları parametre olarak incelenmiştir. Bir elemanda donatı alanı sabit tutulup donatı sıralaması değiştirilerek bunun davranış üzerindeki etkisi araştırılmıştır (S2G3 elemanlarında, GSGSG ve SGGGS olmak üzere). Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

1. Çekme donatılarının tamamı çelik olan elemanlar sünek bir davranış, çekme donatılarının tamamı GFRP olan elemanlar gevrek bir davranış sergilemişlerdir.
2. GFRP donatıları oransal olarak fazla olan elemanlarda akma anındaki deplasmanları daha büyük olmasına rağmen, en büyük yüke karşılık gelen deplasman değerleri diğerlerine göre daha küçük çıkmıştır.
3. GFRP donatı alanlarının oransal olarak fazla olduğu elemanlarda, çelik donatı alanlarının oransal olarak fazla olduğu elemanlara göre çatlaklar arası mesafe daha fazla ancak çatlak sayısının daha az olduğu belirlenmiştir.
4. GFRP donatılı elemanlarda, donatılar lifli bir yapıya sahip olduklarında kopma kademeli olarak gerçekleşmektedir. Yani GFRP donatı kesitinin tamamı bir anda kopmamaktadır, lifler önce yavaş yavaş sıyrılarak daha sonra kopmamış kesit bir anda kopmaktadır. Kopmaların gerçekleştiği anlarda ani yük kayıpları olmaktadır.

5. GFRP çekme donatılarının içinde çelik donatıların olması, donatıda kopma gerçekleştikten sonra tekrar yükün toparlanmasına (artışına) katkı sağlamaktadır. Bu katkı ile (elemanın en büyük yüküne göre) çelik donatı oranı %20 olan elemanda yaklaşık %82, çelik donatı oranı %80 olan elemanda yaklaşık %70 yük toparlanması sağlanmıştır.
6. Çekme yüzünde donatıların yerleri de aderans çatlakları üzerinde etkili olmaktadır. Cam elyaf donatılar yapıları gereği nervürlü üretilmeyip daha sonradan bir iple nervürlendirildiği için aderansı çeliğe göre daha düşük olduğu düşünülmektedir. Çekme yüzünde çelik donatıların en dışta olduğu elemanlarda aderans çatlakları çok daha geç oluşmuştur.
7. GFRP donatılar gevrek malzeme olduklarından tek başlarına eğilme davranışında istenilen performansı sağlayamamaktadırlar. Ancak çelik donatılarla birlikte kullanıldıklarında korozyonun kesit üzerinde sebep olduğu dayanım kayıplarını nispeten giderebilecekleri düşünülmektedir.
8. Deneyde kullanılan GFRP donatılar düşük elastisite modülüne sahip olmalarına rağmen yerli üretim, ucuz ve kolay elde edilebilir olmaları nedeniyle tercih edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Ferhat Aydın. GFRP-Beton-Çelik Lifli Hibrit Kirişlerin Eğilme Davranışlarının İncelenmesi. International Construction Congress. 11-13 October 2012. Isparta/Turkey.
- [2] Şahin, Y., 2000. Kompozit Malzemelere Giriş. Ankara. Gazi Yayın Evi.
- [3] Clarke, J. L., 1996, Structural Lightweight Aggregate Concrete. Chapman ve Hall.
- [4] Anonim, <http://www.strongwell.com>. (17.11.2013).
- [5] Barris, C., Torres, L., Turon, A., Baena, M., Catalan, A. An experimental study of the flexural behaviour of GFRP RC beams and comparison with prediction models. Composite Structures 91 286–295, 2009.
- [6] Miàs, C., Torres, L., Turon, A., Barris, C. Experimental study of immediate and time-dependent deflections of GFRP reinforced concrete beams. Composite Structures 96 279–285, 2013.
- [7] Miàs, C., Torres, L., Turon, A., Sharaky I.A. Effect of material properties on long-term deflections of GFRP reinforced concrete beams. Construction and Building Materials 41 99–108, 2013.
- [8] Ashour, A.F. Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars. Construction and Building Materials 20 1005–1015, 2006.
- [9] Alsayed, S.H. Flexural behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars. Cement and Concrete Composites 20 1-11, 1998.

- [10] Barris, C., Torres, L., Comas, J., Miàs, C. Cracking and deflections in GFRP RC beams: An experimental study. *Composites: Part B* 55 580–590, 2013.
- [11] Almusallam, T. H., Elsanadedy, H. M., Al-Salloum, Y. A., Alsayed S. H. Experimental and numerical investigation for the flexural strengthening of RC beams using near-surface mounted steel or GFRP bars. *Construction and Building Materials* 40 145–161, 2013.
- [12] Choi, D.U., Chun, S. C., Ha, S. S. Bond strength of glass fibre-reinforced polymer bars in unconfined concrete. *Engineering Structures* 34 303–313, 2012.
- [13] Kara, I.F., Ashour A.F., Dundar C., Deflection of concrete structures reinforced with FRP bars. *Composites: Part B* 44 375–384, 2013.
- [14] Santos, P., Laranja, G., França, P.M., Correia, J.R. Ductility and moment redistribution capacity of multi-span T-section concrete beams reinforced with GFRP bars. *Construction and Building Materials* 49 949–961, 2013.
- [15] He, Z., Qiu, F. Probabilistic assessment on flexural capacity of GFRP-reinforced concrete beams designed by guideline ACI 440.1R-06. *Construction and Building Materials* 25: 1663-1670, 2011.
- [16] Masmoudi, A. , Ouezdou, M.B. , Bouaziz, J. New parameter design of GFRP RC beams. *Construction and Building Materials* 29: 627-632, 2012.
- [17] Issa, M.S., Metwally, I.M., Elzeiny, S.M. Influence of fibers on flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars. *Engineering Structures* 33: 1754-1763, 2011.
- [18] Li, X. , Lv, H. , Zhou, S. Flexural behavior of GFRP-reinforced concrete encased steel composite beams. *Construction and Building Materials* 28: 255-262, 2012.

- [19] Nawy, E.G. and Neuwerth, G.E. Behaviour of fiber glass reinforced concrete beams. *J. Struct. Div. ASCE*, 2203-2215, 1971.
- [20] Nawy, E.G. and Neuwerth, G.E. Fiberglass reinforced concrete slabs and beams. *J. Struct. Div. ASCE*, 421-440, 1977.
- [21] Saadatmanesh, H. and Ehsani, M.R. Fiber composite bars for reinforced concrete construction. *J. Comp. Mater.* 25, 188-203, 1991.
- [22] Challal, O., Houde, J., Benmokrane, B. and Aitcin, P.C. Use of a new glass-fiber rod as reinforcement for concrete structures. In *Proc. ACI Int. Conf. on Evaluation and Rehabilitation of Concrete Structures and Innovation in Design*, ed. V.M. Malhotra, Hong Kong, SP-128, 1, pp. 515-528, 1991.
- [23] GangaRao, H.V.S. and Faza, S.S. Bending and bond behaviour and design of concrete beams reinforced with fiber reinforced plastic rebars. Final Report to the Federal Highway Administration, West Virginia University, p. 159, 1991.
- [24] Faza, S.S. and GangaRao, H.V.S. Pre- and post-cracking deflection behaviour of concrete beams reinforced with fibre-reinforced plastic rebars. In *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, eds. K.W. Neale and P. Labossiere, Canadian Society for Civil Engineering, pp. 151-160, 1992.
- [25] *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*. ACI Committee 318, American Concrete Institute, Detroit, pp. 181-211, 1989.
- [26] Nanni, A., Okamoto, T., Tanigaki, M. and Henneke, M. Hybrid (FRP + steel) reinforcement for concrete structures. In *Materials Performance and Prevention of Deficiencies and Failures*. Proc Materials Engineering Congress, Atlanta, Georgia, pp. 655-665, 1992.
- [27] Nanni, A. Flexural behavior and design of RC members using FRP reinforcement. *J. Struct. Eng.*, 119 (11), 3344-3359, 1993.

- [28] Benmuktane, B., Chaallalt, O., Masmoudi, R. Glass fibre reinforced plastic (GFRP) rebars for concrete structures. *Construction and Building Materials*, Vol. 9, No. 6, pp. 353-364, 1995.
- [29] E. Özbek, T-Kesitli Betonarme Kirişlerin Kesme-Eğilmeye Karşı Güçlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara, 2001.