

**KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**CAM ELYAF DONATILI KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞININ SONLU  
ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ**

**Saruhan KARTAL**

**KASIM 2014**

**İnşaat Anabilim Dalında** Saruhan KARTAL tarafından hazırlanan CAM ELYAF DONATILI KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. İlhami DEMİR  
Anabilim Dalı Başkanı

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

Yrd. Doç. Dr. Eda AVANOĞLU SICACIK  
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Doç. Dr. İlhami DEMİR\_\_\_\_\_

Üye (Danışman) : Yrd. Doç. DR. Eda AVANOĞLU SICACIK\_\_\_\_\_

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

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

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

Doç. Dr. Erdem Kamil YILDIRIM  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ÖZET

### CAM ELYAF DONATILI KIRIŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞININ SONLU ELEMENLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

KARTAL, Saruhan

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Eda AVANOĞLU SICACIK

Kasım 2014, 57 sayfa

Çelik donatıların korozyonu betonarme elemanlarda en önemli problemlerden biridir. Bu, elemanın servis performansını ve durabilesini azaltmaktadır. Lif takviyeli polimerler korozyona dayanıklı, yüksek çekme dayanımına sahip, hafif ve yalıtkan olmaları nedeniyle çelik donatılara iyi bir alternatif olabilirler. Buna karşın FRP donatıların elastisite modüllerinin düşük olması nedeniyle FRP donatılı betonarme elemanların büyük sehimler yaptığı ve göçmeye kadar doğrusal gerilme-birim şekil değiştirme davranışı sergilediği gösterilmiştir.

Bu çalışmada cam elyaf (GFRP) donatılı betonarme kirişlerin eğilme davranışı ve sünekliği Ansys Sonlu Elemanlar Programı ile araştırılmıştır. Analiz için deneysel çalışma verileri kullanılmıştır. Çalışmada ½ ölçekli dikdörtgen kesitli betonarme kirişler modellenmiştir. Modellenen kirişler 150 mm genişliğe, 300 mm derinliğe 3m uzunluğa sahiptir. Tüm kirişler aynı basınç donatısına sahip ve dört nokta eğilme altında test edilmiştir. GFRP çekme donatı miktarı, çalışmanın ana parametresi olarak kullanılmıştır. Çalışmanın amacı hibrit kirişlerin sehim değerlerini azaltarak ve sünekliğini sağlayarak gerçek davranışlarını modelleyebilmektir. Çalışma sonunda sonlu eleman modelleri ile deney numuneleri arasında yakın yük-deplasman davranışları ve yük taşıma kapasiteleri elde edilmiştir. GFRP donatı oranının artmasıyla yük taşıma kapasitesi ve sehim değerlerinde artış gözlemlenirken, çelik donatı oranının artmasıyla süneklikte ve eğilme rijitliği değerlerinde artış gözlemlenmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Betonarme kiriş, eğilme, süneklik, cam elyaf donatı, çekme donatısı, sonlu elemanlar analizi, ANSYS.

## **ABSTRACT**

### **ANALYSING THE FLEXURAL BEHAVIOUR OF GFRP REINFORCED BEAMS WITH FINITE ELEMENT METHOD**

KARTAL, Saruhan

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering, M. Sc. Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Eda AVANOĞLU SICACIK

November 2014, 57 pages

Steel corrosion is one of the most important problem in reinforced concrete members. It reduces serviceability performance and durability of the element. Fiber reinforced polymers (FRPs) are able to be good alternative to steel reinforcement due to their great corrosion resistance, high tensile strength, low self weight and good non-magnetization properties. On the other hand, it was shown that concrete members reinforced with FRP bars exhibit large deflection and linear stress-strain response up to failure because of their low elastic modulus.

In this study the flexural behavior and ductilities of reinforced concrete (RC) beams with GFRP bars were investigated by using ANSYS Finite Element Program. For analyses the experimental study's datas were used. ½ scale rectangular reinforced concrete beams were modelled. The modal specimens had 150 mm width, 300 mm depth and 3 m length. All the specimens had the same compression reinforcement and they were all loaded under four point bending tests. The amount of tensile GFRP bars were main parameter of the study. The aim of the study is to be able to model the real behavior of these hybrid beams by minimizing the deflection and providing the ductility. At the end of the study it was achieved that the close load-displacement behavior, and load carrying capacity between finite element models and experimental specimens. It was observed that higher ultimate loading capacity and deflection by

increasing GFRP bars ratio and higher ductility and flexural rigidity by increasing steel bars ratio.

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

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım 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. Eda AVANOĞLU SICACIK ve yine her konuda yardımlarını esirgemeyen çok değerli Sayın Yrd. Doç. Dr. Őule BAKIRCI ER ve Sayın Yrd. Doç. Dr. İlker KALKAN hocalarıma teőekkürü bir borç bilirim.

Hayatın getirdiği bütün zorluklar karşısında dik duruőlarıyla her zaman bana örnek olan ve daima yardımına koőan çok değerli aileme teőekkürü bir borç bilirim.

Çalıőmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Arő. Gör. Nalan KAYA'ya, yine bu süreçte fedakarlıklarla yardımlarını esirgemeyen çok değerli arkadaşlarım Mehmet YAZ ve Özkan ÖZKAYA'ya, ayrıca maddi ve manevi her konuda yardımını esirgemeyen dostum Arő. Gör. Akın DUVAN'a teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	v
<b>İÇİNDEKİLER DİZİNİ</b> .....	vi
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	viii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	x
<b>SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xi
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Literatür Özetleri .....	3
<b>2. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ</b> .....	9
2.1. Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Önemli Terimler .....	9
2.2. Sonlu Elemanlar Metodu Hesap Basamakları .....	10
2.3. Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Eleman Tipleri .....	11
2.4. Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantajları .....	12
2.5. Sonlu Elemanlar Yönteminin Dezavantajları .....	12
<b>3. ANSYS SONLU ELEMANLAR PROGRAMI</b> .....	13
3.1. ANSYS Yazılımında Main Menü .....	13
3.2. ANSYS ile Analizin Adımları .....	15
3.2.1. Model Geometrisinin Oluşturulması .....	16
3.2.2. Malzeme Özelliklerinin Girilmesi .....	17
3.2.3. Eleman Seçimi .....	17
3.2.3.1. Solid65 Elemanı .....	17
3.2.3.2. Link180 Elemanı .....	18
3.2.4. Modelin Sonlu Eleman Ağının Oluşturulması .....	19
3.2.5. Sınır Şartların Düzenlenmesi .....	19
3.2.6. Yükleme ve Analiz.....	19
<b>4. MODELLEMESİ YAPILAN KİRİŞLERİN TANITILMASI</b> .....	24



4.1. Kirişlerin Tanıtılması .....	24
4.2. Deney Düzeneği .....	29
4.2.1. Yükleme Düzeni .....	30
<b>5. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DAVRANIŞLARI.....</b>	<b>32</b>
5.1. Betonun Mekanik Özellikleri .....	32
5.1.1. Beton Basınç Dayanımı .....	33
5.1.2. Beton Çekme Dayanımı .....	34
5.1.3. Betonun Elastisite Modülü .....	34
5.1.4. Poisson Oranı .....	37
5.2. Çelik Donatının Özellikleri .....	39
5.3. GFRP Donatının Özellikleri .....	41
5.4. Modelleme Sırasında Yapılan Kabuller .....	42
<b>6. ANALİZ SONUÇLARI İLE DENEYSEL ÇALIŞMANIN</b>	
<b>KARŞILAŞTIRILMASI.....</b>	<b>43</b>
6.1. S1 (S5G0) Elemanı .....	43
6.2. S2 (S4G1) Elemanı .....	44
6.3. S3 (S3G2) Elemanı .....	45
6.4. S4 (S2G3) Elemanı .....	46
6.5. S5 (S1G4) Elemanı .....	47
6.6. S6 (S0G5) Elemanı .....	48
<b>7. SONUÇLAR .....</b>	<b>52</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>54</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Ansys Penceresi .....	13
3.2. Ansys Yazılımında Main Menu .....	14
3.3. Ansys Sonlu Elemanlar Programı ile Analizin Adımları.....	16
3.4. Solid65 Elemanı .....	18
3.5. Kiriş Yükleme Düzeni .....	20
3.6. Kirişte Yüklemenin Modellenmesi .....	20
3.7. Von Mises İki Eksenli Gerilme Durumu .....	23
4.1. Deneysel Elemanlarının En Kesitleri .....	24
4.2. S1 (S5G0) Elemanı Detay Çizimi.....	25
4.3. S2 (S4G1) Elemanı Detay Çizimi.....	25
4.4. S3 (S3G2) Elemanı Detay Çizimi.....	26
4.5. S4 (S2G3) Elemanı Detay Çizimi.....	26
4.6. S5 (S1G4) Elemanı Detay Çizimi.....	27
4.7. S6 (S0G5) Elemanı Detay Çizimi.....	27
4.8. Yükleme Çerçevesi ve Deneysel Düzeneği.....	31
4.9. Yük-Ölçüm Sistemi.....	31
5.1. Beton Elastisite Modülü Hesabında Kullanılan Yöntemler .....	35
5.2. Kachlakef Beton Modeli .....	36
5.3. Beton Modeli için Gerilme-Birim Şekil Değişirme Değerleri.....	36
5.4. Betonun Elastisite Modülü ve Poisson Oranı .....	37
5.5. Beton için Diğer Parametreler.....	39
5.6. Çelik Donatı için Gerilme Birim Şekil Değişirme Grafiği .....	40
5.7. Çelik Donatının Elastisite Modülü ve Poisson Oranı .....	40
5.8. GFRP Donatının Elastisite Modülü ve Poisson Oranı .....	41
5.9. GFRP Donatı için Gerilme Birim Şekil Değişirme Grafiği.....	41
6.1. S1 Elemanı Yük-Sehim Grafikleri .....	43
6.2. S2 Elemanı Yük-Sehim Grafikleri .....	44
6.3. S3 Elemanı Yük-Sehim Grafikleri .....	45

6.4.	S4 Elemanı Yük-Sehim Grafikleri .....	46
6.5.	S5 Elemanı Yük-Sehim Grafikleri .....	47
6.6.	S6 Elemanı Yük-Sehim Grafikleri .....	48
6.7.	Tüm Kirişlerin Nümerik Yük-Sehim Grafikleri .....	49

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### ÇİZELGE

	<u>Sayfa</u>
4.1. Deney Elemanlarında Kullanılan Donatıların Çekme Dayanım Değerleri...	28
4.2. Deney Elemanlarının Özellikleri .....	28
5.1. Deney Elemanlarında Kullanılan Betonun Basınç Dayanım Değerleri.....	33
6.1. Deneysel ve Nümerik Çalışmaların Nihai Yük Değerleri.....	50
6.2. Deneysel ve Nümerik Yük-Sehim Grafiği Başlangıç Rijitlikleri .....	51

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER DİZİNİ

$\{F\}$	Yük vektörü
$[k]$	Rijitlik matrisi
$\{d\}$	Yer değiştirme vektörü
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Beton basınç gerilmeleri
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Asal gerilmeler
$\sigma_y$	Akma gerilmesi
$\phi$	Donatı çapı
$f_{yk}$	Donatı akma dayanımı
$f_u$	Donatı kopma dayanımı
$f_c$	Beton basınç dayanımı
$f_{ctk}$	Beton karakteristik eksenel çekme dayanımı
$E_c$	Beton elastisite modülü
$\varepsilon$	Betonun birim Şekil değiştirmesi
$\varepsilon_0$	Betonun maximum gerilmesine karşılık gelen birim Şekil değiştirme
$f$	Beton modelinde gerilme
$P_{ud}$	Deneysel olarak bulunmuş maksimum yük
$P_{un}$	Nümerik çalışmadan bulunmuş maksimum yük

### KISALTMALAR DİZİNİ

FRP	Lif takviyeli polimer
GFRP	Cam lif takviyeli polimer
FE	Finite Element
CFRP	Karbon lif takviyeli polimer

AFRP	Aramid lif takviyeli polimer
LVDT	Elektronik deplasman ölçer
S	Çelik donatı
G	Cam elyaf donatı
FACM	Fixed Angle Crack Model

## 1. GİRİŞ

Betonarme ülkemizde kullanılan en yaygın yapı türüdür. 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].

Liman, iskele, köprü, tünel, otopark, çok katlı yapılar ve benzeri yapılarda donatıların paspayı ile yeterince korunamaması, donma çözülme etkisi ile paspayının dökülmesi, deniz suyu gibi çevresel faktörlere maruz kalmaları neticesinde donatı korozyona uğramaktadır.

Korozyon; betonarme yapılarda yapı ömrünü kısaltması, yapı güvenliğini tehdit etmesi ve sık tadilat gerektirmesi nedenleri ile betonarme çeliğine alternatif malzemelerin kullanılması ihtiyacını doğurmuştur. Lif takviyeli polimerler (FRP), yüksek çekme ve korozyon dayanımına sahip kompozit malzemeler olmaları nedeni ile çelik donatıya alternatif olarak düşünülmektedir.

İnşaat sektöründe son yıllarda lif takviyeli polimerlerin (FRP) kullanımı hızla artmaktadır. Cam lifler, karbon lifler, çelik lifler ve aramid lifler sektörde kullanılan başlıca kompozit malzemelerdir. Bu malzemeler donatı, profil ve güçlendirme malzemesi olarak tercih edilmektedir.

FRP donatısının üstün özelliklerine karşılık FRP donatısı gevrek kırılma gösteren bir malzemedir. Ayrıca elastisite modülü çeliğinkinden daha düşüktür. Çelik yerine, FRP donatı kullanılan betonarme elemanlarda; geleneksel betonarmeye göre daha büyük çatlak genişlikleri, daha fazla sehim ve daha büyük eğilme dayanımı elde edileceği düşünülmektedir. FRP donatılı yapı elemanlarında beklenen gevrek kırılmadan dolayı, genellikle servis sınır durumu belirleyici parametre olmaktadır. Mevcut FRP donatıların kullanıldığı betonarme elemanların eğilmede göçmesine, betonun ezilmesi veya FRP donatısının kopması hakim olmaktadır. Göçme modları

gevrekler ve denge altı donatı oranına sahip betonarme kirişlerin davranışından farklıdır [2].

FRP'nin donatı olarak kullanılması çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Yapılan bir çalışmada, nihai yük değerinde FRP donatılı kirişlerin buna tekabül eden çelik donatılı kirişlere göre 3 kat fazla sehim yaptığı belirlenmiştir [3]. Farklı bir çalışmada ise FRP donatısının akmadan çekme kapasitesine ulaştığı ve kirişlerde istenmeyen ani göçmenin meydana geldiği yani gevrek kırıldığı gözlemlenmiştir [4]. Günümüzde FRP donatısıyla birlikte çelik donatının da kullanılmasının daha iyi sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

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, üretiminin 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 [5]. İnşaat sektörünün ihtiyaçları göz önünde bulundurularak yukarıda belirtilen özellikler düşünüldüğünde cam elyaf donatılar çelik donatılara iyi bir alternatif olabilir. Ancak cam elyaf donatıların gevrek kırılma göstermeleri ve fazla sehim yapmaları bu malzemenin en önemli dezavantajlarıdır.

Bu çalışmada Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünün Yapı Mekaniği Laboratuvarında deneyleri yapılmış 6 adet kirişin eğilme altındaki davranışları ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak incelenmiştir [6]. Çalışma kapsamında kirişler tamamı çelik donatılı, tamamı cam elyaf donatılı ve her iki donatının farklı sayı ve dizilimleri ile oluşturulmuş hibrit numunelerden oluşmaktadır. Cam elyaf donatılı kirişlerin davranışını sünekleştirmek ve servis yükleri altındaki sehimlerini sınırlandırabilmek amacı ile hibrit donatılı kirişler tercih edilmiştir. Sayısal modelden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlar ile uyum içinde olduğu görülmüştür.



## 1.1. Literatür Özetleri

Denvid Lau ve Hoat Joen Pam [7], FRP donatılarının gevrek davranışlarının kiriş sünekliğini önemli ölçüde azaltması nedeniyle çalışmalarında hibrit kirişlere de yer vermişlerdir. Çalışma kapsamında tamamı çelik donatılı, tamamı FRP donatılı ve her iki donatının kullanılmasıyla elde edilmiş toplam 12 adet kiriş hazırlanıp test edilmiştir. Hibrit kirişlerin, tamamı FRP donatılı kirişlere göre davranışının daha sünek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca tamamı FRP donatılı kirişlerden denge üstü donatılı olanların daha sünek davranış gösterdikleri belirtilmiştir.

Hyo-Seon Ji ve arkadaşları [8], çekirdeği GFRP ızgara ve çelik kutulardan oluşan, çekirdeği GFRP plakalarla çevrili hibrit köprü tabliyelerinin statik ve yorulma performansı üzerinde çalışmışlardır. Deneysel çalışma ile ANSYS sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlar kıyaslanmıştır. Hibrit köprü tabliyesinin, tamamı GFRP elemanlardan oluşan köprü tabliyesi ile kıyaslandığında daha rijit olduğu, daha fazla burkulduğu ve maliyetinin daha düşük olduğu belirtilmiştir. Ayrıca hibrit köprü tabliyesinin çelik boruların akma göstermeleri nedeni ile daha avantajlı olduğu düşünülmüştür.

D. Hu ve M. Barbato [9], yaptıkları çalışmada mevcut sonlu eleman modelini, yalnızca aksenal yüke ve hem aksenal yüke hem de yatay kuvvete maruz kalan FRP sargılı dairesel kolonların nihai yük taşıma kapasitesi tahmininde kullanmışlardır. Nümerik sonuçlar ile deneysel sonuçlar literatürden elde edilmiş veriler temel alınarak kıyaslanmıştır. Deneysel sonuçlar ile nümerik sonuçlardan elde edilen yük-sehim değerleri ve azami dayanım değerleri arasında iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir.

G. Sakar ve arkadaşları [10], tekrarlı yüklemeler altında kesme donatısı yetersiz kirişlerin, GFRP çubuklarla dıştan güçlendirilmesini nümerik ve deneysel olarak çalışmışlardır. Çalışma kapsamında 5 adet konsol kirişin sonlu eleman modeli, farklı çapta GFRP donatılar kullanılarak ve donatılar arası farklı mesafeler bırakılarak oluşturulmuştur. Tüm kirişlerde, kırılma gerçekleşinceye kadar yükleme safhasının

her anında ölçülmüş ve tahmin edilmiş yük-sehim değerleri arasındaki farkın %10'u geçmediği tespit edilmiştir. Ayrıca sonlu eleman modelinin kiriş davranışını doğru tahmin ettiği görülmüştür. GFRP çubuklarla güçlendirilmiş kirişler kontrol kirişi ile kıyaslandığında sünekliğin ve sehim değerlerinin önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Nihai yük seviyesinde, güçlendirilmiş kirişlerdeki sehim değerlerinin güçlendirme yapılmamış kontrol kirişi sehim değerinden %112 ile %172 arasında daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Qing-Sheng Yang ve arkadaşları [11], yapı elemanlarının güçlendirilmesinde kullanılan FRP plaka ile sarılmış bir kolonun analitik modelini oluşturmuş ve yüzeyler arası gerilmeler üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada FRP plaka ve beton malzemeler elastik modellenmiş ayrıca FRP plakalar ile beton arasında tam aderans kabulü yapılmıştır. Çalışmada kullanılan farklı tipte FRP plakalar için FRP elastisite modülünün beton elastisite modülüne oranları parametre olarak kullanılmıştır. Bu oranın ve FRP kalınlığının artması yüzeyler arası kesme gerilmesinde önemli derecede artış meydana getirdiği belirtilmiştir.

A. Buyukkaragoz, I. Kalkan ve J. H. Lee [12], AFRP donatılı betonarme kirişlerin eğilme davranışlarını değerlendirebilmek için analitik ve nümerik çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Kirişlerin analizi sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada kirişlerin yük-sehim davranışlarını ve servis yükü-sehimlerini tahmin edebilen 2 farklı efektif atalet momenti formülü kullanılmıştır. Sonlu eleman modelinden ve efektif atalet momenti ifadelerinden elde edilen servis yükü-sehim değerleri arasında iyi bir uyum gözlemlenmiştir. FRP donatılı kirişlerin eğilme rijitliğindeki ani düşüşleri betonun ezilmesinden dolayı nadiren tahmin edebilen nümerik analizler, sehim değerlerini oldukça iyi tahmin etmiştir.

Lijuan Li ve arkadaşları [13], yaptıkları çalışmada farklı tipte fiber donatılı kirişlerin farklı tiplerde fiber levhalar ile güçlendirilmesini analiz etmişlerdir. Kirişlerin birinci grubu donatısız, ikinci grubu polipropilen fiber donatılı, üçüncü grup ise polipropilen ile birlikte çelik fiber donatılı olarak tasarlanmıştır. Güçlendirme ise yalnız CFRP levhalarla, yalnız GFRP levhalarla ve her iki levhanın birlikte kullanılmasıyla

gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve nümerik çalışmadan elde edilen sonuçlara göre polipropilen ve çelik fiberlerin mikro çatlak yayılımını kontrol altına aldığı ayrıca GFRP ve CFRP levhaların kirişlerin eğilme kapasitelerini ve betonun tokluğunu artırdığı gözlemlenmiştir.

Rami A. Hawileh [14], yaptığı çalışmada dört nokta eğilmeye maruz kalan dıştan FRP ile güçlendirilmiş kirişlerin sonlu eleman modelini oluşturmuştur. Nümerik çalışmadan elde edilen sonuçlar, farklı araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiş deneysel çalışma sonuçları ile kıyaslanmıştır. Deneysel ve nümerik çalışmadan elde edilen orta açıklık sehim değerleri yükleme boyunca uyum göstermiştir.

Damian Kachlakev ve arkadaşları [15], yaptıkları çalışmada ANSYS programını kullanarak Horsetail Creek Köprüsünün enine kirişlerinin 4 adet sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. İlk model güçlendirmesiz, ikinci model CFRP plakalarla eğilmeye karşı güçlendirilmiş kiriş, üçüncü model GFRP plakalarla kesmeye karşı güçlendirilmiş kiriş, son model ise CFRP ve GFRP'nin birlikte kullanıldığı kesmeye, eğilmeye karşı güçlendirilmiş kiriş olarak tasarlanmıştır. Nümerik ve deneysel çalışma sonuçlarına göre orta açıklıktaki sehim değerlerinin uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Sonlu elemanlar metodu ile elde edilmiş nihai yük değerlerinin deneysel çalışmadan elde edilmiş değerlerden %5-%24 oranında daha düşük çıktığı belirtilmiştir.

Fatih Cullazoğlu [16], yaptığı çalışmada deneyleri önceden yapılmış farklı tipte FRP donatılı kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışını bilgisayar programı aracılığı ile analiz etmiştir. Ayrıca, hibrit FRP-çelik donatılı kirişlerin eğilme etkisi altındaki analizlerini gerçekleştirmiştir. Hibrit kirişlerdeki donatı oranının ve FRP donatısı tipinin kirişlerin davranışları üzerine olan etkisini araştırmıştır. Sonuçlar, hibrit donatılı kirişlerin FRP donatılı kirişlerle kıyaslandıklarında sünekliğin ve rijitliğin hibrit donatılı kirişlerde daha fazla olduğunu göstermiştir.

Günnur Yavuz [17], yaptığı çalışmada FRP malzemelerin betonarme elemanlarda donatı olarak kullanımı ile ilgili bilgiler sunmuştur. Çalışmada aynı boyut ve farklı donatı tiplerine sahip dört betonarme kiriş elemanına ait moment-eğrilik davranışları

ile moment taşıma kapasitesinin teorik olarak hesaplanmasından elde edilmiş sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen moment-eğrilik grafiklerinden çelik, GFRP, CFRP ve AFRP donatılı kesitler için moment taşıma kapasiteleri elde edilmiştir. En yüksek moment taşıma kapasitesinin CFRP donatılı kirişe, en düşük moment taşıma kapasitesinin ise çelik donatılı kirişe ait olduğu tespit edilmiştir. En sünek davranış geleneksel çelik donatılı kirişte gözlemlenirken, FRP donatılı kirişlerin yük-sehim grafiklerinin lineere yakın olduğu gözlemlenmiştir.

A.F. Ashour [18], yaptığı bu çalışmada cam elyaf donatılı 12 adet betonarme kirişi dört noktalı eğilmeye tabi tutarak test etmiştir. Hazırlanan kirişlerde kesme donatısı ve basınç donatısı kullanılmamıştır. Kirişler beton basınç dayanımına göre iki gruba ayrılmıştır. Çalışmada kiriş derinliği ve cam elyaf donatı oranı esas parametreler olarak seçilmiştir. Testlerde eğilme ve kesme göçme modları gözlemlenmiştir. Testi gerçekleştirilmiş kirişlerin eğilme ve kesme kapasitelerinin hesaplanmasında basitleştirilmiş metodlar kullanılmıştır. Teorik sonuçlar ile deneysel sonuçlar eğilme kapasiteleri açısından uyum göstermiştir. Ancak test edilen kirişlerin kesme kapasiteleri tahmininde kullanılan son yıllarda geliştirilmiş dört yöntemin kesme kapasitesi tahminlerinde başarılı olmadığı ve bu nedenle GFRP donatılı betonarme kirişlerin kesme kapasitelerinin hesaplanmasında rasyonel metod oluşturmak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu belirtilmiştir.

C. Barris ve arkadaşları [19], yaptıkları çalışmada FRP donatıların betonarme elemanlarda kullanımının çelik donatının korozyonuna alternatif olarak ortaya çıktığını düşünmüşlerdir. Bu doğrultuda yüksek elastisite modülüne sahip cam elyaf donatılarla ilgili deneysel bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada donatı ve etkili derinlik-yükseklik oranları değişken olarak kullanılmış olup bu parametrelerin kirişlerin kısa zaman eğilme davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır. Yönetmelik formülasyonları ve diğer tahmin modelleri servis ve nihai limit durumları göz önünde bulundurularak incelenmiş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, kirişlerde servis yüküne kadar davranışın iyi uyum gösterdiğini ancak yük taşıma kapasitesi tahminlerinin deneysel sonuçlardan daha düşük çıktığını göstermiştir.

Dong-Uk Choi ve arkadaşları [20], çalışmalarında GFRP donatıların, etriyesiz köprü döşemelerinde çelik donatıların korozyonundan kaçınmak için kullanılabileceği belirtmişlerdir. Çalışma kapsamında ekli (bindirmeli) GFRP donatıların aderans dayanımlarının belirlenmesi amacıyla 35 adet etriyesiz kiriş ve döşemenin eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney değişkenleri olarak ek boyu, kabuk kalınlığı ve donatı aralığı seçilmiştir. İlaveten GFRP donatılı kirişlerin aderans dayanımları ile karşılaştırmak için dört adet çelik donatı bindirmeli kiriş hazırlanıp, test edilmiştir. Sonuçlar, GFRP donatılı kirişlerin aderans dayanımlarının çelik donatılı kirişlerin aderans dayanımlarından daha düşük olduğunu ortaya koymuştur.

C. Mias ve arkadaşları [21], yaptıkları çalışmada sekiz adet cam elyaf donatılı betonarme kiriş servis yükü seviyesinde 250 gün boyunca tekrarlı yüklemeye maruz bırakmışlardır. Çalışmada iki donatı oranı ve iki farklı yük seviyesi dikkate alınmıştır. Deneysel sonuçlar yükleme-boşaltma işlemlerinin ve donatı oranının, kısa ve zamana bağlı deformasyonlar üzerine etkisini ortaya çıkarmıştır. Ayrıca farklı teorik tahmin yöntemleri kullanılarak elde edilen sonuçlar da deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. ACI 440.1 R-06' da verilen geliştirilmiş zamana bağlı faktörü ile Biscoff'un ani sehimleri hesaplayan geliştirilmiş denkleminin sehim tahmininde deneysel sonuçlarla en iyi uyumu gösterdiği belirtilmiştir.

S. H. Alsayed [22], yaptığı çalışmada 12 adet GFRP donatılı veya çelik donatılı kirişlerin tahmin edilen ve ölçülen yük-deformasyon ilişkilerini karşılaştırmıştır. Çalışmanın nümerik kısmını i) Kompozit bileşenlerin gerçek özelliklerini hesaba katan bilgisayar modeli geliştirerek ii) ACI yük-sehim modeli oluşturarak iii) Literatürde mevcut lif takviyeli polimer çubuklarla donatılmış kirişlerin geliştirilmiş yük-sehim modeli oluşturarak gerçekleştirmiştir. Kirişlerin tasarımında deformasyon limiti ve betonun nihai dayanımı kontrol parametreleri olarak kullanılmıştır. Bilgisayar modeli servis ve nihai yük-deformasyon eğrilerinin doğru tahminini sağlamıştır. Servis yük-deformasyon ve nihai eğilme dayanımı tahminindeki sapmalar sırasıyla %10 ve %1'den az bulunmuştur. ACI modelinde servis yük-deformasyonundaki sapmalar %70'e kadar çıkarken, geliştirilmiş modelde ise %15 ten daha az olduğu belirtilmiştir.

Nawy ve arkadaşları [23], yaptıkları çalışmada farklı GFRP donatı oranlarına sahip 20 kirişin davranışlarını incelemiştir. Kirişler arasında çatlak gelişimi, sehim, donatı gerilmesi ve nihai yük değerleri kıyaslanmıştır. Kirişlerde donatılarda kopma meydana gelmeden önce betonda ezilme tespit edilmiştir.

Nakano ve arkadaşları [24], yaptıkları çalışmada aramid fiberli, karbon fiberli ve nervürlü çelik donatılar kullanmışlardır. Donatı oranının ve donatı elastisite modülünün artmasıyla ilk çatlak sonrası eğilme rijitliğinin arttığı belirtilmiştir.

R.A. Hawileh [25], yaptığı çalışmada daha önceden testi gerçekleştirilmiş çelik ve AFRP donatılı altı hibrit kirişin yük-sehim davranışlarını karşılaştırabilmek için sonlu eleman modeller oluşturmuştur. Ayrıca AFRP donatı çapının, FRP malzeme tipinin beton basınç dayanımının, aderans dayanımının etkisini analitik araştırmak için 15 model daha oluşturmuştur. Deneysel çalışma ve analiz sonuçları kıyasladığında yük-sehim grafikleri arasında iyi bir uyum gözlemlenmiştir. Sonlu eleman modellerindeki beton ile donatı arasındaki aderans dayanımının deneysel çalışmadan elde edilmiş aderans dayanımından daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. AFRP donatı çapının artmasıyla yük taşıma kapasitesinin arttığı ancak süneklikte azalma olduğunu tespit edilmiştir. CFRP donatı ve çelik donatının birlikte kullanıldığı kirişlerin diğer kirişlere göre daha yüksek performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Beton basınç dayanımının hibrit kiriş performansına az da olsa katkısının bulunduğu belirtilmiştir.

Aiello and Ombres [26], AFRP ve çelik donatı kullanarak oluşturdukları hibrit kirişlerin eğilme performansını deneysel olarak çalışmışlardır. Çalışmada parametre olarak donatı yerleşimi ve donatı oranı seçilmiştir. Hedeflenen dayanıma ve sünekliğe ulaşılmıştır. Hibrit kirişlerde çatlak genişliğinin ve derinliğinin FRP donatılı kirişlerdeki oranla daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

## 2. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Sonlu Elemanlar Yöntemi, sayısal bir yöntem olup çeşitli mühendislik problemlerinin kabul edilebilir bir yaklaşımla çözümü için geliştirilmiştir. Birçok mühendislik problemi için analitik çözüm yapmak problemin yapısı, malzeme özellikleri ve sınır şartları açısından zordur. Bu sebeple bu problemlerin çözümünde sayısal ve deneysel yöntemlere başvurulmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi yapıyı ya da yapı elemanını sonlu elemanlara parçalayarak modellemektir. Mühendisliğin birçok dalında kullanılmaktadır. Mekanik, akışkanlar mekaniği, ısı transferi, elektromanyetizma, lineer ve lineer olmayan durumlar için gerilme analizi, şekil değiştirme analizi, havacılık, otomotiv gibi [27,28].

### 2.1. Sonlu Elemanlar Yönteminde Kullanılan Önemli Terimler

**Eleman:** Sürekli ortamın ayrıldığı basit geometrik şekilli parçalardır.

**Düğüm noktası:** Elemanların birbiriyle kesişim noktalarıdır. Düğüm noktaları, alan probleminin bilinmeyenlerinin indirgendiği sonlu sayıda bilinmeyen sayısal olarak çözüldüğü fiziksel noktalardır.

**Serbestlik Derecesi:** Bir düğüm noktasında elemanın yapabileceği yer değiştirme vektörünün bileşen sayısı olarak tanımlanır. Bir elemanın tüm düğüm noktalarındaki serbestliklerinin toplamı ise o elemanın serbestlik derecesi olarak tanımlanır. Düğüm noktalarındaki serbestliklerin sayısı problemin boyutuna göre değişmektedir. İki boyutlu elemanlarda, her düğüm noktasında yatay, düşey yönde yer değiştirmeler ve düzleme dik yönde dönme ile birlikte toplam üç serbestlik vardır. Üç boyutlu elemanlarda ise her düğüm noktasında yatay, düşey, düzleme dik yönde yer değiştirmeler ve yine yatay, düşey, düzleme dik dönmeler ile birlikte toplam altı serbestlik vardır.

## 2.2. Sonlu Elemanlar Metodu Hesap Basamakları

Sonlu elemanlar yöntemiyle bir problemin çözümündeki hesap basamakları şu şekilde sıralanabilmektedir.

1. Sonlu elemanlar metodunda ilk basamak sürekli ortamın elemanlara bölünmesi yani sonlu elemanlara ayırmaktır. Bu ayırımında uygun sonlu elemanlar kullanılmalı, elemanların cinsi, sayısı ve düzeni tespit edilmelidir. Analiz sonuçlarının gerçeğe en yakın olabilmesi için mesh etme işleminde mümkün olduğunca çok sayıda eleman kullanılması gerekmektedir. Ancak belirli bir değerden sonra mesh yoğunluğunu artırmak sonuçları etkilememektedir. Sonuçların hassaslığı için elemanlara bölme işlemi dikkatle yapılmalı, gerekli olduğu durumlarda da mesh işlemi tekrarlanmalıdır.

2. Sistemin elemanlara bölünmesinden sonra sistemin global aksları, düğümlerin serbestlik dereceleri (DOF) ve sınır şartları oluşturulur. Her eleman için lokal eksen takımlarında eleman rijitlik matrisleri hesaplanmaktadır.

3. Elemanların rijitlik matrisleri lokal eksenden sistem global eksenlere çevrilir. Ve global eksen takımında, rijitlik matrisleri her bir düğüm noktasına bağlanan elemanlar göz önüne alınarak birleştirilir ve sistemin global rijitlik matrisi oluşturulur.

4. Elemanların yükleri düğüm noktalarına aktarılır global yük vektörü oluşturulur  $\{F\}$ . Sürekli ortamın sınır şartları dikkate alınarak sistem için Eşitlik 2.1 yazılarak deplasmanlar hesaplanır. Deplasmanlar hesaplandıktan sonra gerilme ve şekil değiştirmeler hesaplanabilir. Hesaplanan yer değiştirmeler düğüm noktalarına aittir.

$$\{F\}=[k][d] \quad (2.1)$$

$\{F\}$ : yük vektörü

$[k]$ : rijitlik matrisi

$\{d\}$ : yer değiştirme vektörü





## **2.4. Sonlu Elemanlar Yönteminin Avantajları**

Sonlu elemanlar yönteminin avantajları şu şekilde sıralanabilmektedir:

1. Yapı davranışının daha gerçekçi bir şekilde anlaşılması için betonarme yapıların doğrusal olmayan analizlerini çözümleme imkânı sağlar.
2. Kompleks yapılı betonarme sistemlerin şekil ve boyutlarına esneklik kazandırarak analizine olanak sağlamaktadır.
3. Prototip deneyleri ile karşılaştırıldığında, sonlu eleman analizlerinin maliyeti oldukça düşüktür ve zamandan da kazanç vardır.
4. Tasarım aşamasındaki projelerin bilgisayar ortamında simülasyonunun yapılması ile ilerde ortaya çıkabilecek problemler hakkında fikir verebilir.
5. Karmaşık malzeme özellikleri uygulanabilir ve malzemelerin zamana bağlı olarak değişen özellikleri göz önüne alınabilmektedir.

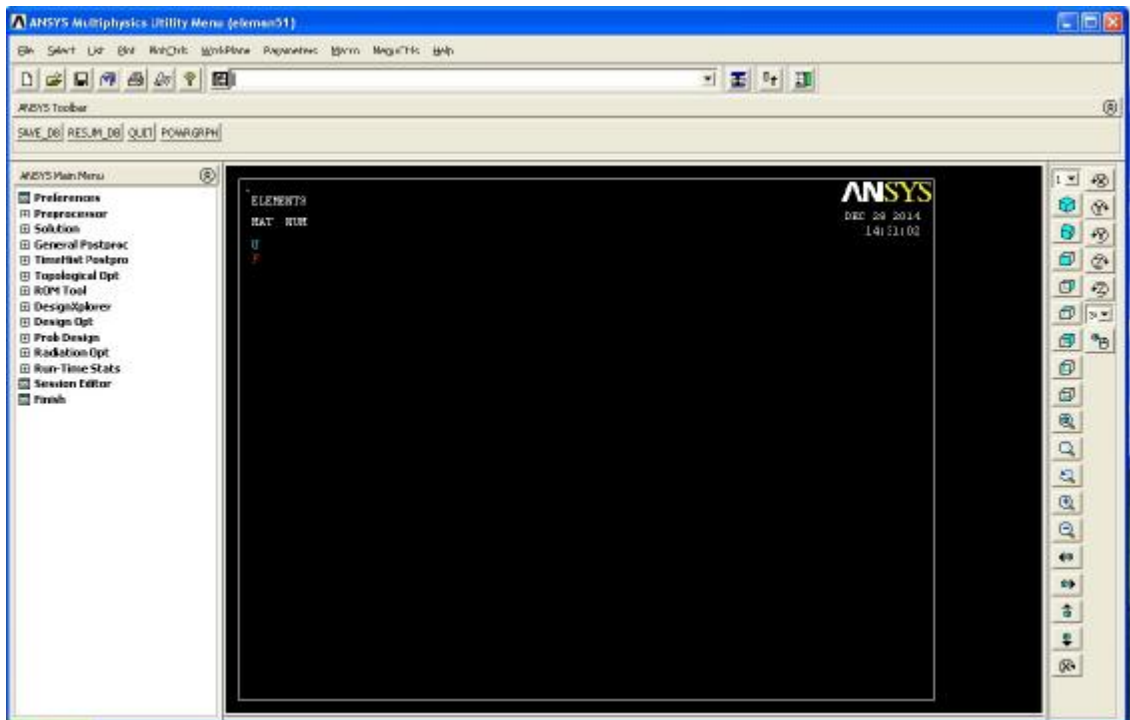
## **2.5. Sonlu Elemanlar Yönteminin Dezavantajları**

Sonlu elemanlar yönteminin dezavantajları şu şekilde sıralanabilmektedir:

1. Malzeme ve geometriye uygun elemanların seçilmemesi durumunda gerçek sonuçlardan sapmalar oldukça fazla olabilmektedir.
2. Bu yöntem ile elde edilen sonucun doğruluğuna dikkat edilmelidir. Ağ yoğunluğunun az tutulması durumunda sonuçlar deneysel sonuçlardan oldukça farklı çıkabilmektedir.
3. Programın çalışması iyi bir donanımın varlığına bağlı olmaktadır. Ayrıca bilgisayar kapasitesinin analizi yapmada yetersiz kalmamasına dikkat edilmelidir.

### 3. ANSYS SONLU ELEMANLAR PROGRAMI

ANSYS çeşitli mekanik problemlerin nümerik çözümünde yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar paket programıdır. Statik ve dinamik çözüm, lineer veya non-lineer yapısal analiz, ısı transferi, akışkanlar problemleri ile akustik ve elektromanyetik problemlerin çözümü bu program ile yapılabilir. Ansys penceresi Şekil 3.1.de görülmektedir.



Şekil 3.1. Ansys penceresi

#### 3.1. ANSYS Yazılımında Main Menü

Ansys programında bu menü ile model üzerinde hemen hemen bütün çalışmalar gerçekleştirilebilir. Preferences, Preprocessor, Solution, General Postproc, TimeHist Postpro gibi alt menülerden oluşturulmuştur. Model geometrisinin oluşturulduğu,

modelle ilgili tüm detay çalışmaların yürütüldüğü ve analizlerin yapılarak sonuçların değerlendirildiği menü Şekil 3.2.de görüldüğü gibidir.



**Şekil 3.2.** Ansys yazılımında main menu

Ana Menüye ait bazı alt menülerin özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

### **Preferences:**

Yapılan modellemede kullanılacak analiz tipi ve analizde kullanılacak yöntemin belirlenmesinde kullanılır.

### **Preprocessor:**

Modelin geometrisinin oluşturulduğu, elemanlara ayrıldığı, malzeme özelliklerinin belirlendiği, sınır şartlarının oluşturulduğu, analiz adımlarında yüklemenin yapıldığı işlemler dahil birçok işlemin yapıldığı menüdür.

**Solution:**

Çözümün yaptırıldığı ayrıca yükleme ve analiz tipi ile ilgili seçimlerin yapıldığı menüdür. Yük ve sınır şartlarının preprocessing kademesinde de tanımlanabilir.

**General Postprocessor:**

Analiz sonuçlarının liste ya da görsel olarak değerlendirildiği menüdür. Modelde istenen noktalara ait gerilme ya da deplasman değerlerine alt menülerinden ulaşılabilir.

**TimeHist Postpro:**

Modelin istenilen bölgelerinde, analiz sonuçlarının elde edildiği menüdür. Bu menüde istenilen sonuçlar time sayacı cinsinden verilmektedir. Gerekli işlemlerden sonra sonuçlar yük cinsinden ifade edilebilir.

**3.2. ANSYS ile Analizin Adımları**

Sonlu elemanlar programı ile analize model geometrisi oluşturularak başlanır. Bu model sonlu sayıda elemana bölünmelidir. Bu elemanlar düğüm noktalarından (node) birbirine bağlanır. Bu elemanların malzeme ve eleman özellikleri tanımlandıktan sonra sınır şartları oluşturulmalı, gerekli noktalara yükler etki ettirilmeli ve analizler yapılmalıdır. Sonlu elemanlar yöntemi düğüm noktalarına bağlı bir yöntemdir. Bu nedenle modele etki ettirilecek yükler düğüm noktalarına uygulanır ve elde edilen gerilme-deplasman değerleri düğüm noktalarına aittir. ANSYS sonlu elemanlar programında analiz adımları Şekil 3.3.de görüldüğü gibi verilebilir.



**Şekil 3.3.** Ansys Sonlu Elemanlar Programı ile analiz adımları

### 3.2.1. Model Geometrisinin Oluşturulması

Analizi yapılacak olan yapı elemanlarının geometrisi oluşturulurken yapı elemanının hangi boyutta modelleneceği önemlidir. İki boyutta çözümün yeterli olduğu analizlerde noktalardan çizgilerin, çizgilerden de alanların oluşturulmasıyla ya da alt menülerden doğrudan alanların oluşturulması ile model geometrisi oluşturulabilir. Üç boyutlu model geometrisi ise alanlar oluşturulduktan sonra alanların derinliği tanımlanarak ya da alt menülerden doğrudan oluşturulabilmektedir.

Çalışma kapsamında kiriş modeli beton paspayı dikkate alınarak birçok hacmin bir araya getirilmesi sonucu oluşturulmuştur. Ayrıca model oluşturulurken donatılar beton içinde dağılı kabul edilmiştir. Bu nedenle donatıların konumuna dikkat edilmiştir.

### **3.2.2. Malzeme Özelliklerinin Girilmesi**

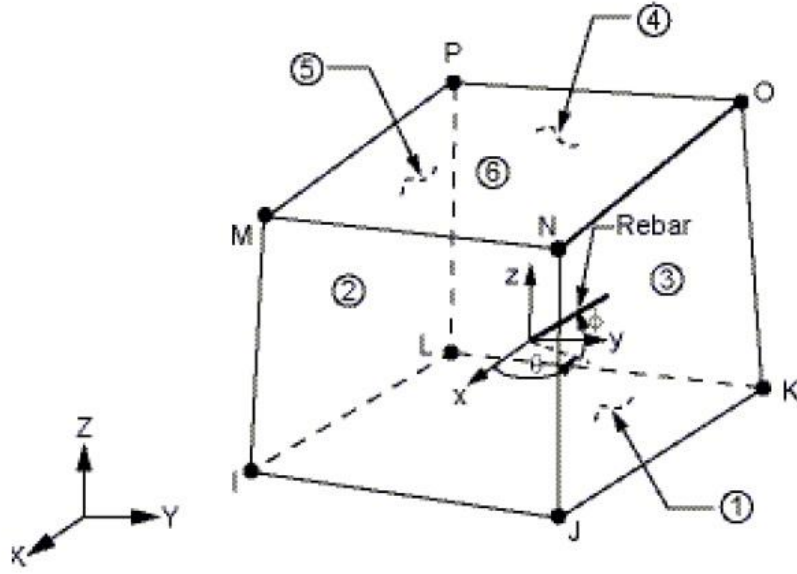
Nümerik yöntemler ile problemlerin çözümünde malzeme özelliklerinin gerçeğe en yakın şekilde girilmesi, çözümün gerçek sonuçlara yakınlığı açısından oldukça önemlidir. Çalışma kapsamında beton, etriye, boyuna çelik ve GFRP donatı özellikleri ayrı ayrı tanımlanmıştır.

### **3.2.3. Eleman Seçimi**

ANSYS programında eleman kütüphanesinde 150'den fazla eleman çeşidi mevcut olup bunlar kiriş, çubuk, kabuk, plak, kontak elemanları vb. sıralanabilmektedir. ANSYS'te beton malzemenin modellenmesi için Solid65 elemanı mevcuttur ve literatürdeki çalışmaların tamamında beton bu elemanla modellenmiştir. Çelik ve cam elyaf donatılar Link180 elemanı kullanılarak modellenmiştir.

#### **3.2.3.1. Solid65 Elemanı**

Solid65 elemanı, betonun üç boyutlu modellenmesinde kullanılan her düğüm noktasında üç yönde serbestliğe sahip 8 düğüm noktalı bir elemandır. Çekmede çatlama, basınçta da ezilme yapabilen Solid65 elemanı Şekil 3.4.dedir.



**Şekil 3.4.** Solid65 elemanı

Bu eleman ile beton hem donatılı hem de donatısız olarak modellenebilmektedir. Elemanın en önemli özelliği non-lineer malzeme davranışına sahip olmasıdır. Böylece betonun üç ortogonal yönde çatlama, ezilme, plastik deformasyon ve sünme davranışları ile donatının da basınç ve çekme altındaki davranışları, plastik deformasyonu ve sünme davranışı modellenebilmektedir.

### **3.2.3.2. Link180 Elemanı**

Link180 elemanı Link8'e benzeyen ancak onun doğrusal olmayan özelliklerinin geliştirilmesiyle programa yeni eklenen elemandır. Çelik donatı çalışma kapsamında akma gerilmesi, elastisite modülü, poisson oranı dikkate alınarak modellenmiştir. GFRP donatı ise lineer-elastik modellenmiştir. Bu iki donatının da modellenmesinde Link180 elemanı kullanılmıştır.



### **3.2.4. Modelin Sonlu Eleman Ağının Oluşturulması**

Fiziksel bir tanım aralığını kendinden daha küçük tanım aralıklarına bölme işlemine mesh etme ya da ağ oluşturma denilmektedir. Burada amaç diferansiyel denklemin çözümünü kolaylaştırmaktır. Sonlu elemanlar yönteminde yapı elemanları elemanın geometrisine uygun şekilde daha küçük elemanlara bölünmektedir. Ağ oluşturma işleminde ağ yoğunluğunun yüksek tutulması sonuçların hassasiyeti açısından önemlidir. Düşük tutulması ise istenilen yük düzeyine ulaşılmamasına neden olabilmektedir. Mesh işlemi sırasında elemanların boyutları arasında farkın fazla olmamasına dikkat edilmelidir [29].

### **3.2.5. Sınır Şartların Düzenlenmesi**

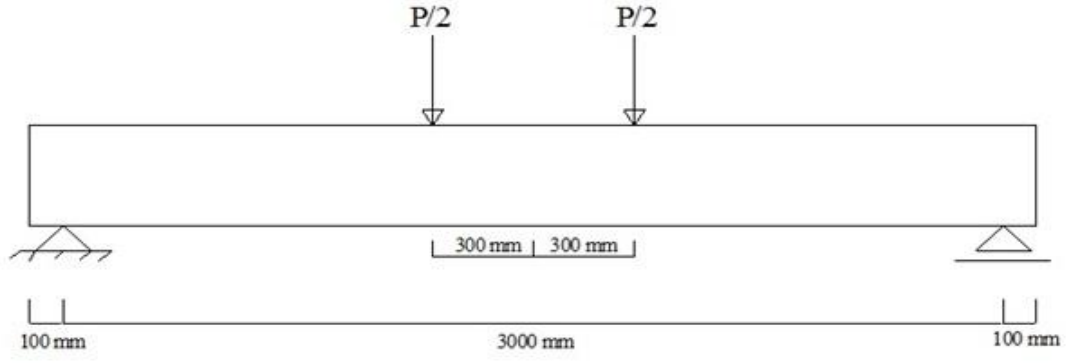
Deneyel çalışmada kirişler bir ucu sabit bir ucu kayıcı (basit) mesnetli olacak şekilde hazırlanmıştır. Kiriş modellenirken bu sınır şartları aynen uygulanmıştır.

### **3.2.6. Yükleme ve Analiz**

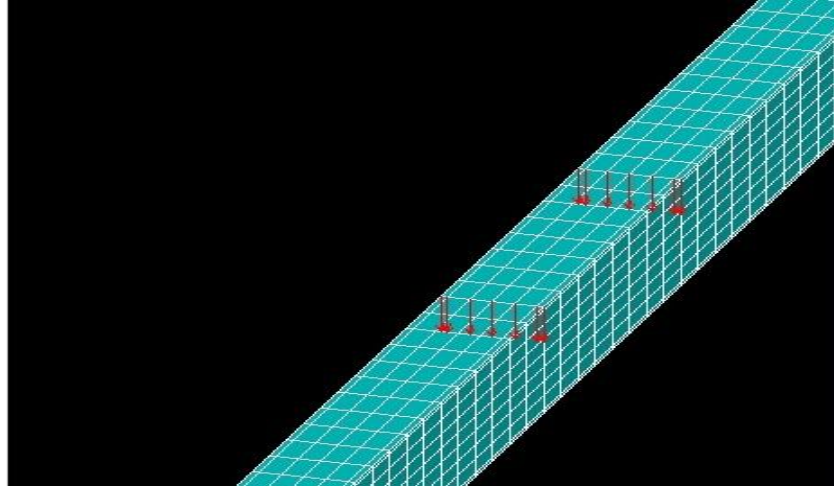
#### **Yükleme:**

Deneyel çalışmada Şekil 3.5.te de görüldüğü üzere yük kirişe, kiriş orta noktasının 300'er mm sağından ve solundan etki ettirilmiştir.

Modellemede yük tek bir noktadan değil de birçok noktadan Şekil 3.6.daki gibi tekil yükler halinde kirişe etki ettirilmiştir. Böylece yükün uygulandığı bölgelerde yerel gerilme artışları nedeniyle oluşabilecek çatlaklar ve yerel göçmeler engellenmiştir.



**Şekil 3.5.** Kiriş yükleme düzeni



**Şekil 3.6.** Kirişte yüklemenin modellenmesi

### **Analiz:**

ANSYS ile yapısal, termal, akışkan ve elektromanyetik olmak üzere çeşitli analizlerin yapılabilmektedir. ANSYS'te yapısal analiz çeşitleri aşağıda verilmiştir.

**1.Statik Analiz:** Statik yükleme durumunda hem lineer hem de non-lineer analiz yapılarak gerilme ve yer değiştirmeler hesaplanmaktadır.

**2.Modal Analiz:** Yapıların ve makinelerin doğal frekanslarını ve titreşim karakterlerini belirlemek için kullanılmaktadır.

**3.Harmonik Analiz:** Yapının harmonik karakterinin farklı zaman-yük durumları için belirlenmesi için kullanılmaktadır.

**4.Geçici Dinamik Analiz:** Atalet ve sönümleme etkisi düşünülerek yapının zamana bağlı yüklenmesi sonucu yapı davranışını belirlemek için kullanılmaktadır.

**5.Spektrum Analizi:** Deprem yükü, okyanus dalgaları ve rüzgar yükü gibi zamana bağlı yükler altında yapı davranışının analizinde kullanılmaktadır.

**6.Burkulma Analizi:** Burkulma yüklerinin ve burkulma şekillerinin tespitinde kullanılmaktadır. Hem lineer hem de non-lineer burkulma analizi yapılabilmektedir.

**7.Explicit Dinamik Analiz:** Kırılma, kopma ve büyük dinamik deformasyonların kısa bir zaman aralığında hızlı bir şekilde çözümü için kullanılmaktadır.

### **Analiz Yönteminin Tespiti**

Betonarme yapılara etkiyen yüklerin zamanla artışı nedeniyle lineer-elastik sınır aşılmaktadır ve kalıcı yer değiştirmeler meydana gelmektedir. Ayrıca betonun heterojen ve anizotrop bir malzeme olması da betonarme elemanların davranışının doğrusal olmamasında etkilidir. Betonarme elemanların sonlu elemanları ile analizinde doğrusal olmayan analiz ile çözümün yapılması gerçeğe en yakın sonuçları elde etmek açısından önemlidir.

### **Newton-Raphson Yöntemi**

ANSYS'te non-lineer analiz için Newton-Raphson yöntemi kullanılmaktadır. Newton-Raphson yönteminde yük, yük adımlarına bölünerek elemana uygulanmaktadır. Bu yük adımları da kendi içinde yük artımlarından oluşmaktadır.

Analizler yakınsama sağlanana kadar devam etmektedir. Her bir çözümün yakınsama kriteri ise dengelenmemiş yük vektörüne göre yapılmaktadır. Dengelenmemiş yük vektörü, uygulanan yük ile elemanların gerilmeleri toplamları sonucunda elde edilen yük vektörünün farkıdır. Program bu vektörü kullanarak çözüm yapmaktadır. Yakınsama olmaması durumunda bu vektör yeniden hesaplanmakta, rijitlik matrisi güncellenerek yeni çözümler elde edilmektedir [29].

### **Yakınsama Kriteri**

ANSYS'te analizler yakınsama sağlanana kadar devam etmektedir. Çalışmada bütün analizlerde deplasman için yakınsama değeri %1 olarak alınmıştır.

### **Von Mises Akma Kriteri**

Von Mises Teorisi şekil değiştirme enerjisinin belirli bir sınırı aşmasıyla birlikte cisimde hasar başladığını kabul eder. Eşitlik 3.1'de

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 = 2\sigma_y \quad (3.1)$$

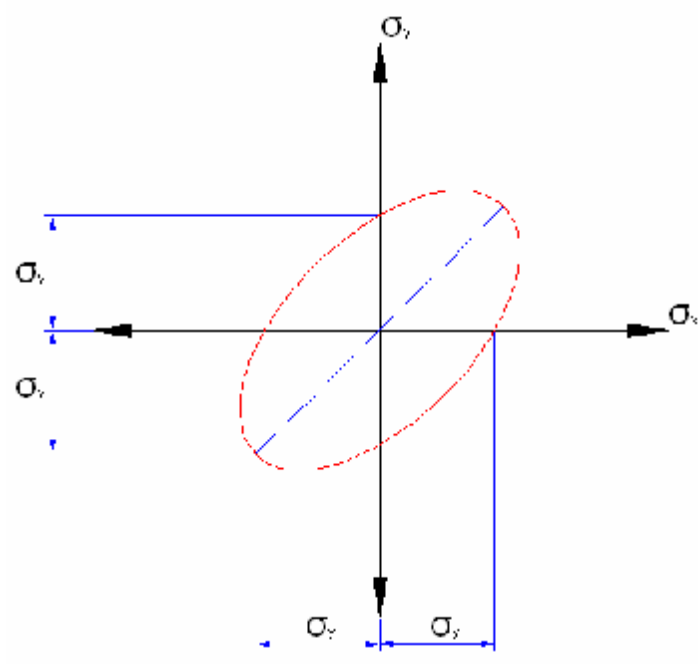
ve ya asal gerilmeler cinsinden Eşitlik 3.2'de

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_y \quad (3.2)$$

Eşitlikleri ifade edilmiştir. İki eksenli gerilme durumunda Eşitlik 3.3 kullanılır.

$$\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 = \sigma_y^2 \quad (3.3)$$

Bu denklem Şekil 3.7.deki gibi ifade edilebilir.

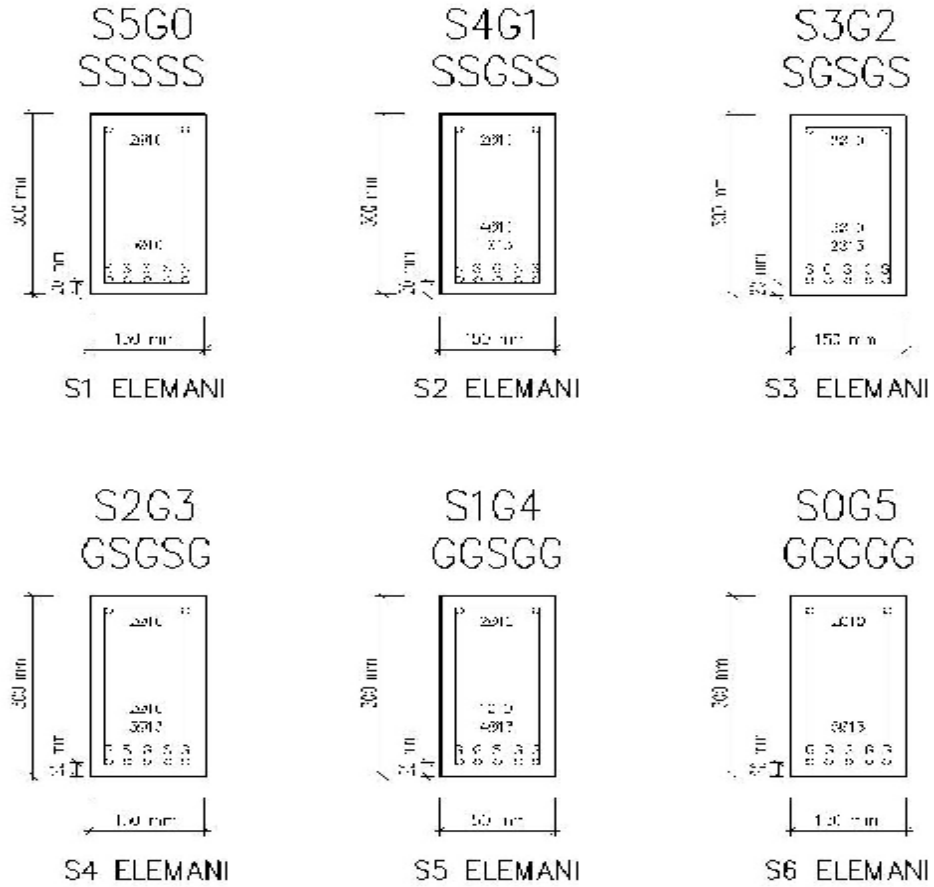


**Şekil 3.7.** Von Mises iki eksenli gerilme durumu

## 4. MODELLEMESİ YAPILAN KİRİŞLERİN TANITILMASI

### 4.1. Kirişlerin Tanıtılması

Çalışma kapsamında toplam 6 adet kiriş modellenmiştir. Bunların tamamı 2014 yılında Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında Mehmet YAZ tarafından testi gerçekleştirilmiştir. Deney elemanları 150 mm \* 300 mm ebatlarında ve 3200 mm boyunda, 6 adet betonarme kirişten oluşmaktadır. Deney elemanlarının kesitleri Şekil 4.1.de, donatı detayları ise Şekil 4.2.den Şekil 4.7.ye kadar verilmiştir.

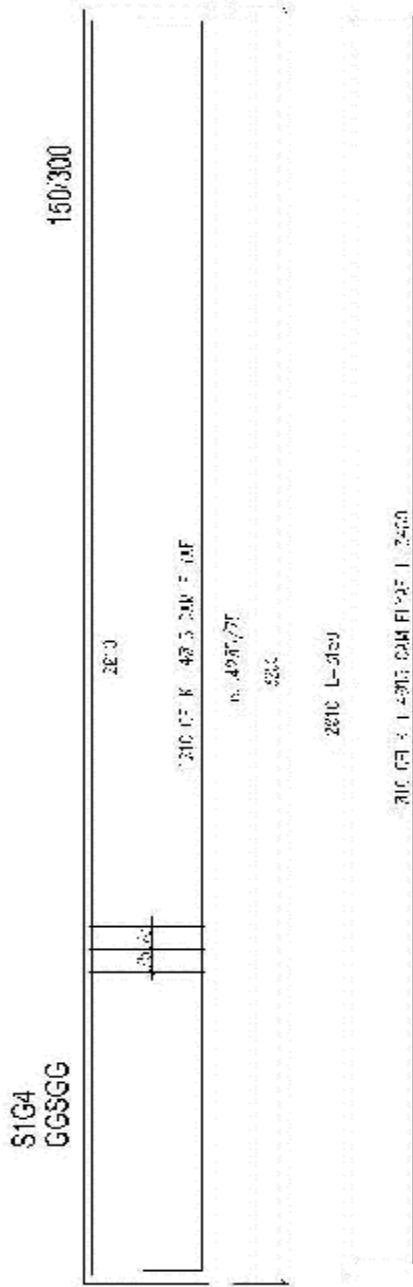


Şekil 4.1. Deney elemanlarının en kesitleri

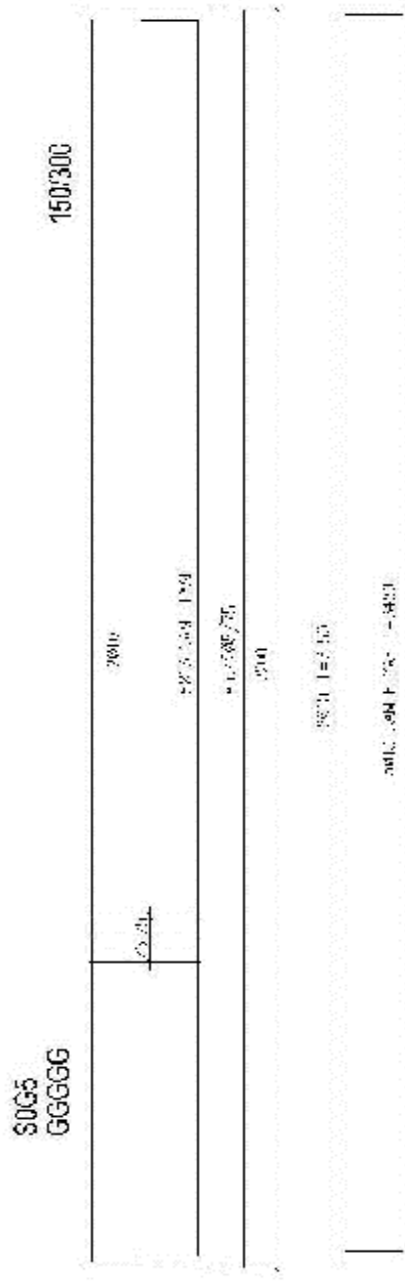








Şekil 4.6. S5 (S1G4) elemanı detay çizimi



Şekil 4.7. S6 (S0G5) elemanı detay çizimi

Tüm elemanlarda basınç donatısı olarak 2 $\phi$ 10 çelik donatı kullanılmıştır. Kiriş etriyesi olarak tüm elemanlarda  $\phi$ 5/75 mm aralıklı nervürlü çelik donatılar kullanılmıştır. Çekme donatısı olarak her elemanda 5 adet donatı kullanılmış olup, çelik donatıların çapı 10 mm, cam elyaf donatıların çapı 13 mm'dir. Bu donatıların dayanımları Çizelge 4.1.de verilmiştir. Deney elemanlarında parametre olarak kullanılan değişken çelik ve cam elyaf donatıların çekme bölgesinde sayı ve sıralamasıdır. Tüm deney elemanlarında aynı beton sınıfı kullanılmıştır. Beton sınıfı C30 (30 MPa)'dur. Deney elemanlarının özellikleri Çizelge 4.2.de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Deney elemanlarında kullanılan donatıların çekme dayanım değerleri

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

**Çizelge 4.2.** Deney elemanlarının özellikleri

Deney Elemanı Adı	Çekme Bölgesinde Kullanılan Çelik Donatı Sayısı	Çekme Bölgesinde Kullanılan Cam Elyaf Donatı Sayısı	Çekme Bölgesinde Kullanılan Donatıların Sıralaması	Çekme Bölgesinde Kullanılan Cam Elyaf Donatı Yüzdesi
S1(S5G0)	5	0	S S S S S	%0
S2(S4G1)	4	1	S S G S S	%20
S3(S3G2)	3	2	S G S G S	%40
S4(S2G3)	2	3	G S G S G	%60
S5(S1G4)	1	4	G G S G G	%80
S6(S0G5)	0	5	G G G G G	%100

Deney elemanlarının adlandırılmasında birbirini takip eden “harf-rakam-harf-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.

S1 (S5G0) elemanı: 5 adet çelik çekme donatısı bulunan ve GFRP çekme donatısı bulunmayan eleman

S2 (S4G1) elemanı: 4 adet çelik çekme donatısı ve 1 adet GFRP çekme donatısı bulunan eleman

S3 (S3G2) elemanı: 3 adet çelik çekme donatısı ve 2 adet GFRP çekme donatısı bulunan eleman

S4 (S2G3) elemanı: 2 adet çelik çekme donatısı ve 3 adet GFRP çekme donatısı bulunan eleman

S5 (S1G4) elemanı: 1 adet çelik çekme donatısı ve 4 adet GFRP çekme donatısı bulunan eleman

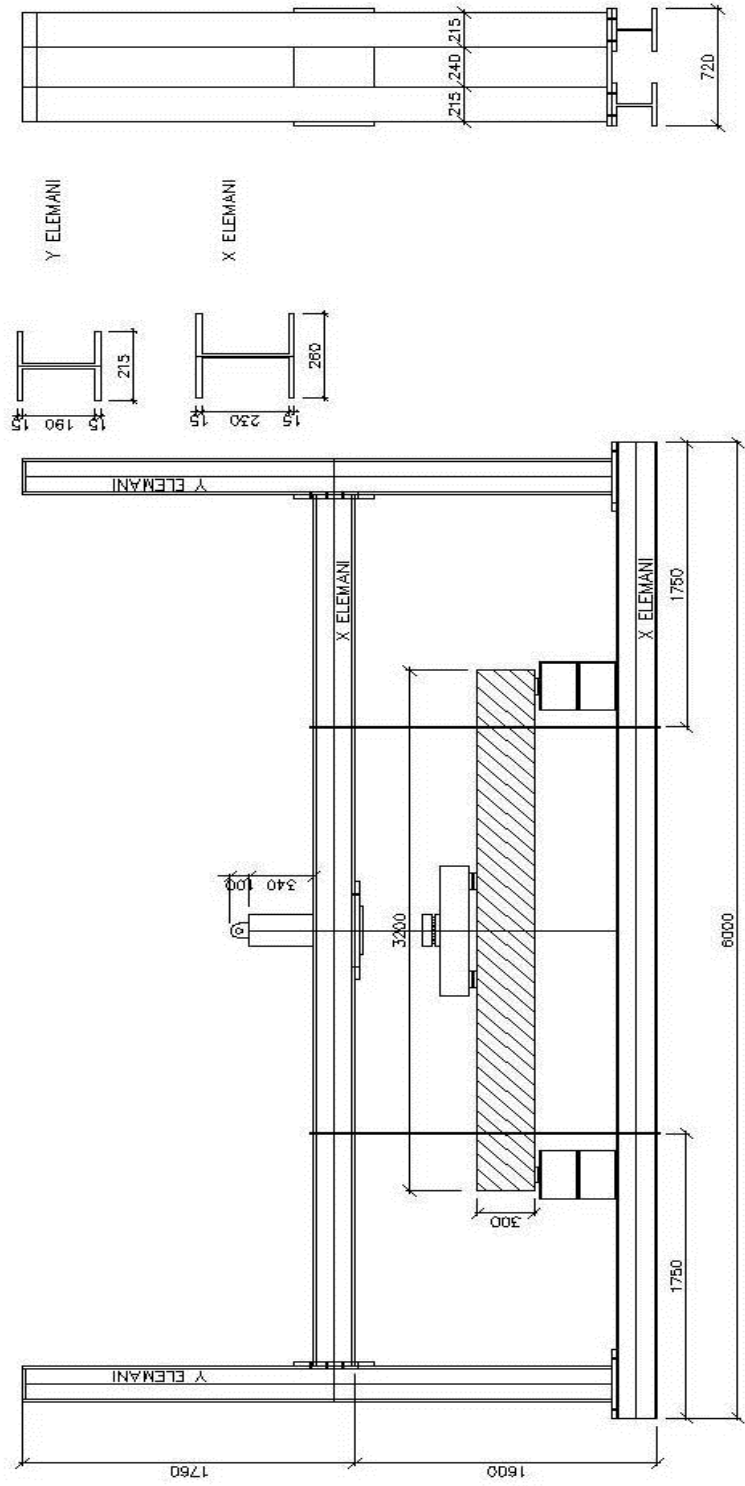
S6 (S0G5) elemanı: Çelik çekme donatısı bulunmayan ve 5 adet GFRP çekme donatısı bulunan eleman

#### **4.2. Deney Düzenegi**

Deneyler Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünün Yapı Mekaniği Laboratuvarında yaklaşık 80 kN kapasiteli çelik deney çerçevesinde yapılmıştır. Deneylere başlamadan önce çelik çerçeve 8 adet 2’şer metre boylarında 30 mm çaplı sonsuz dişlilerle güçlendirilerek kapasitesi arttırılmıştır. Çerçeve oluşan reaksiyonları kendi içinde deney elemanlarına iletmektedir. Deney elemanına iki noktalı yükleme yapılmıştır. Yük noktaları arasında mesafe, düzgün yayılı yük altında oluşan moment diyagramını kapsayacak şekilde oluşturulmuştur. Deney elemanlarına uygulanan yük hidrolik kriko ile verilmiş ve yükün büyüklüğü yük hücresi ile ölçülmüştür.

#### **4.2.1. Yükleme Düzeni**

Deney elemanları çerçeve içine iki ucundan basit kiriş olarak mesnetlenmiştir. Deney elemanlarında basit eğilme etkisindeki bir bölgenin oluşturulması amaçlanmıştır. Deney elemanlarının bir ucu sabit mesnetli diğer ucu hareketli mesnetli olarak tasarlanmıştır. Mesnetlerin altında rijit olarak boyutlandırılmış, kaynaklanmış U 200 çelik profil kullanılmıştır. Yük aktarılırken kutu profilin mesnetlenmesi iki çelik lama arasına yerleştirilen kare ve çelik çubuklarla sağlanmıştır. Deney düzeneği ve yükleme çerçevesi Şekil 4.8.dedir.



Şekil 4.8. Yükleme çerçevesi ve deney düzeneği

## 5. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DAVRANIŞLARI

Deneylemler sonucunda elde edilen verileri karşılaştırabilmek amacıyla kirişlerin yapımında kullanılan beton ve donatıların aynı mekanik özelliklere sahip olmaları önemlidir. Bu nedenle deneyde kullanılan donatılar aynı yerden tek seferde temin edilmiştir.

Deney elemanlarının betonları Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında dökülmüştür. Bütün deney elemanlarının dökümü aynı gün gerçekleştirilmiş ve aynı kür şartları uygulanmıştır. Deney elemanlarının ortalama karakteristik basınç dayanımları 30 MPa'dır. Donatı olarak 5 mm'lik nervürlü çelik donatı, 10 mm'lik nervürlü çelik donatı ve yaklaşık 13 mm'lik nervürlü cam elyaf donatı kullanılmıştır.

### 5.1. Betonun Mekanik Özellikleri

Beton genel olarak çimento, su ve agreganın belirli oranlarda karıştırılması sonucu elde edilen kompozit bir yapı malzemesidir. Ayrıca beton zamana ve yüke bağlı olarak özellikleri değişebilen non-lineer bir malzemedir. Betonun belirli bir yük seviyesine kadar lineer davranış gösterdiği ancak uygulanan yükün artırılmasıyla birlikte non-lineer davranış gösterdiği birçok çalışmada belirlenmiştir. Yük artışı oluşan mikro çatlakların büyüyerek makro çatlaklar haline geldiği bunun sonucunda da dayanımının düşerek yük taşıma kapasitesinin azaldığı görülmüştür. Yani betonun yük ve deplasman eğrisi parabolik bir özellik göstermektedir. Bu nedenle beton modellenirken malzemeyi belirli bir yük seviyesine kadar lineer kabul etmek, bu yük seviyesinden geçme anına kadar ise non-lineer kabul etmek sonuçların hassasiyeti açısından önemlidir.

Betonun önemli mekanik özellikleri arasında beton basınç dayanımı, beton çekme dayanımı, elastisite modülü ve poisson oranı gösterilebilir.

### 5.1.1. Beton Basınç Dayanımı

Betonun en önemli mekanik özelliği basınç dayanımıdır. Ayrıca beton sınıfı basınç dayanımına göre belirlenir. Betonun basınç dayanımının tespitinde standart silindir veya küp deneyi uygulanır. Standart silindir veya küp deneyinde betondan alınan numuneler standart silindir veya küp kalıplara yerleştirilmektedir. Standart silindir kalıplar 150 mm çapında 300 mm uzunluğunda iken standart küp kalıpların boyutları 150 mm'dir. Numuneler kür ortamında 28 gün mukavemetini kazanması için bekletildikten sonra, preslerde eksenel basınç uygulanmak suretiyle kırılmaktadır.

Yapılan çalışmada beton dökümü sırasında toplam 12 adet küp numune alınmıştır. Bu numunelere standart basınç testi uygulanmıştır. Deney elemanlarının ortalama karakteristik basınç dayanımları Çizelge 5.1.de görüldüğü gibi 30 MPa bulunmuştur. Nümerik çalışmada beton basınç dayanımı 30 MPa olarak alınmıştır.

**Çizelge 5.1.** 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

### 5.1.2. Beton Çekme Dayanımı

Genel olarak betonun çekme dayanımı betonun kalitesine göre değişmektedir. Betonun çekme dayanımı basınç dayanımının yanında oldukça düşüktür Yaklaşık olarak basınç dayanımının %7 ile %17'si arasındadır. Doğrudan çekme, yarmada çekme ve eğilmede çekme olmak üzere üç şekilde tayin edilir.

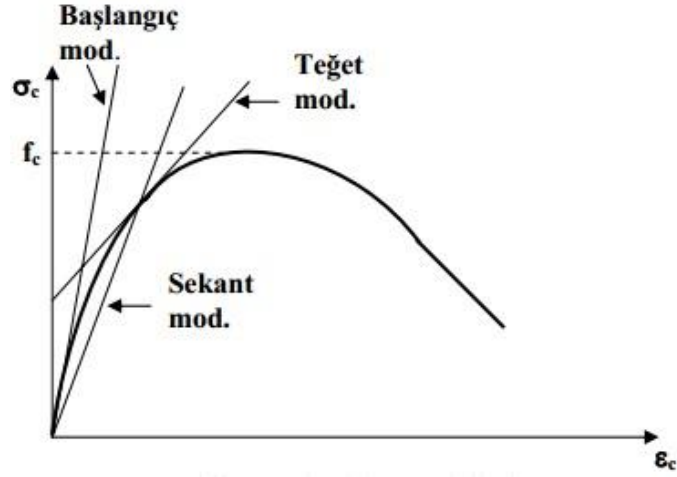
Çalışmamızda beton çekme dayanımı Eşitlik 5.1'de verilen ACI denklemine göre hesaplandı.

$$f_{ctk} = 0.62 * \sqrt{f_c} \quad (5.1)$$

### 5.1.3. Betonun Elastisite Modülü

Betonun elastisite modülünün hesaplanması zordur. Beton elastisite modülünün hesaplanması için Şekil 5.1.de görülen üç yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan ilki başlangıç modülü yöntemidir. Bu yöntem başlangıç noktasından betonun gerilme birim şekil değiştirme eğrisine çizilen teğetin eğimi odaklıdır. İkincisi teğet modülü yöntemidir. Herhangi bir noktadan betonun gerilme birim şekil değiştirme eğrisine çizilen teğetin eğimidir. Üçüncüsü sekant modülü yöntemidir. Bu modül orijinden eğri üzerindeki herhangi bir noktaya çizilen sekantın eğimi olarak ifade edilmektedir.





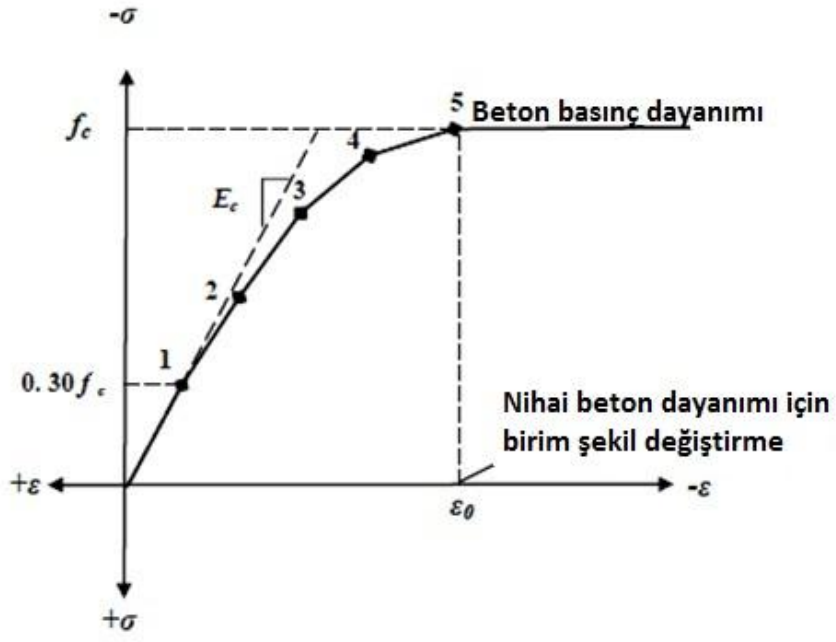
**Şekil 5.1.** Beton elastisite modülü hesabında kullanılan yöntemler

### **Kachlakef Beton Modeli**

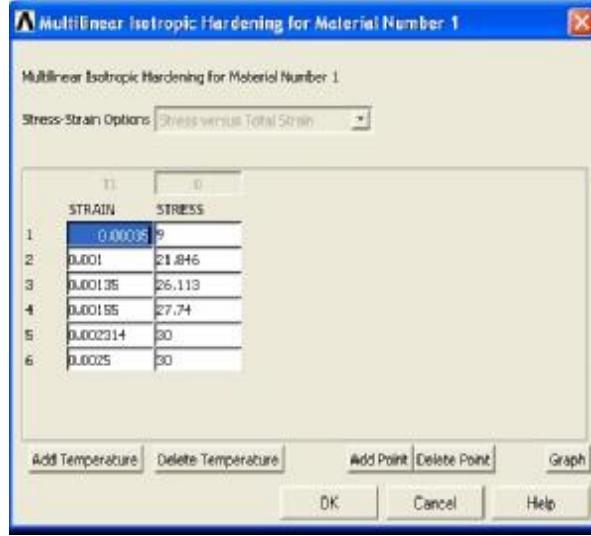
Kirişlerin modellenmesinde Kachlakef tarafından önerilen beton modeli dikkate alınmıştır. Kachlakef tarafından önerilen bu modelde betonun gerilme-birim Şekil değiştirme eğrisi iki kısımdan oluşmaktadır. Eğri tepe noktasına kadar ikinci dereceden bir parabol Şeklinde, tepe noktasından kopma anına kadar ise sabit değerde devam etmektedir.

Kachlakef beton modeline göre çizilen gerilme-birim Şekil değiştirme (stress-strain) grafiği Şekil 5.2.dedir ve bu grafiğe ait beş nokta için gerilme birim Şekil değiştirme değerleri Şekil 5.3.tedir. ACI rehberliğinde elastisite modülü Eşitlik 5.2'den hesaplanmıştır.

$$E_c = 4733\sqrt{f_c} \quad (5.2)$$



Şekil 5.2. Kachlakef Beton Modeli



Şekil 5.3. Beton modeli için gerilme-birim şekil değiştirme değerleri

Kachlakef tarafından önerilen bu gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinde parabolik olan ilk kısmın denklemi Eşitlik 5.3'te verilmiştir.

$$f = \frac{E_c \varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o}\right)^2} \quad (5.3)$$

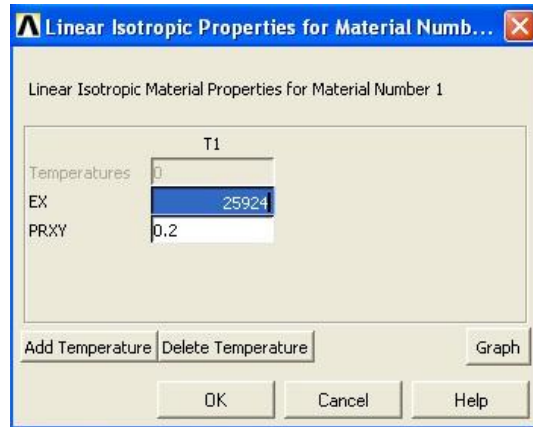
Eğride maksimum gerilmeye karşı gelen şekil değiştirme Eşitlik 5.4'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$\varepsilon_o = \frac{2f_c}{E_c} \quad (5.4)$$

#### 5.1.4. Poisson Oranı

Enine yer değiştirmenin boyuna yer değiştirmeye oranı olarak bilinen poisson oranı beton için 0,20 kabul edilmektedir. Çalışmada bu değer alınarak kirişler modellenmiştir. Donatı çeliğinde ise bu değer biraz büyük tutularak 0,3 kabul edilmiştir.

ANSYS 'te malzeme modelleri oluşturulurken beton malzeme 1, kesme donatısı 2, çelik donatı malzeme 3 ve GFRP donatı ise malzeme 4 olarak adlandırılmıştır. Beton malzeme özellikleri Şekil 5.4.te görüldüğü gibi ANSYS modelinde kullanılmıştır.



Şekil 5.4. Betonun elastisite modülü ve poisson oranı

## **William Warnke Göçme Kriteri**

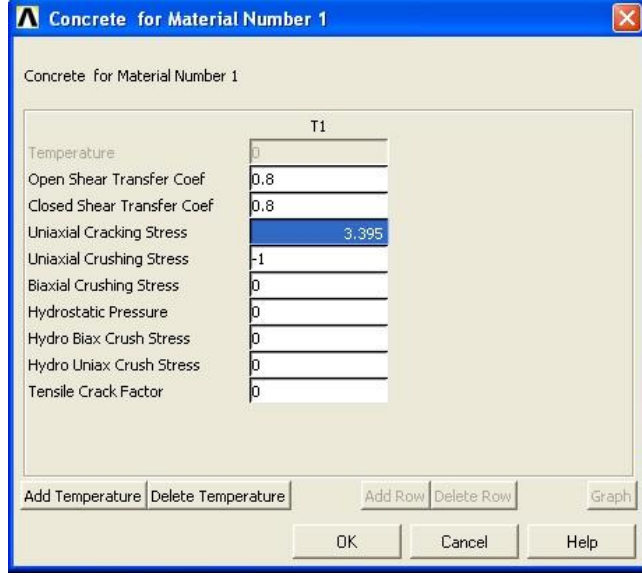
William Warnke modelinde betonun üç eksenli gerilmesi altındaki göçme şekli temsil edilmektedir. Ansys 'te William-Warnke göçme kriterinin modele yansıtılması aşağıda açıklanan parametreler ile gerçekleştirilmektedir. Şekil 5.5.te bu parametrelerin değerleri verilmiştir.

**Open Shear Transfer Coef:** Açık çatlaklar için kesme transfer katsayısıdır. Bu değer "0 ile 1" arasında değişmekte olup "0" olması çatlakta hiç kesme transferinin olmadığını "1" olması ise çatlağın iki yüzü arasında kesmenin tamamen aktarıldığını göstermektedir.

**Close Shear Transfer Coef:** Kapalı çatlaklar için kesme transfer katsayısıdır. Bu değer "0 ile 1" arasında değişmekte olup "0" olması çatlakta hiç kesme transferinin olmadığını "1" olması ise çatlağın iki yüzü arasında kesmenin tamamen aktarıldığını göstermektedir.

**Uniaxial Cracking Stress:** Betonun tek eksenli çekme dayanımıdır.

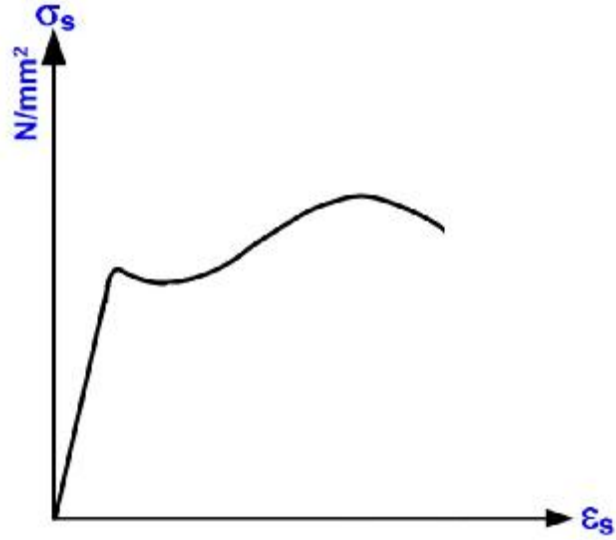
**Uniaxial Crushing Stress:** Betonun tek eksenli ezilme dayanımıdır. Çalışmada bu değer -1 alınarak betonda meydana gelen ezilmeler ihmal edildi.



**Şekil 5.5.** Beton için diğer parametreler

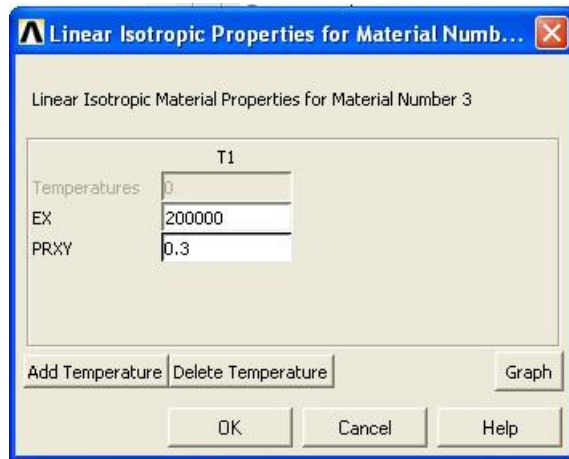
## 5.2. Çelik Donatının Özellikleri

Çelik donatılar çekme dayanımının yüksek olması nedeniyle betonarme yapılarda tercih edilmektedir. Çeliğin gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi Şekil 5.6.dan da görüldüğü gibi üç belirgin kısımdan oluşmaktadır. Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin ilk kısmında çelik lineer-elastik özelliktedir. Bu kısımda gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler doğru orantılı olarak değişmektedir. Ayrıca uygulanan yükün kaldırılması sonucu gerilmeler ve birim şekil değiştirmeler ortadan kalkmaktadır. Bu değişim akma sınıra kadar devam etmektedir. Bu sınırdan itibaren uygulanan yük artırılrsa da çelikteki gerilmeler değişmezken ve birim şekil değiştirmeler ise artmaktadır. Akma sahanlığı olarak adlandırılan bu bölgeden sonra pekleşme başlamakta ve pekleşme sınırına ulaşıldığında gerilme tekrar artmaktadır. Çeliğin kesitinin de küçülmesiyle kopma gerçekleşmektedir [30].



**Şekil 5.6.** Çelik donatı için gerilme birim şekil değiştirme grafiği

Kirişlerin modellenmesi yapılırken kirişte kullanılan betonarme donatısı lineer-elastik malzeme olarak tanımlanmış, elastisite modülü, akma dayanımı ve poisson oranı değerleri girilerek malzeme Link180 elemanı ile modellenmiştir. Şekil 5.7.de çelik donatıya ait elastisite modülü ve poisson oranı değerleri görülmektedir.

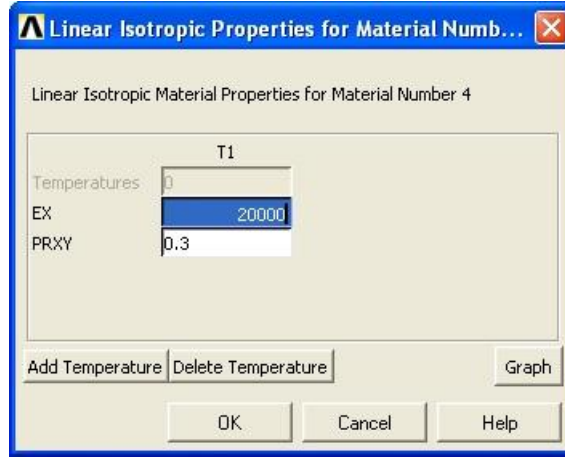


**Şekil 5.7.** Çelik donatının elastisite modülü ve poisson oranı

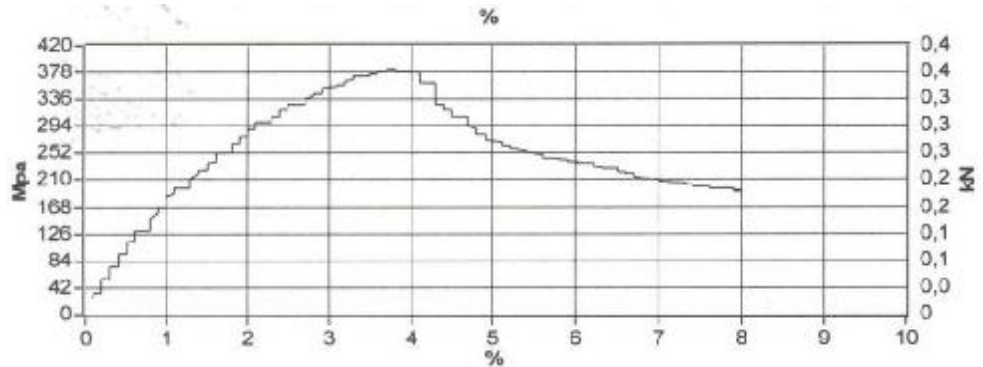
### 5.3. GFRP Donatının Özellikleri

GFRP donatısı çekme dayanımı yüksek, korozyon dayanımı yüksek, hafif ve yalıtkan bir anizotrop malzemedir. Bu donatılar kopana kadar doğrusal gerilme-şekil değiştirme gösterir.

Çalışmada GFRP donatı lineer elastik malzeme olarak kabul edilmiş ve Link180 elemanı ile modellenmiştir. Malzemenin elastisite modülü ve poisson oranı Şekil 5.8.de, gerilme birim şekil değiştirme grafiği ise Şekil 5.9.da verilmiştir.



Şekil 5.8. GFRP donatının elastisite modülü ve poisson oranı



Şekil 5.9. GFRP donatı için gerilme birim şekil değiştirme grafiği

#### **5.4. Modelleme Sirasında Yapılan Kabuller**

Kirişlerin sonlu eleman modellemesi sırasında analizlerde yapılan kabuller kısaca aşağıdadır:

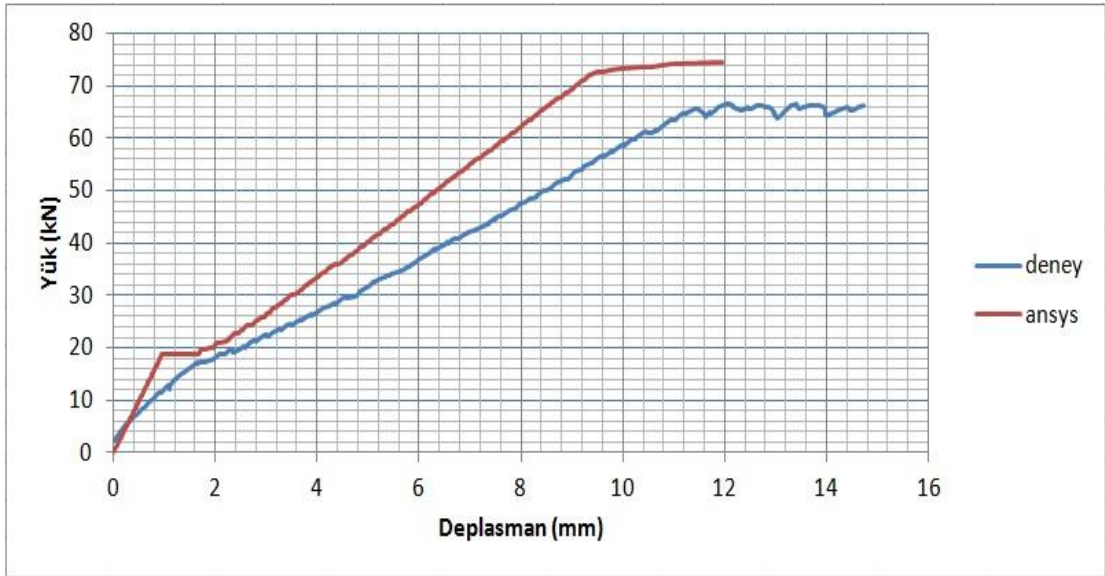
1. Eleman seçiminde beton için Solid65 elemanı kullanılmıştır. Donatılar Link180 elemanı ile modellenmiştir.
2. Beton elastik, plastik davranışı ve aynı zamanda göçme anındaki malzeme davranışı göz önünde bulundurularak modellenmiştir. Ayrıca betonda ezilme olmadığı kabul edilmiştir.
3. Çelik donatılar, akma gerilmesi, elastisite modülü ve poisson oranı dikkate alınarak modellenmiştir.
4. Cam elyaf donatılar, lineer-elastik modellenmiştir.
5. Beton-donatı ile beton-cam elyaf donatı arasında tam aderans olduğu (full bonding) kabul edilmiştir.



## 6. ANALİZ SONUÇLARI İLE DENEYSEL ÇALIŞMANIN KARŞILAŞTIRILMASI

Nümerik ve deneysel çalışmadan elde edilen yük-sehim grafikleri Şekil 6.1.den Şekil 6.7.ye kadar her eleman için ayrı ayrı olacak verilmiştir.

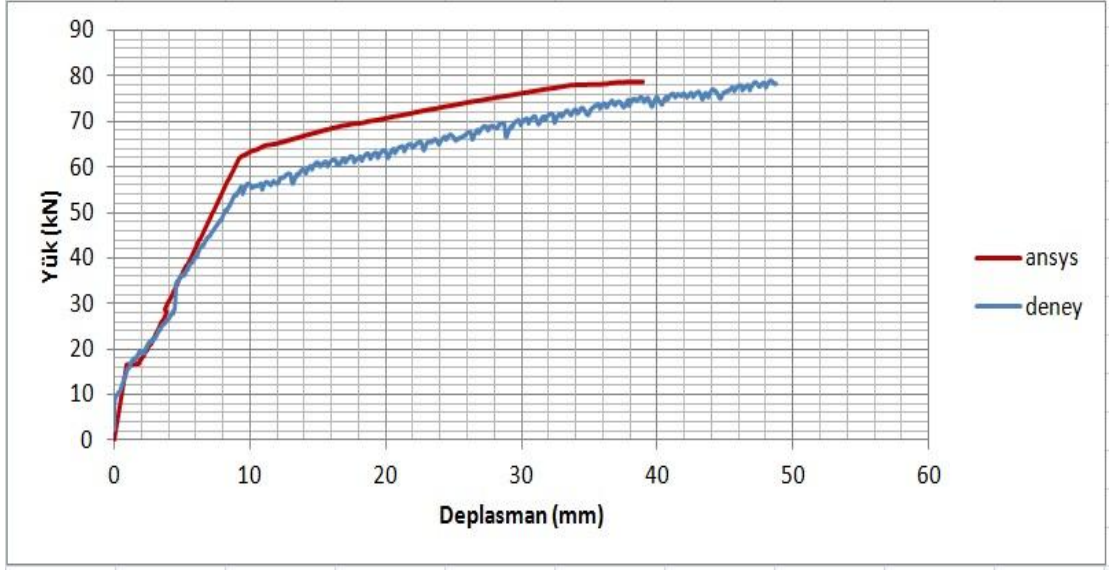
### 6.1. S1 (S5G0) Elemanı



Şekil 6.1. S1 Elemanı yük-sehim grafikleri

Nümerik çalışmada; ilk çatlak yükünün yaklaşık 18,5 kN'da meydana geldiği görülmektedir. Akmadan sonra plastik davranış hem deneysel hem de nümerik sonuçlardan gözükmemektedir. Erişilen nihai yükler ve bu değerlere karşılık gelen sehim değerleri arasında kabul edilebilir bir fark vardır. Ancak deneysel sonuçlar daha güvenli taraftadır. İlk çatlak öncesi ve sonrası nümerik çalışmadan elde edilen eğilme rijitlikleri daha büyüktür.

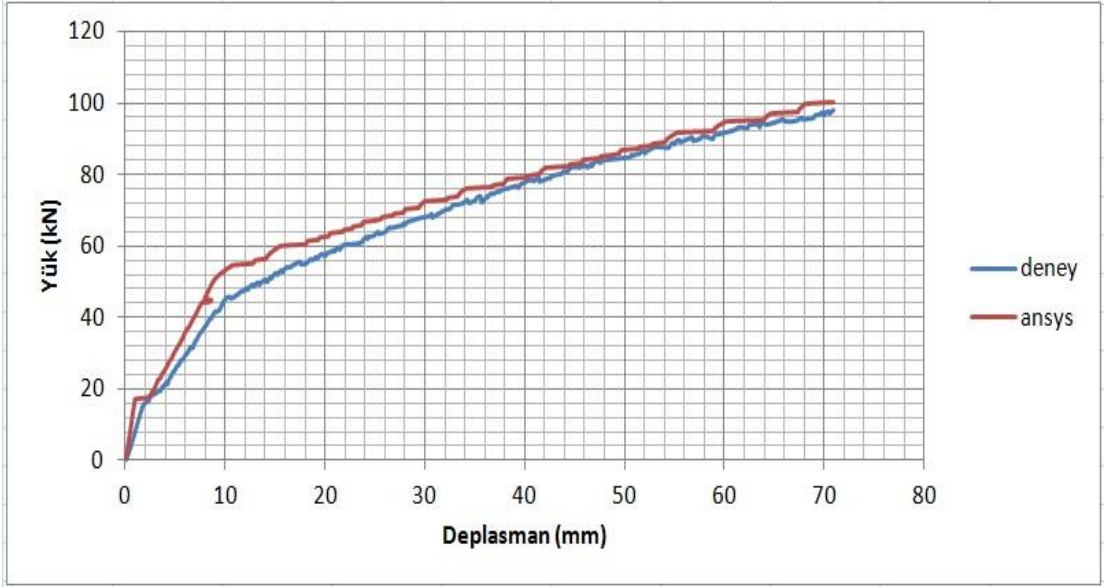
## 6.2. S2 (S4G1) Elemanı



Şekil 6.2. S2 Elemanı yük-sehim grafikleri

Nümerik çalışmada ilk çatlak yükünün yaklaşık 16 kN'da meydana geldiği görülmektedir. Nümerik ve deneysel çalışmadan elde edilmiş olan sonuçlar hem elastik hem de plastik safhada uyum göstermiştir. Kabul edilebilir yüzdelerde nihai yük ve sehim değerleri elde edilmiştir. Nümerik çalışmadan elde edilen eğilme rijitliklerinin daha büyük olduğu görülmektedir.

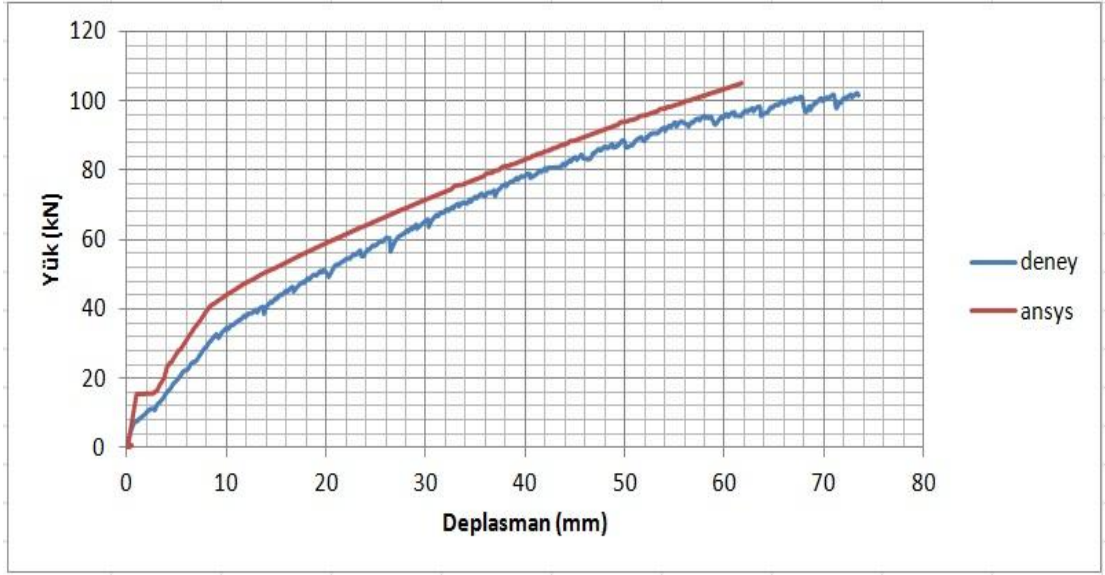
### 6.3. S3 (S3G2) Elemanı



Şekil 6.3. S3 Elemanı yük-sehim grafikleri

Nümerik çalışmada ilk çatlak yükünün yaklaşık 17 kN'da meydana geldiği görülmektedir. Nümerik ve deneysel çalışmadan elde edilmiş olan sonuçlar hem elastik hem de plastik safhada uyum göstermiştir. Kabul edilebilir yüzdelerde nihai yük ve sehim değerleri elde edilmiştir. S3 elemanının nihai yük kapasitesinin, S2 ve S1 elemanlarınınkine göre daha fazla olduğu, ancak rijitliğinin daha düşük olduğu görülmektedir.

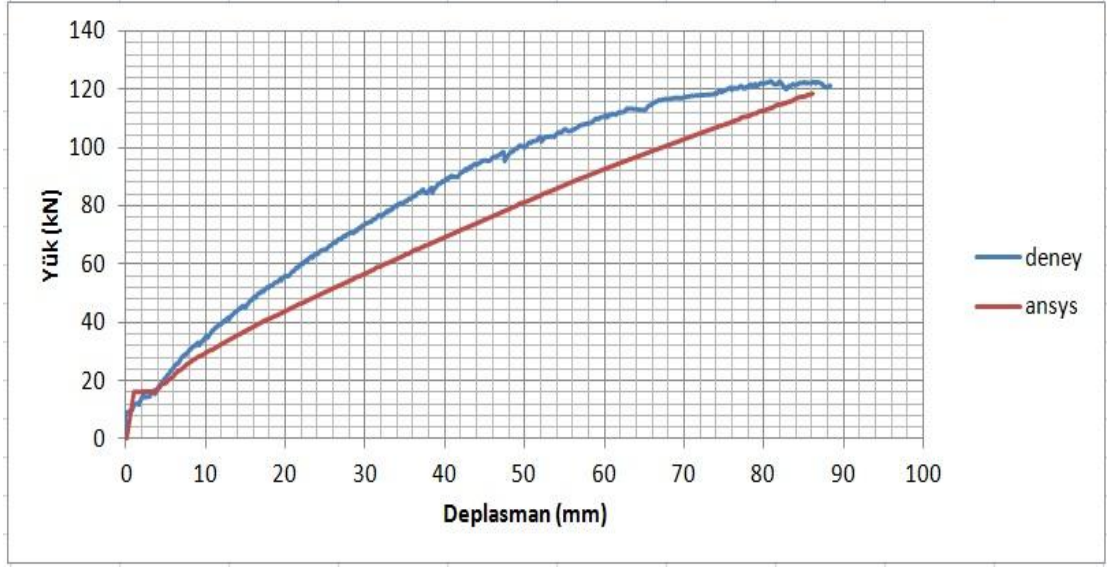
#### 6.4. S4 (S2G3) Elemanı



Şekil 6.4. S4 Elemanı yük-sehim grafikleri

Nümerik çalışmada ilk çatlak yükünün yaklaşık 15,7 kN'da meydana geldiği görülmektedir. Nihai yük değerleri arasında kabul edilebilir farklar elde edilmiştir. Deney sonuçları daha güvenli gözükmektedir. Ayrıca yük-sehim eğrisinin lineere yaklaştığı gözükmektedir.

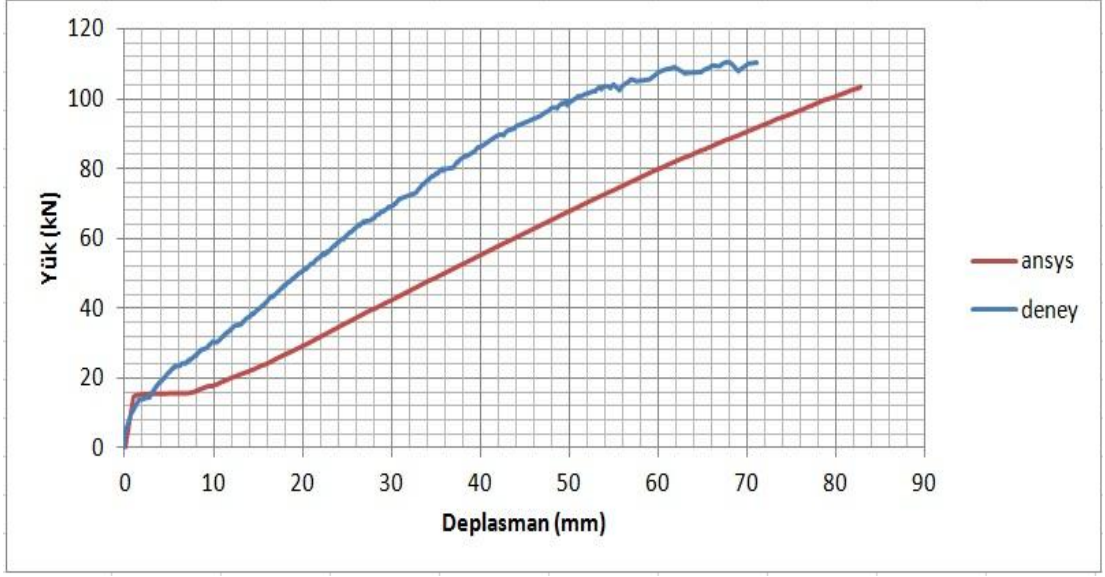
## 6.5. S5 (S1G4) Elemanı



Şekil 6.5. S5 Elemanı yük-sehim grafikleri

Nümerik çalışmada ilk çatlak yükünün yaklaşık 17 kN'da meydana geldiği görülmektedir. Nihai yük değerleri ve buna karşılık gelen sehim değerleri birbirine çok yakındır. Nümerik sonuçlar deneysel sonuçlardan daha güvenlidir. Yük-sehim eğrileri doğrusala yakındır. S5 elemanında yukarıda verilen elemanlardan farklı olarak ilk çatlak oluşumundan sonra analizden elde edilen grafik deneysel çalışmada elde edilen grafiğin altından gitmektedir.

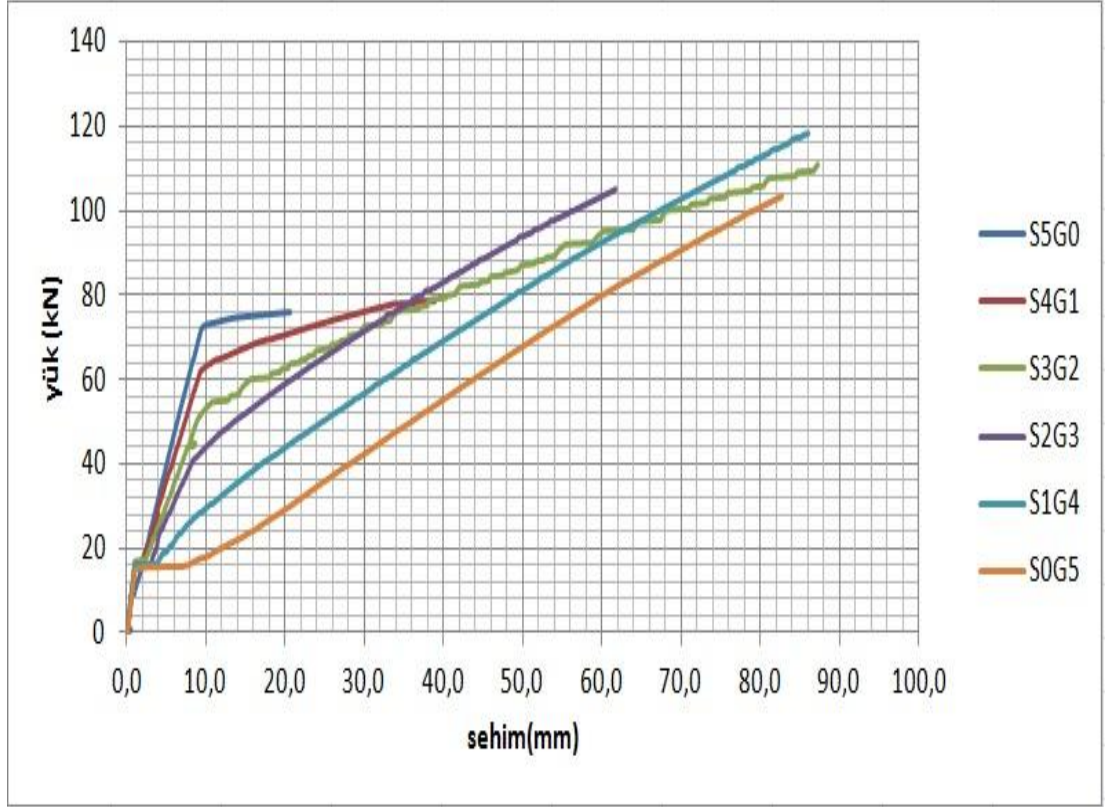
## 6.6. S6 (S0G5) Elemanı



Şekil 6.6. S6 Elemanı yük-sehim grafikleri

Nümerik çalışmada ilk çatlak yükünün yaklaşık 15,6 kN'da meydana geldiği görülmektedir. Nihai yük değerleri arasında kabul edilebilir farklar görülmektedir. Nümerik sonuçlar deney sonuçlarından daha güvenli gözükmektedir. Deneysel ve nümerik yük-sehim grafiklerinin neredeyse doğrusala yakın olduğu gözükmektedir.

Analizi gerçekleştirilmiş tüm kirişlerin yük sehim grafikleri Şekil 6.7.de görülmektedir.



**Şekil 6.7.** Tüm kirişlerin nümerik yük-sehim grafikleri

Yüklemeye, deneysel sonuçlardan elde edilen nihai yük değerlerinin nümerik çalışmada 40 adımda uygulanması planlanarak gerçekleştirilmiştir. Ancak analizlerde, kirişlerin 35. ile 45. yük adımları arasında nihai taşıma kapasitelerine ulaşmış göçtükleri tespit edilmiştir.

Bütün analiz sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında %1,8-12,5 arasında değişen farklarla göçme yükü değerleri elde edilmiştir. Nihai yüklerde meydana gelen bu sapma yüzdeleri sonlu elemanlar metodu için kabul edilebilir olduğu düşünülmektedir. Deneysel çalışmalar sonucunda ve analizlerden elde edilmiş nihai yük değerleri çizelge 6.1.de verilmiştir.

**Çizelge 6.1.** Deneysel ve nümerik çalışmaların nihai yük değerleri

<b>Eleman</b>	<b>P<sub>ud</sub>(kN)</b>	<b>P<sub>un</sub>(kN)</b>	<b>Fark yüzdesi</b>
<b>S1</b>	<b>83,67</b>	<b>76,16</b>	<b>%8,9</b>
<b>S2</b>	<b>87,53</b>	<b>78,77</b>	<b>%10</b>
<b>S3</b>	<b>98,25</b>	<b>110,66</b>	<b>%12,5</b>
<b>S4</b>	<b>103,1</b>	<b>105</b>	<b>%1,8</b>
<b>S5</b>	<b>123,28</b>	<b>118,5</b>	<b>%3,9</b>
<b>S6</b>	<b>111,1</b>	<b>103,49</b>	<b>%6,7</b>

Analizler ile deneysel sonuçlar deplasmanlar bakımından karşılaştırıldığında farkın bazı kirişlerde göçme yüklerinde olduğu gibi kabul edilebilir sınırlardan fazla olduğu görülmektedir. Bu farkın betonda meydana gelen çatlakların etkisinin ANSYS'in beton için kabul ettiği çatlak modelinde davranışın tam olarak yansıtılamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Lu, Jiang, Teng, Ye [31], sonlu elemanlar metodu ile non-lineer problemlerin çözümünde birbirine bağlanan malzemelerin modellenmesinde iki yöntem kullanıldığını belirtmiştir. Bu yöntemlerden ilkinde arayüz elemanları kullanılırken, diğerinde ise ayrışma herhangi bir arayüz elemanı kullanılmadan doğrudan malzemeler için kabul edilen çatlak modelleri ile açıklanmaya çalışılmaktadır. Birçok sonlu elemanlar programında ikinci yöntem uygulanmaktadır. Yani göçme, malzeme için kabul edilen çatlak modellerinin kullanımı ile açıklanmaktadır. ANSYS sonlu elemanlar programında beton malzeme için sabit açılı çatlak modelini (FACM) kullanmaktadır. FACM modelinde çatlaklar asal gerilmelere dik yönde oluşup yönü değişmeden ilerlemektedir. FACM kesme yumuşamasını açıklamada yetersiz kalmaktadır. Bu da çatlama sonrası dahi kayma gerilme dağılımının artmaya devam ettiğini göstermektedir.

Deneysel çalışmalar sonucunda ve analizlerden elde edilmiş başlangıç rijitlikleri çizelge 6.2.de verilmiştir.



**Çizelge 6.2.** Deneysel ve nümerik yük-sehim grafiği başlangıç rijitlikleri

<b>Eleman</b>	<b>Nümerik (kN/mm)</b>	<b>Deney (kN/mm)</b>
<b>S1</b>	<b>19,96</b>	<b>8,67</b>
<b>S2</b>	<b>18,37</b>	<b>4,42</b>
<b>S3</b>	<b>16,18</b>	<b>3,84</b>
<b>S4</b>	<b>14,34</b>	<b>3,54</b>
<b>S5</b>	<b>8,76</b>	<b>2,28</b>
<b>S6</b>	<b>13,54</b>	<b>5,56</b>

## 7. 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. Bu çalışmada deneyleri daha önce yürütülmüş bir çalışmanın ANSYS bilgisayar programı kullanılarak modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada çekme donatısı olarak kullanılan çelik, GFRP donatı oranları ve dizilimleri parametre olarak incelenmiştir. Analizler sonucu elde edilmiş yük-deplasman eğrileri deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Sayısal modelleme yapılırken beton ile donatı arasında tam aderans olduğu kabul edilmiştir. Ancak deneysel çalışmada beton donatı arası aderans tam değildir. Ayrıca deney sırasında meydana gelen mikro çatlaklar analizler sırasında göz ardı edilmiştir. Yukarıda belirtilen iki sebepten dolayı yük-sehim grafiklerine bakıldığında analizlerden elde edilmiş eğilme rijitliklerinin deney sonuçlarından elde edilenlerden daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Bütün elemanlarda ilk çatlak gelişiminden sonra yük-sehim grafiklerine bakılarak eğimlerde düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Kirişlerde genel olarak, GFRP donatı oranı arttıkça eğilme rijitliği değerlerinde azalma eğilimi, çelik donatı oranı arttıkça eğilme rijitliği artma eğilimi gözlemlenmiştir

Nihai yük değerleri bakımından analiz sonuçları deneysel sonuçlardan en fazla %12,5 sapma göstermiştir. Bu farklılık sonlu elemanlar yöntemi açısından kabul edilebilir sınırlar içindedir. Kirişlerde genel olarak GFRP donatı oranının artmasıyla nihai yük değerlerinde artış eğilimi, çelik donatı oranının artmasıyla ise nihai yük değerlerinde azalma eğilimi gözlemlenmiştir.

Analizlerden elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar sehim değerleri bakımından karşılaştırıldığında farkın bazı kirişlerde kabul edilebilir sınırlardan fazla olduğu

görülmektedir. Bu farkın betonda meydana gelen çatlakların etkisinin ANSYS'in beton için kabul ettiği çatlak modelinde davranışın tam olarak yansıtılmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca kirişlerde genel olarak, GFRP donatı oranının artmasıyla sehim değerlerinde artış, çelik donatı oranının artmasıyla ise sehim değerlerinde azalma görülmektedir. Bunun, GFRP donatısı elastisite modülünün çelik donatı elastisite modülünden oldukça düşük oluşunun bir sonucu olduğu düşünülmektedir.

Uygulanan yükün arttırılmasıyla betonun bünyesinde bulunan mikro çatlaklar, makro çatlaklara dönüşmektedir. Bu da betonda non-lineer davranışın artmasına ve yük taşıma kapasitesinin düşmesine neden olmaktadır. Analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında ANSYS'in S2, S3, S4 ve S5 kirişleri için yük-sehim davranışını, göçme yükünü ve deplasman değerlerini deney sonuçları ile uyumlu tahmin ettiği görülmüştür. Ancak S1 ve S6 kirişlerinde göçme yüklerini uyumlu tahmin ederken deplasman değerlerinde uyumu yakalayamamıştır.

Yük-sehim grafikleri incelendiğinde GFRP donatı oranının artması ile kiriş davranışının gevrekleştiği ve yük-sehim eğrisinin lineere yaklaştığı, bu oranın azalması durumunda ise kiriş davranışının sünekleştiği tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Ferhat Aydın. GFRP-Beton-Çelik Lifli Hibrit Kirişlerin Eğilme Davranışlarının İncelenmesi. International Construction Congress. 11-13 October 2012. Isparta/Turkey.
- [2] ACI 440.1R American Concrete Institute Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars, 2006.
- [3] Nawy, E.G. and Neuwerth, G.E. Behavior of Fiber Glass Reinforced Concrete Beams, Journal of the Structural Division, ASCE, Sept., pp: 2203-15, 1971.
- [4] Özel, M. Behavior of Concrete Beams Reinforced with 3-D Fiber Reinforced Plastic Grids, Phd Thesis, University of Wisconsin – Madison, USA, 2002.
- [5] Anonim, <http://www.strongwell.com>. (17.11.2013).
- [6] M. Yaz, Betonarme Kirişlerde Cam Elyaf Donatıların Eğilme Davranışına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2014.
- [7] Lau, D., Pam, H.J. Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams. Engineering Structures 32 3857-3865, 2010.
- [8] Ji, H.S., Byun J.K., Lee, C.S., Son, B.J., Ma, Z.J. Structural performance of composite sandwich bridge decks with hybrid GFRP-steel core. Composite Structures 93 430–442, 2011.
- [9] Hu, D., Barbato, M. Simple and efficient finite element modeling of reinforced concrete columns confined with fiber-reinforced polymers. Engineering Structures 113–122, 2014.

- [10] Sakar, G., Hawileh, R.A., Naser, M.Z., Abdalla, J.A., Tanarlan, M. Nonlinear behavior of shear deficient RC beams strengthened with near surface mounted glass fiber reinforcement under cyclic loading. *Materials and Design* 61 16-25, 2014.
- [11] Yang, Q.S., Qin, Q.H., Zheng, D.H. Analytical and numerical investigation of interfacial stresses of FRP-concrete hybrid structure. *Composite Structures* 57 221-226, 2002.
- [12] Buyukkaragoz, A., Kalkan, I., Lee, J.H. A numerical study of the flexural behavior of concrete beams reinforced with AFRP bars. *Strength of Materials* 45 (6): 112-129, 2013.
- [13] Li, L., Guo, Y., Liu, F. Test analysis for FRC beams strengthened with externally bonded FRP sheets. *Construction and Building Materials* 22 315–323, 2008.
- [14] Hawileh, R.A. Nonlinear finite element modeling of RC beams strengthened with NSM FRP rods. *Construction and Building Materials* 27 461–471, 2012.
- [15] Kachlakev, D., Miller, T., Yim, S., Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates, Oregon Department of Transportation and Federal Highway Administration, FHWA-OR-RD-01-XX, 2001.
- [16] F. Cullazoğlu, FRP Donatılı Betonarme Kirişlerin Eğilme ve Kesme Etkisi Altındaki Analizi. Yüksek Lisans Tezi. Niğde Üniversitesi, Niğde, 2014.
- [17] Yavuz, G. Lif takviyeli polimerlerin betonarme kirişlerde donatı olarak kullanımı. *Engineering Sciences* 6 (4): 1001-1015, 2011.
- [18] Ashour, A.F. Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars. *Construction and Building Materials* 20 1005–1015, 2006.

- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Alsayed, S.H. Flexural behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars. *Cement and Concrete Composites* 20 1-11, 1998.
- [23] Nawy, E. G., Neuwerth, G. E. & Phillips, C. J., Behaviour of fibre glass reinforced concrete beams. *Journal of the Structural Engineering Division, ASCE*, 97 ST9 2203-2215, 1971.
- [24] Nakano, K., Matsuzaki, Y., Fukuyama, H. & Teshigawara, M., Flexural performance of concrete beams reinforced with continuous fibre bars. In *ACI Int. Symposium 1993, Fibre Reinforcement for Concrete Structures*, Ed. A. Nanni, Detroit, MI, pp. 743-751, 1993.
- [25] Hawileh, R.A. Finite element modeling of reinforced concrete beams with a hybrid combination of steel and aramid reinforcement. *Materials and Design* 65 831-839, 2015.
- [26] Aiello, M., Ombres, L. Structural performances of concrete beams with hybrid (fiber-reinforced polymer–steel) reinforcements. *J Compos Constr ASCE* 6(2):133–40, 2002.

- [27] İnternet: Gazi Üniversitesi Otomotiv Bilim ve Teknoloji Topluluğu [http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/malzeme\\_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf](http://www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/malzeme_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf), 2007.
- [28] Chandrupatla, T. R., Belegundu, A.D. Introduction to Finite Elements in Engineering , Prentice-Hall International, U.S.A., 1-2, 1997.
- [29] ANSYS, ANSYS User's Manual Revision 10.0, ANSYS, Inc., Cannonsburg, Pennsylvania, 2005.
- [30] Ersoy, U., Özcebe, G., Betonarme, Evrim Yayınevi, İstanbul, 17-46 , 459 464, 2001.
- [31] Lu, X. Z., Jiang, J. J., Teng, J. G. and Ye, L. P. Finite Element Simulation of Debonding in FRP-to-Concrete Bonded Joints. Elsevier, Construction and Building Materials, 20:412-424, 2006.