



**İSKENDERUN TEKNİK**

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

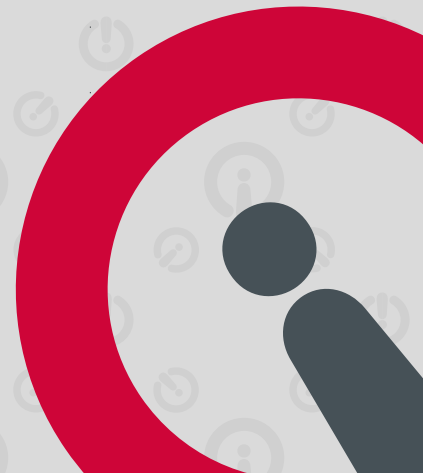
**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**KOMPOZİT BETONARME  
KİRİŞLERİN DENEYSEL  
VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ**

**Mohammad Bilal JALALI**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**ŞUBAT 2022**





**KOMPOZİT BETONARME KİRİŞLERİN DENEYSEL VE TEORİK  
OLARAK İNCELENMESİ**

**Mohammad Bilal JALALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2022**

KOMPOZİT BETONARME KİRİŞLERİN DENEYSEL VE TEORİK OLARAK  
İNCELENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)

Mohammad Bilal JALALI

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2022

ÖZET

Yeni nesil kompozit malzemeler, diğer sektörlerde kullanıldığı gibi inşaat sektöründe de kullanması günden güne artmaktadır. Kompozit malzemeler, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, aşındırıcı olmayan yapısı, hafifliği, düzgün yüzeyli yapısı vb gibi etkin özelliklere sahiptir. Beton çeşitli avantajlara sahip olduğundan inşaatlarda en çok kullanılan yapı malzemelerden biridir. Geleneksel beton güçlü basınç dayanımına sahip olmasına karşın zayıf çekme dayanımına sahiptir. Çekme dayanımındaki bu zayıflığı ortadan kaldırmak ve bunun yanı sıra betonun sünekliğini iyileştirmek için geleneksel betonda makro sentetik fiber kullanılmıştır. Çalışma kapsamında slump testi, basınç testi, yarma testi, eğilme testi, küp ultrasonic beton testi ve Schmidt çekiç testi yapıp makro sentetik fiberlerin kullanılması ile betonun mekanik özellikleri araştırılmıştır. Çeliğin korozyona uğraması inşaatta en öne çıkan problemlerden biri olarak bilinmektedir. Günümüzde korozyon dayanımı yüksek, çeliğe göre daha hafif ve yüksek dayanımlı GFRP (Cam Fiber Tekviyeli Plastik) donatıları kullanılmaktadır. Çalışmanın ikinci kısmında betonarme kirişler üzerinde dört noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Dikdörtgen kesitli hibrit (çelik-GFRP-lif) donatılı kirişler tasarlanmıştır. Sunulan çalışmanın kesiti 0.20x0.15m ve boyu 1.24m olarak seçilmiştir. Bu deneysel çalışmada, toplam 15 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Bu çalışmanın parametreleri, hacimce %0.4 ve %0.8 oranında makro sentetik lif, çelik donatı ve GFRP donatıdan oluşmaktadır. Bu kirişlerden 6 tanesi CFRP (Karbon Fiber Tekviyeli polimer) ile güçlendirilmiştir. Deney sonuçları sonlu elemanlar modeli Abaqus programından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Kompozit kirişler, statik analiz, CFRP kaplama, GFRP donatı, makro sentetik lif

Sayfa Adedi : 61

Danışman : Dr.Öğr.Üyesi Ali DOĞAN

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF COMPOSITE  
REINFORCED CONCRETE BEAMS

(M. Sc. Thesis)

Mohammad bilal JALALI

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
ENGINEERING AND SCIENCE INSTITUTE

February 2022

ABSTRACT

The use of new generation composite materials in the construction industry is increasing day by day as they are used in other sectors. Composite materials have effective properties such as high strength/weight ratio, non-abrasive structure, lightness, smooth surface structure, etc. Concrete is one of the most widely used building materials in construction because it has various advantages. Conventional concrete has strong compressive strength but weak tensile strength. Macro synthetic fiber has been used in conventional concrete to eliminate this weakness in tensile strength as well as improve the ductility of concrete. Within the scope of the study, the mechanical properties of concrete were investigated by performing the slump test, pressure test, splitting test, bending test, cube ultrasonic concrete test and Schmidt hammer test and using macro synthetic fibers. Corrosion of steel is known as one of the most prominent problems in construction. Today, GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) reinforcements with high corrosion resistance, lighter than steel and high strength are used. In the second part of the study, a four-point bending test was carried out on reinforced concrete soils. Rectangular cross-section hybrid (steel-FRP-fiber) reinforced beams are designed. The cross-section of the presented study is 0.20x0.15m and 1.24m in length. In this experimental study, a total of 15 reinforced concrete beams were produced. The parameters of this study are: 0.4% and 0.8% macro synthetic lif by volume, steel reinforcement and FRP reinforcement. 6 of these beams are reinforced with CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). The experimental results were compared with the results obtained from the finite element model Abaqus program.

Keywords : Composite beams, static analysis, CFRP coating, FRP reinforcement,  
Steel reinforcement, Macro synthetic fiber.

Page Number : 61

Supervisor : Assistant Professor Doctor Ali DOĞAN

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin konusunun belirlenmesinde, hem teorik hem nümerik hem de deneysel çalışma aşamalarında ve tezin yazım aşamasının sonuna kadar sahip olduğu değerli bilgi birikimi ve tecrübesi ile bu çalışmayı yönlendiren her türlü yardımı esirgemeyen yanımda olup beni her zaman destekleyen saygıdeğer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Ali DOĞAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatımda özellikle yüksek lisan eğitimim boyunca maddi ve manevi olarak her an yanımda olup beni destekleyen sevgili ailemin her ferdine şükranlarımı sunarım.



**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	9
3.1. Malzeme ve Özellikleri.....	9
3.1.1. Çimento .....	9
3.1.2. Agregası.....	10
3.1.3. Su .....	10
3.1.4. GFRP donatısı.....	11
3.1.5. Çelik donatısı .....	11
3.1.6. Makro sentetik polipropilen .....	12
3.1.7. MasterBraceSAT 4500.....	13
3.1.8. MasterBraceSAT 3500.....	13
3.1.9. CFRP .....	14
3.2. Karışım Oranları.....	14
3.2.1. Numune üretimi .....	14

	<b>Sayfa</b>
4. BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI .....	16
4.1. Çökme (Slump) Deneyi .....	16
4.2. Basınç Testi.....	17
4.3. Yarma Testi.....	17
4.4. Eğilme Testi .....	18
4.5. Schmidt Çekiç Testi.....	19
4.6. Ultrases Deneyi.....	19
4.7. Statik Elatisite Modülü .....	20
5. BÜYÜK KİRİŞLERİN DÖRT NOKTALI EĞİLME DENEYİ .....	21
5.1. Birinci Grup Kiriş Deneyleri.....	21
5.2. İkinci Grup Kiriş Deneyleri .....	22
5.3. Üçüncü Grup Kiriş Deneyleri .....	22
6. BÜYÜK KİRİŞLERİN CFRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ .....	23
6.1. Dördüncü Grup Kiriş Deneyleri.....	23
6.2. Beşinci Grup Kiriş Deneyleri.....	23
7. SONUÇ ve ÖNERİLER .....	25
7.1. Betonun Mekanik Özellikleri.....	25
7.1.1. Basınç deneyi .....	25
7.1.2. Yarma deneyi .....	26
7.1.3. Eğilme deneyi .....	27
7.1.4. Schmidt çekiç testi .....	28
7.1.5. Ultrases deneyi.....	29
7.1.6. Statik elatisite modülü .....	30
7.1.7. Betonun gerilme şekil değiştirme eğrisi.....	31

	<b>Sayfa</b>
7.2. Büyük Kirişlerin Eğilme Deneyi Sonuçları .....	32
7.2.1. Birinci grup kiriş deney sonuçlar .....	32
7.2.2. İkinci grup kiriş deney sonuçlar.....	34
7.2.3. Üçüncü kiriş deney sonuçlar .....	36
7.2.4. Dördüncü kiriş deney sonuçlar.....	38
7.2.5. Beşinci kiriş deney sonuçlar.....	40
<b>8. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ TEMELLİ ANALİZ PROGRAMI İLE ÇÖZÜM .....</b>	<b>43</b>
8.1. Abaqus Bilgisayar Modelleme ve Analiz Programı .....	43
8.2. Deneysel Çalışmanın Abaqus Sonuçlarıyla Karşılaştırma .....	48
8.2.1. KD kirişi.....	49
8.2.2. KDL1 kirişi .....	49
8.2.3. KDL2 kirişi .....	49
8.2.4. KF kirişi .....	51
8.2.5. KFL1 kirişi.....	51
8.2.6. KFL2 kirişi.....	52
8.2.7. KDK kirişi.....	53
8.2.8. KDL1K kirişi .....	54
8.2.9. KDL2K kirişi .....	54
<b>9. SONUÇLAR VE ÖNERİ.....</b>	<b>56</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>58</b>
<b>DİZİN .....</b>	<b>61</b>



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.1. CEM I 42.5 R tipi portland çimentosu.....	9
Şekil 3.2. Agreganın granülometrisi .....	10
Şekil 3.3. İri agrega (a), iri ve ince agreganın karışımı (b), iri ve ince agreganın lif ile karışımı .....	10
Şekil 3.4. GFRP çubukların bağlaması .....	11
Şekil 3.5. Boyuna ve enine donatıların bağlanması .....	12
Şekil 3.6. Makro sentetik lif.....	12
Şekil 3.7. Beton karıştırıcısı.....	15
Şekil 3.8. Üretilen numuneler .....	15
Şekil 4.1. Slump testi .....	16
Şekil 4.2. Basınç deney düzeneği .....	17
Şekil 4.3. Yarma deney düzeneği .....	18
Şekil 4.4. Üç nokta yükleme deney düzeneği .....	19
Şekil 4.5. Schmidt çekici deneyi.....	19
Şekil 4.6. Ultrases deney düzeneği .....	20
Şekil 5.1. Yük çerçevesi.....	21
Şekil 5.2. Deneyde kullanılan yük hücresi.....	21
Şekil 6.1. Betonarme kirişlerin A-A kesiti.....	24
Şekil 6.2. CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin A-A kesiti .....	24
Şekil 6.3. Üretilen numune çeşitleri, detayı ve kesitleri .....	24
Şekil 7.1. Basınç altında sade beton(a) basınç altında lifli beton(b).....	26
Şekil 7.2. Basınç dayanımı grafiği .....	26
Şekil 7.3. Yarma deneyi KD(a) Yarma deneyi KDL1(b) Yarma deneyi KDL2(c).....	27

	<b>Sayfa</b>
Şekil 7.4. Yarmada çekme dayanımı .....	27
Şekil 7.5. Eğilmde çekme dayanımı.....	28
Şekil 7.6. Schmidt çekiçi deneyi .....	29
Şekil 7.7. Schmidt çekici deneyi düzeneği .....	29
Şekil 7.8. Dinamik elastisite modülü .....	30
Şekil 7.9. Statik elastisite modülü değerlerinin karşılaştırılması .....	31
Şekil 7.10. KS betonun gerilme şekil değiştirme grafiği.....	31
Şekil 7.11. KSL1 betonun gerilme şekil değiştirme grafiği.....	32
Şekil 7.12. KSL2 betonun gerilme şekil değiştirme grafiği.....	32
Şekil 7.13. KS yük-deplasman grafiği .....	33
Şekil 7.14. KSL1 yük-deplasman grafiği .....	33
Şekil 7.15. KSL2 yük-deplasman grafiği.....	33
Şekil 7.16. KS-KSL1-KSL2 yük-deplasman grafiği .....	33
Şekil 7.17. Yük altında KSL1 kirişi .....	34
Şekil 7.18. Yük altında KSL2 kirişi.....	34
Şekil 7.19. KD kirişi için yük-deplasman grafiği .....	35
Şekil 7.20. KDL1 kirişi için yük-deplasman grafiği .....	35
Şekil 7.21. KDL2 kirişi için yük-deplasman grafiği .....	35
Şekil 7.22. KD-KDL1-KDL2 yük-deplasman grafiği .....	36
Şekil 7.23. KF yük-deplasman grafiği .....	36
Şekil 7.24. KFL1 yük-deplasman grafiği.....	37
Şekil 7.25. KFL2 yük-deplasman grafiği .....	37
Şekil 7.26. KF-KFL1-KFL2 yük-deplasman grafiği .....	37
Şekil 7.27. KSK yük-deplasman grafiği .....	38

	<b>Sayfa</b>
Şekil 7.28. KSL1K yük-deplasman grafiği .....	38
Şekil 7.29. KSL2K yük-deplasman grafiği.....	38
Şekil 7.30. KSK-KSL1K-KSL2K Yük-deplasman grafikleri .....	39
Şekil 7.31. KS-KSL1-KSL2-KSK-KSL1K-KSL2K kirişlerin yük deplasman grafiğinin karşılaştırılması .....	39
Şekil 7.32. KDK yük-deplasman grafiği.....	40
Şekil 7.33. KDL1K yük-deplasman grafiği .....	40
Şekil 7.34. KDL2K yük-deplasman grafiği .....	41
Şekil 7.35. KDK-KDL1-KDL2K yük-deplasman grafiği.....	41
Şekil 7.36. KD-KDL1-KDL2-KDK-KDL1K-KDL2K kirişlerin yük deplasman grafiğinin karşılaştırılması .....	42
Şekil 8.1. Abaqus ara yüzeyi.....	43
Şekil 8.2. Parça oluşturma .....	44
Şekil 8.3. Malzeme atama.....	44
Şekil 8.4. Parçaları montajlama .....	45
Şekil 8.5. Analiz türü seçme .....	45
Şekil 8.6. Parçaların temas ve bağlantıları.....	46
Şekil 8.7. Sınır şartları tanımlama.....	46
Şekil 8.8. Ağ oluşturma .....	47
Şekil 8.9. Modeli çözüme gönderme .....	47
Şekil 8.10. Sonuçlar .....	48
Şekil 8.11. KD deneysel ve ABAQUS yük-deplasman grafiği .....	48
Şekil 8.12. KDL1 deneysel ve ABAQUS yük-deplasman grafiği.....	49
Şekil 8.13. KDL2 kirişin deneysel ve ABAQUS yük-deplasman grafiği.....	49
Şekil 8.14. KD kirişin betonundaki plastik şekil değiştirme gerilmesi(PEMAG) .....	50

**Sayfa**

Şekil 8.15. KDL1 kirişin betonundaki plastik şekil değiştirme gerilmesi(PEMAG) ....	50
Şekil 8.16. KDL2 kirişin betonundaki plastik şekil değiştirme gerilmesi(PEMAG) ....	50
Şekil 8.17. KF kirişin deneysel ve ABAQUS yük-deplasman grafiği.....	51
Şekil 8.18. KFL1 kirişin deneysel ve ABAQUS yük-deplasman grafiği .....	51
Şekil 8.19. KFL2 kirişin deneysel ve ABAQUS yük-deplasman grafiği .....	52
Şekil 8.20. KFK kirişin betonundaki plastik şekil değiştirme gerilmesi(PEMAG) .....	52
Şekil 8.21. KFL1 kirişin betonundaki plastik şekil değiştirme gerilmesi(PEMAG) ....	53
Şekil 8.22. KFL2 kirişin betonundaki plastik şekil değiştirme gerilmesi(PEMAG) .....	53
Şekil 8.23. KDK kirişin deneysel ve ABAQUS yük-deplasman grafiği .....	53
Şekil 8.24. KDL1K kirişin deneysel ve ABAQUS yük-deplasman grafiği.....	54
Şekil 8.25. KDL2K kirişin deneysel ve ABAQUS yük-deplasman grafiği.....	54
Şekil 8.26. KDK kirişin betonundaki plastik şekil değiştirme gerilmesi(PEMAG) .....	55
Şekil 8.27. KDL1K kirişin betonundaki plastik şekil değiştirme gerilmesi(PEMAG) ..	55
Şekil 8.28. KDL2K kirişin betonundaki plastik şekil değiştirme gerilmesi(PEMAG) ..	55

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal özellikleri.....	9
Çizelge 3.2. Çimentonun mekanik özellikleri.....	9
Çizelge 3.3. 8 mm çapında GFRP çubukların mekanik özellikler.....	11
Çizelge 3.4. 10 mm çapında GFRP çubukların mekanik özellikler.....	11
Çizelge 3.5. İnşaat demirin mekanik özellikleri .....	12
Çizelge 3.6. Makro sentetik Polipropilen liflerin özellikleri .....	13
Çizelge 3.7. MasterBrace SAT 4500 mekanik özellikleri .....	13
Çizelge 3.8. MasterBrace P3500 mekanik özellikleri.....	13
Çizelge 3.9. CFRP Mekanik Özellikleri.(Obaidat 2009).....	14
Çizelge 7.1. Basınç dayanımı.....	25
Çizelge 7.2. Yarmada çekme dayanımı .....	26
Çizelge 7.3. Eğilmede çekme dayanımı.....	27
Çizelge 7.4. Çekiç deney sonuçları.....	28
Çizelge 7.5. Ultrases deney sonuçlar .....	29
Çizelge 7.6. Dinamik elastisite modülü .....	30
Çizelge 7.7. Statik elastisite modülü.....	30

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Çalışma kapsamında kullanılmış olan simgeler ve kısaltmalar, açıklamalarıyla birlikte aşağıda verilmiştir.

### Simgeler

**mm**

**Kgf**

**Mpa**

**GPa**

**N**

### Açıklamalar

Milimetre

Kilo Gram Kuvvet

Megapaskal

Gegapaskal

Newton

### Kısaltmalar

**GFRP**

**CFRP**

**FRP**

**KS**

**KSL1**

**KSL2**

**KD**

**KDL1**

**KDL2**

**KF**

**KFL1**

**KFL2**

**KSK**

**KSL1K**

**KSL2K**

**KDK**

**KDL1K**

**KDL2K**

### Açıklamalar

Cam Fiber Kumaş

Karbon Fiber Kumaş

Fiber Takviyeli Polimer

Kiriş Sade

%0.4 Lifli beton

%0.8 Lifli beton

Kiriş Demirli

%0.4 Kiriş Lifli Demirli

%0.8 Kiriş Lifli Demirli

Kiriş Fiber

%0.4 Kiriş Lifli Fiber

%0.8 Kiriş Lifli Fiber

Kiriş Sade Kaplamalı

%0.4 Kiriş Sade Lifli Kaplamalı

%0.8 Kiriş Sade Lifli Kaplamalı

Kiriş Demirli Kaplamalı

%0.4 Kiriş Lifli Demirli Kaplamalı

%0.8 Kiriş Lifli Demirli Kaplamalı

## 1.GİRİŞ

Beton çeşitli avantajlara sahip olduğundan inşaatlarda en çok kullanılan yapı malzemelerden biridir. Üretiminin kolay olması, istenilen özelliklerde ve istenilen şekilde üretilebilmesi ve basınca karşı yüksek dayanım sağlayabilmesi betonu kullanışlı bir yapı malzemesi yapmaktadır. Bu kompozit malzeme birden fazla malzemelerin karışımından oluşmaktadır. Betonun bileşenleri ise agrega, çimento, su, hava, gerek duyulduğunda akışkanlaştırıcı ve çeşitli kimyasal malzemelerdir. Betonda agreganın kullanımı önemlidir. Hem ekonomik hem kolay bulunabilmesi, çimentoyla bağlanması, betonun içindeki boşlukları azaltabilmesi, çeşitli granülometri oranlarında kullanılabilmesi, betona dayanım kazandırması gibi özelliklere sahiptir. Geleneksel beton bilindiği gibi basınca karşı dayanıklılığını gösterirken çekmeye karşı çok düşüktür. Betonun çekme özelliğinin artırılması için çeşitli makro sentetik yeni nesil malzemeler kullanılmaktadır. Makro-sentetik lifler içeren betonlar üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Lif betonun içinde hacimce yüzde olarak ilave ederek araştırılmıştır. Betonun mekanik özellikleri tespit etmek için çeşitli testler yapılmıştır. Bu testler basınç deneyi, üç noktalı eğilme deneyi ve yarma deneyden ibarettir. Makro sentetik lif donatıları betonda hacimce çeşitli oranlarda kullanılmıştır. Betonarme kirişlerde makro sentetik lifler hacimce %0,5; %0,75 ve %1 olarak kullanılmıştır. (Altoubat 2020).

Bu tez çalışması iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamasında makro sentetik lif içeren ve içermeyen betonun mekanik özellikleri araştırılmıştır. Literatürde yapılan çalışmalara bakılarak özgün lif oranı düşünülmüştür. Bu deneysel çalışmada sade beton ve hacimce %0,4 ; %0,8 lifli beton hazırlanmıştır. 150x150x150 mm küp numuneler ve 100x100x500 mm'lik küçük kiriş numuneler üretilmiştir. Bu çalışmada çökme (Slump) deneyi, basınç deneyi, yarma deneyi, üç noktalı eğilme deneyi ve küp ultrason deneyi yapılmıştır. İkinci aşamasında 0,20x0,15 m kesitinde ve 1,24 m boyundan büyük kirişler üretilmiştir. Toplam 15 adet kiriş çeşitli parametrelerle üretilmiştir. Birinci grup toplam 3 adet kiriş (boyuna donatı ve etriye içermeyen) sade beton, %0,4 ve %0,8 betona lif ilavesiyle üretilmiştir. İkinci grup toplam 3 adet betonarme kiriş (boyuna donatısı ve etriyesi çelik) sade beton, %0,4 ve %0,8 betona lif ilavesiyle üretilmiştir. Üçüncü grupta toplam 3 adet betonarme kiriş (boyuna donatısı GFRP ve etriyesi çelik) üretilmiştir. Bunlar, sade betondan üretilen GFRP boyuna donatılı çelik etriyeli kiriş, içerisinde %0,4 oranında makro fiber lif içeren GFRP boyuna donatılı çelik etriyeli kiriş ve içerisinde %0,8 oranında makro fiber lif içeren GFRP boyuna

donatılı çelik etriyeli kiriş üretilmiştir. Dördüncü ve beşinci grup kirişler sırasıyla birinci ve ikinci grup kirişlerle aynı şekilde üretilmiş ve CFRP ile güçlendirilmiştir.

Bu tez çalışmasının amacı, makro sentetik donatıların kullanılması ile betonun zayıf mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, GFRP çubukların çelik donatıları ile karşılaştırılması ve CFRP ile yapılan güçlendirilmiş kirişlerin dayanımının araştırılmasıdır.

### Betonarme kirişler

Betonarme kirişler genelde dikdörtgen kesitli tercih edilmektedir. Kirişler gelen yükleri kolonlara aktarmaktadır. Betonarme kirişler gelen yükleri mesnetlere aktarırken eğilmeye maruz kalmaktadır. Kirişlerde tarafsız eksenin üst bölgesi basınca ve alt bölgesi çekmeye çalışmaktadır. Beton basınca dayanıklı olduğu için esas demir alt bölgeye konmaktadır.

### Betonarme yapıların güçlendirilmesi

Bir yapıdaki hasarsız taşıyıcı veya taşıyıcı olmayan yapı elemanlarının ya da hasarlı durumda bulunan yapı elemanlarının onarım yapılarak performanslarının iyileştirilmesine güçlendirme adı verilmektedir. Yapı elemanlarının güçlendirilmesindeki hedef, mevcut yapının depreme karşı performansının iyileştirilmesidir. Yapının güçlendirilmesiyle deprem esnasında beklenen hasar miktarının azaltılması amaçlanmaktadır.

### Lifli beton

Beton çeşitli avantajlarından dolayı yapılarda en çok kullanılan malzemedir. Ancak, beton gevrek bir malzemedir ve çekme dayanımı çok düşüktür. Betonun bu dezavantajlarını ortadan kaldırmak için makro sentetik lifler kullanılmaktadır. Beton içerisinde makro-sentetik liflerin kullanılması betona süneklik kazandırmakta ve betondaki çatlakları azaltmaktadır.

### GFRP çubuklar

Betonarme elemanlarda çelik donatı ve çelik etriyenin korozyona uğraması, inşaat yapılarında istenmeyen bir husustur. Günümüzde, cam fiber takviyeli polimerlerin (GFRP), korozyona karşı yüksek dayanıma sahip olması nedeniyle, demir donatının yerine kullanılabilmesi düşünülmektedir. Ayrıca, bu kompozit malzemelerin yüksek dayanımlı ve



hafif olması, buna karşılık iletken olmayan yapısı, endüstriyel alandaki araştırmacıların da dikkatini çekmiştir.(Yavuz 2011)

### CFRP kumaş

Günümüzde karbon fiber takviyeli kumaşlar (CFRP) yapılar da taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanların güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu yeni güçlendirme yöntemi betonarme elemanlara süneklik kazandırmaktadır.



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Altoubat ve diğerleri (2020), çalışmalarında makro-sentetik elyaf dozajı olarak %0,5; %0,75 ve %1 oranında elyaf kullanmışlardır. Test sonuçları, hasarlı betonarme kirişlerin EB-FRP kullanılarak yeniden donatılandırılmasının, kirişlerin orijinal kesme kapasitesini önemli ölçüde arttırdığını ve dayanım kazanımlarının makro sentetik liflerin miktarına bağlı olarak %50 ile %111 arasında değiştiğini göstermişlerdir.

Hasan ve diğerleri (2011), makro sentetik liflerle takviye edilmiş betonun mekanik davranışını belirlemek için yapılan diğer bir deneysel çalışmada dört çeşit numune hazırlamışlardır. Biri lifsiz ve geri kalan üçü hacimce sırasıyla %0,33; %0,42 ve %0,51'lik oranlarda lifli olarak üretmişlerdir. Basınç, çekme, kesme mukavemeti ve gerilme-şekil değiştirme ilişkileri gibi mekanik davranışları belirlemek için küp, prizma ve kiriş beton numuneler dökmüşlerdir. Test sonuçları, makro sentetik elyafın basınç dayanımını önemsiz derecede arttırdığını göstermiştir. Bununla birlikte, %0,33; %0,42 ve %0,51 hacim oranlarındaki makro sentetik lifler, kontrol numunesine kıyasla çekme mukavemetini sırasıyla en az %10, 15 ve %14 oranında iyileştirmiştir.

Ghahremannejad ve diğerleri (2018), çalışmalarında sentetik liflerle güçlendirilmiş beton kirişlerdeki çatlakları deneysel olarak araştırmışlardır. Hem tekli hem de çoklu çatlama senaryolarını değerlendirmek için boyuna donatılı ve donatısız beton kirişleri incelemişlerdir. Numuneleri hazırlamak için %0,5 ve %1'lik hacim oranlarında sentetik elyaf kullanılmış ve sonuçlar sentetik elyaf içermeyen beton kirişlerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, %1 sentetik elyaf kullanımının betonarme kirişlerin hasar yükünü arttırdığını, çatlak sayısını ve çatlak genişliğini azalttığını göstermiştir. Çatlaklar önemli ölçüde açıldığında, %1 fiber dozajlı kirişler, çatlak yerlerinde köprüleme etkisi oluşturmakta ve böylece beton kiriş daha yüksek yükleri taşıyabilmektedir.

Altoubat ve diğerleri (2009), çalışmalarında, etriye olmadan makro-sentetik elyaf takviyeli beton kirişlerin kesme davranışı araştırmışlardır. Çalışmada, makro sentetik lifler, hacimce % 0,50; 0,75 ve 1,0 oranlarında karışıma eklenmiştir. Makro sentetik liflerin eklenmesinin, kirişlerinin kesme mukavemetini ve sünekliğini önemli ölçüde iyileştirdiği, çatlama ve kırılma davranışını değiştirdiği gösterilmiştir.

Guerini ve diğeri (2018), çalışmalarında çelik (yüksek sertlik) ve makro-sentetik (düşük sertlik) liflerin betonun taze özellikleri üzerine etkisi, işlenebilirlik ve hava içeriği ile ortaya çıkan mekanik performans dikkate alınarak bir araştırma çalışması yapmışlardır. Farklı su-çimento oranlarına (0,45 ve 0,50) sahip iki çeşit betonda, iki hacim oranında (%0,5 ve %1,0) dört lif tipi üzerinde çökme testi, DIN akış tablosu testi ve hava muhtevası ölçer kullanılarak incelemişlerdir.

Kazmi ve diğeri (2019), çalışmalarında, makro sentetik elyaf takviyeli geri dönüştürülmüş agrega betonunun aksenal gerilme-şekil değiştirme davranışını araştırmışlardır.

Daneshfar ve diğeri (2017), polimer liflerin türü ve içeriğinin lif takviyeli betonun eğilme dayanımı, basınç dayanımı, dolaylı çekme dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmak için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu araştırmada, beton numuneleri sırasıyla 0,2; 0,4 ve 0,6 hacim oranlarında bükümlü, çubuklu ve lifli olmak üzere üç farklı polimer lif türü kullanmışlardır. Lif eklenmesiyle betonun eğilme ve çekme mukavemetinin arttığını, ayrıca betona lif ilavesinin basınç dayanımını ve elastisite modülünü azalttığını tespit etmişlerdir.

Hamrat ve diğeri (2020), fiber takviyeli polimer (FRP) levhaların/laminatların önceden çatlamış ve onarılmış betonarme kirişlerin eğilme bükülmesi üzerindeki etkisi üzerine deneysel ve sayısal çalışma sunmuşlardır. Çalışmalarında FRP takviye türleri (CFRP levha, GFRP levha ve CFRP laminat) ve FRP katman sayısını iki ana parametre olarak seçmişlerdir. Deneysel sonuçlar, kontrol kirişine (FRP'siz) kıyasla %13 ila %100 arasında değişen FRP'li, %15 ila %35 arasında değişen daha düşük orta açıklık deplasmanlar ile onarılmış betonarme kirişlerin nihai yük kapasitesinde bir gelişme olduğunu göstermektedir.

Almusallam ve diğeri (2000), çalışmalarında kirişlerin eğilme kapasitesini iyileştirmenin veya iyileştirmenin bir yolu olarak NSM çubuklarının etkinliğini deneysel ve sayısal olarak araştırmışlardır. Çalışmada incelenen parametreler, NSM çubuklarının tipini içermektedir. Dört nokta yükleme testi yardımıyla eğilme altında 16 kirişten oluşan toplam sekiz grup numuneyi test etmişlerdir.

Santhakumar ve diğeri (2004), çalışmalarında güçlendirilmiş betonarme kesme kirişlerinin davranışını simüle etmek için sayısal bir çalışmayı sunmuşlardır. Kontrol kirişi

olarak adlandırılan güçlendirilmemiş betonarme kiriş ve  $\pm 45^\circ$  ve  $90^\circ$  fiber yönelimli karbon fiber takviyeli plastik (CFRP) kompozitler kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişler üzerinde çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yapan ANSYS programını kullanmışlardır.

Al-Majidi ve diğerleri (2019), çalışmalarında çelik çubuklarla güçlendirilmiş ek yüksek performanslı fiber takviyeli jeopolimer beton (FRGC) katmanları kullanılarak yeni bir güçlendirme tekniği önermişlerdir. Bu tekniğin temel amacı, mevcut elemanların yapısal performansının iyileştirilmesi ve aynı zamanda güçlendirici tabakaların dayanıklılığının ve korozyon direncinin iyileştirilmesidir. Güçlendirilmiş FRGC katmanları ile güçlendirilmiş betonarme kirişler standart ve hızlandırılmış korozyon koşullarında incelemişlerdir. Sonuç olarak, FRGC ile güçlendirilmiş kirişlerin üstün performanslı oldukları tespit edilmiştir.

Irshidat ve diğerleri (2016), karbon nanotüplerin (CNT'ler) karbon fiber/epoksi kompozitlerle güçlendirilmiş betonarme (RC) kirişlerin güçlendirme verimliliğini artırmadaki etkisini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar, CNT ile modifiye edilmiş epoksi reçinenin kullanılmasının, kirişlerin nihai yükünü ve sertliğini arttırdığını göstermiştir.

Abdelkarim ve diğerleri (2019), eğilme yükü altında deforme olmuş cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) çubuklarla takviye edilmiş normal ve yüksek dayanımlı beton kirişlerin servis verilebilirliğini, mukavemetini ve deforme olabilirliğini araştırmak için bir çalışma sunmuşlardır. Test sonuçları, FRP takviye oranının, servis momenti üzerinde direnç momentinden daha büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Çubuk aralığının geniş kirişlerin davranışı üzerindeki etkileri de araştırılmış ve çubuk aralığı azaldıkça servis momentinin arttığını, beton mukavemeti arttığında ise dayanım momentinin arttığını ortaya koymuştur.

Aldhabir ve diğerleri (2018), eğilme yüküne karşı karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin davranışını Abaqus sonlu elemanlar programı ile modellemişlerdir.

Ustabaş ve diğerleri (2020), çalışmalarında mevcut bir yapıdan karot numuneler almışlar ve bu karot numuneleri CFRP ile sararak güçlendirmişlerdir. Daha sonra bu numunelerin basınç dayanımları ölçülmüşlerdir.

Goldston ve diğeri (2016), GFRP çubuklarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin statik ve dinamik yükler altındaki davranışını deneysel olarak incelemiştir.

Ruan ve diğeri (2020), GFRP (cam elyaf takviyeli polimer) çubuklar ve çelik çubukların bir kombinasyonu ile güçlendirilmiş altı betonarme kiriş ve sadece çelik çubuklarla güçlendirilmiş üç betonarme kiriş tasarlanmışlar ve test edilmişlerdir. Test edilen kirişlerin çeşitli eğilme davranışlarını analiz etmişler ve teorik modellerle karşılaştırmışlardır.

Ashour (2006), dört noktadan yükleme sistemine tabi tutulan cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) çubuklarla güçlendirilmiş 12 betonarme kirişi test etmiştir.

Refai ve diğeri (2015), çelik ve cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) çubukların kombinasyonu ile güçlendirilmiş altı adet betonarme kirişi incelemiştir.

Murthy ve diğeri (2020), GFRP çubuklarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin monotonik yükleme altında performansını analitik ve sayısal olarak araştırmışlardır.

Tavares ve diğeri (2008), çalışmalarında altı adet betonarme kirişi dört nokta eğilme testine tabi tutmuşlardır. Bir kirişi CA-50 çelik çubuklarla ve beş kirişi cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) çubuklarla güçlendirmişlerdir.

Ascione ve diğeri (2006), çalışmalarında GFRP (Cam Elyaf Takviyeli Polimer) ve CFRP (Karbon Elyaf Takviyeli Polimer) çubuklarla takviye edilmiş betonarme kirişlerin statik davranışını incelemiştir. Tüm deney programında iki farklı beton dayanımı ve iki farklı donatı yüzdesi dikkate alınmıştır. Nihai amaç, hem açıklık ortasındaki sehimleri hem de çatlak genişliklerini incelemektir.

Toutanji ve diğeri (2006), inorganik bir matris ile birleştirilmiş CFRP levhalarla dışarıdan güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme davranışını incelemiştir.

Esfahani ve diğeri (2007), çalışmalarında Karbon Fiber Takviyeli Polimerler (CFRP) levhalar kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin eğilme davranışını araştırmışlardır.

Hawileh ve diğeri (2014), kirişin alt yüzeyine, harici olarak yapıştırılmış CFRP levhaların,

kesmede yetersiz kirişlerin, yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır.

Taljsten (2003), çalışmasında önce geleneksel güçlendirme yöntemlerini kısaca anlatmış, ardından CFRP (Karbon Elyaf Takviyeli Polimerler) kompozitlerinin kesme güçlendirmesi için kullanımını anlatmıştır. CFRP levhalarla kesmede güçlendirilmiş kirişler üzerinde yapılan testler sunmuş ve CFRP ile kesme güçlendirmesinin nasıl tasarlanacağına dair kısa bir sunum yapmıştır.

Rousan ve diğerleri (2011), farklı sayıda ve konfigürasyonda CFRP levhalarla dıştan güçlendirilmiş dokuz betonarme kirişin statik ve hızlandırılmış yorulma testi performansını içeren deneysel ve analitik bir çalışmanın sonuçlarını sunmuşlardır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Malzeme ve Özellikleri

##### 3.1.1. Çimento

Bu deneysel çalışmada bağlayıcı malzeme olarak TS EN 197-1 (2012) standardına uygun CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır (Şekil 3.1). Çimentonun bazı özellikleri Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3. 1. Çimentonun kimyasal özellikleri

Oksit	Çimento
SiO <sub>2</sub>	18,86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,71
Fe <sub>2</sub> O	3,09
CaO	62,7
MgO	1,16
So <sub>3</sub>	2,39
Na <sub>2</sub> O+0.658 K <sub>2</sub> O	0,92
Cl <sup>-</sup>	0,01
Çözünmeyen kalıntı	0,32
Kızdırma kaybı	3,2
Serbest CaO	1,26

Çizelge 3. 2. Çimentonun mekanik özellikleri

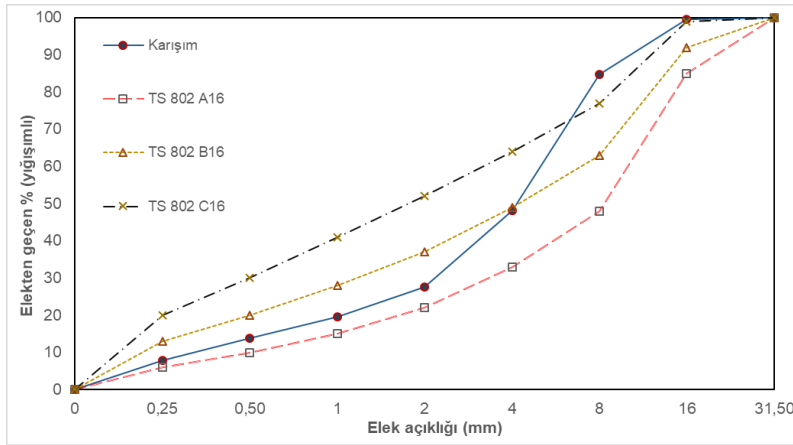
Fiziksel Özellikleri	
Özgül ağırlık	3,15
Özgül yüzey (Blaine, Cm <sup>2</sup> /g)	3530
0.045 mm elekte kalıntı (%)	7,6



Şekil 3.1. CEM I 42.5 R tipi portland çimentosu

### 3.1.2. Agrega

Bu çalışmada, Türkiye'nin İskenderun bölgesindeki taş ocaklarından elde edilen dolomit kireçtaşı kökenli agrega kullanılmıştır. Agreganın dane boyutları ince agrega için 0-4 mm , iri agrega için 4 - 11 mm dir (Şekil 3.3). Karışımda, ağırlıkça %60 oranında iri agrega ve %40 oranında ince agrega kullanılmıştır. Kullanılan agreganın granülometrisi Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3. 2. Agreganın granülometrisi



Şekil 3. 3. İri agrega (a), iri ve ince agrega karışımı (b), İri ve ince agreganın Lif ile karışımı (c)

### 3.1.3. Su

İskenderun şehir şebeke suyu kullanılmıştır.



### 3.1.4. GFRP donatı

Bu çalışma kapsamında GFPR çubuklar Şekil 3.4'te görüldüğü gibi kirişin çekme bölgesinde 10 mm çapında ve basınç bölgesinde 8 mm çapında FRP boyuna donatılar kullanılmıştır. Bu kirişlerde 100mm arayla 8 mm çaplı demir etriyeler kullanılmıştır. Mekanik özellikleri Çizelge 3.3 ve 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3. 3. 8 mm çapında GFRP çubukların mekanik özellikler

Elastisite modülü	71000 MPa
Poisson oranı	0,3
Çekme gerilmesi	1020 MPa

Çizelge 3. 4. 10 mm çapında GFRP çubukların mekanik özellikler

Elastisite modülü	65000 Mpa
Poisson oranı	0,3
Çekme gerilmesi	1450 Mpa



Şekil 3. 4. GFRP çubukların bağlanması

### 3.1.5. Çelik donatı

Bu çalışma kapsamında S420 inşaat demiri kullanılmıştır. Şekil 3.5'te görüldüğü gibi kirişin çekme bölgesinde 10 mm çapında ve basınç bölgesinde 8 mm çapında boyuna donatılar

kullanılmıştır. Bu kirişlerde 100mm arayla 8 mm çaplı demir etriyeler kullanılmıştır. Demirin mekanik özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3. 5. İnşaat demirin mekanik özellikleri

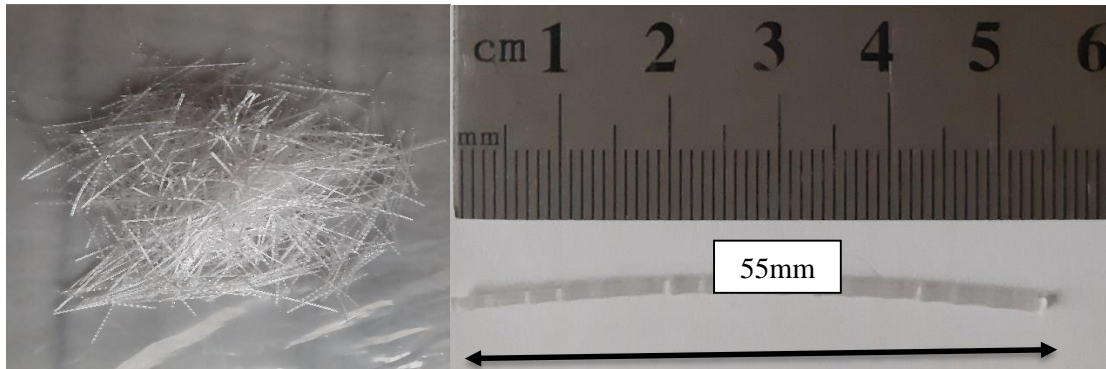
Elastisite modülü	210000 MPa
Poisson oranı	0,3
Akma gerilmesi	650 Mpa



Şekil 3. 5. Boyuna ve enine donatıların bağlanması

### 3.1.6. Makro sentetik polipropilen lif

Makro sentetik fiber donatıları, betonun içinde birincil ve ikincil donatı olarak kullanılmaktadır. Bu malzemelerin korozyona karşı herhangi bir riski olmadığı için beton içerisinde kullanılması beton dayanımına katkı sağlar. Ayrıca bu malzemeler, yapısal çatlakları önlemek için etkin rol almaktadır. Tünel, liman ve kıyı yapıları, barajlar, otopark ve beton yollar gibi çeşitli uygulama alanlarına sahiptir. Çeliğe göre daha hafif ve düşük nakliye maliyeti gibi üstün özellikleri bulunmaktadır. Bu çalışmada kullanılan makro sentetik lif Şekil 3.6'da görülmektedir. Çalışmada iki farklı oranda lif, beton karışımına eklenmiştir. Liflerin özellikleri Çizelge 3.6'da görülmektedir.



Şekil 3. 6. Makro sentetik lif

Çizelge 3. 6. Makro sentetik Polipropilen liflerin özellikleri

Özgül ağırlık	0,91 g/cm <sup>3</sup>
Ham madde	Polipropilen
Uzunluk	55 mm
Görünüm	Nervürlü
Çekme dayanımı	500-650 MPa
Uzama	9%
Elastisite modülü	5,85 GPa
Asit ve alkali dayanımı	Mükemmel direnç
Su emmesi	Yok
Erime noktası	165-175 C <sup>0</sup>

### 3.1.7. MasterBrace® SAT 4500

A ve B iki bileşenli, mukavemeti yüksek, epoksi esaslı özel yapıştırıcıdır. Uygulaması kolay mekanik dayanımı yüksek ve düşük viskoziteye sahip bir malzemedir. Mekanik özellikleri Çizelge 3.7’de verilmiştir.

Çizelge 3. 7. MasterBrace SAT 4500 mekanik özellikleri

Karışım yoğunluğu	1,02 kg/litre
Basınç dayanımı	>60 N/mm <sup>2</sup>
Eğilme dayanımı	>50 N/mm <sup>2</sup>
Yapışma dayanımı	>3,0 N/mm <sup>2</sup>

### 3.1.8. MasterBrace® P 3500

A ve B iki bileşenli, beton yüzeylere yüksek aderans kazandıran., epoksi esaslı yapıştırıcıdır. Uygulaması kolay mekanik dayanımı yüksek ve düşük viskoziteye sahip bir malzemedir. Mekanik özellikleri Çizelge 3.8’te verilmiştir.

Çizelge 3. 8. MasterBrace P3500 mekanik özellikleri

Karışım yoğunluğu	1,08 ± 0,024 kg/litre
Basınç mukavemeti	>60 N/mm <sup>2</sup>
Eğilme mukavemeti	> 20 N/mm <sup>2</sup>
Yapışma mukavemeti	>otc (betondan kopma)
Uygulama kalınlığı	0,1 – 0,2 mm

### 3.1.9. CFRP

Karbon fiber takviyeli kumaşların (CFRP) kullanımı günden güne artmaktadır. Yapılarda taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanların güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Bu yeni güçlendirme yöntemi betonarme elemanlara süneklik kazandırmaktadır. Bu çalışmada 0°/90° açısıyla tek katlı karbon fiber kullanılmıştır. Malzeme özellikleri Çizelge 3.9'da verilmiştir.

Çizelge 3. 9. CFRP Mekanik Özellikleri.(Obaidat 2009)

Malzeme	$E$ (Mpa)	$\nu_{23}$	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$	$E_{22}$ (Mpa)	$E_{33}$ (Mpa)	$G_{12}$ (Mpa)	$G_{13}$ (Mpa)	$G_{23}$ (Mpa)
CFRP	165000	0,3	0,3	0,3	0,45	9650	9650	5200	5200	3400

### 3.2. Karışım Oranları

Sade betonu üretmek için %60 iri agrega ve %40 ince agrega kullanılmıştır. Su çimento oranı 0,5 olarak seçilmiştir. Bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42,5 portland çimentosu kullanılmıştır. Lifli betonu üretmek için agrega, su ve çimento sabit tutularak karışımın hacimce %0,4 ve %0,8'i kadar makro sentetik lif eklenmiştir.

#### 3.2.1 Numune üretimi

Bu deneysel çalışmada 56 litrelik betonyer kullanılmıştır. Sade beton(KS) serisi için önce iri agrega ve ardından ince agrega terazide tartılmış ve betonyere eklenmiştir. İri ve ince agrega betonyerde 3 dakika süreyle karıştırılmıştır. Daha sonra çimento tartılarak betonyere eklenmiş ve 3 dakika karıştırılmıştır. Ardından su tartılıp ilave edilmiş ve 3 dakika süreyle karıştırılmıştır. Ve böylece betonun üretimi tamamlanmıştır. Üretilen beton 150x150x150 mm küp kalıplara, 100x100x500mm prizma kalıplara ve 200x150x1240mm kiriş kalıplara yerleştirilmiştir. 24 saat kalıplarda kaldıktan sonra 28 gün için suya bırakılmıştır. Lifli beton (KSL1 ve KSL2) serisi için iri, ince agrega, çimento ve su sabit tutularak hacimce %0,4 ve %0,8 lif eklenmiştir. Üretilen beton kalıplara yerleştirip 24 saat kalıplarda kaldıktan sonra 28 günlüğüne suya bırakılmıştır. Betonyer ve numuneler Şekil 3.7'de ve Şekil 3.8 'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 7. Beton karıştırıcısı (mikser)



Şekil 3. 8. Üretilen numuneler

## 4. BETONUN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Bu deneysel çalışmada çökme testi (slump), yarma deneyi, küp ultrason deneyi, eğilme deneyi ve çekiç deneyi yapılmıştır.

### 4.1. Çökme (Slump) Deneyi

Taze halde betonun kıvamını belirlemek için uygulanan deneydir. Slump deneyi için gerekli malzemeler çelik mala, çökme hunisi, başlık, çelik taban, metre ve şişleme çubuğu kullanılır. Çökme hunisi geniş tabanlı alta gelecek şekilde tepsiye yerleştirildikten sonra 1/3'ü taze beton ile doldurulur ve şişleme çubuğuyla 25 defa şişlenir. Bu işlem 3 defa tekrarlanır. Sonra huninin üst yüzeyi çelik malası ile düzeltir ve huni yavaşça yukarıya kaldırılır. Son olarak huninin üst yüzeyi betonun en yüksek noktasına olan uzaklık ölçülür. Elde edilen değer betonun çökme (Slump) değeri olarak belirlenir. Çökme testi Şekil 4.1'de verilmiştir. Çökme (Slump) deneyi TS EN 12350-2 ve ASTM C143 standartlarına uygun taze betonun kıvamı ve işlenebilirliği çökme hunisi ile yapılmıştır.

Lifli betonların kıvamı sade betona göre düşük çıktığı için akışkanlaştırıcı eklenmiştir ve beton kıvamı uygun hale getirilmiştir.



Şekil 4. 1. Slump testi.



## 4.2. Basınç Testi

Beton basınç dayanımı belirlemek için yapılan deneyde, EN 12390-1 / BS 1881:108 / ASTM C192, C39 / AASHTO T23, T126 / NF P18-400 standartlarına uygun küp kalıplarda numuneler hazırlanmıştır. 28 gün boyunca kür havuzunda bekletilen numuneler basınç deneyine tabi tutulmuştur. TS EN 12390-3 standardına uygun basınç dayanım deneyi yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 4.2'de verilmiştir.

Basınç dayanımı aşağıda verilen "Eş. 4.1" yardımıyla elde edilmiştir.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (4.1)$$

Burada;

$f_c$  Basınç dayanımı, MPa (N/mm<sup>2</sup>),

$F$  Kırılma anında maksimum yük, N,

$A_c$  Numunenin, en kesit alanı, mm<sup>2</sup>



Şekil 4. 2. Basınç deney düzeneği

## 4.3. Yarma Testi

Betonun çekme dayanımını dolaylı yoldan ölçebilmek için yarma deneyi yapılmıştır. Deneyde, 150x150x150 küp numuneler 28 gün kür havuzunda bekletilmiş ve 28 gün sonra sudan çıkarılıp teste tabi tutulmuştur. Yarmada çekme dayanımı aşağıda verilen "Eş. 4.2" yardımıyla elde edilmiştir. Deney düzeneği Şekil 4.3'de verilmiştir.

$$\sigma = \frac{2P}{\pi x a^2} \quad (4.2)$$

Burada;

P, basınç yükünü (N), ve a küp kenarlarının uzunluğunu (mm) ifade etmektedir.



Şekil 4. 3. Yarma deney düzeneği

#### 4.4. Eğilme Testi

Eğilmede çekme dayanımı belirlemek için prizmatik numuneler hazırlanmıştır. Boyutları ise 100x100x500mm olarak standarda uygun bir şekilde hazırlanmıştır. Eğilme dayanımı belirlemek için iki yöntem uygulanır. Birinci yöntem üç nokta yükleme deneyi, ikincisi ise dört nokta yükleme deneyidir. Bu çalışmada üç nokta yükleme deneyi yöntemi uygulanmıştır. Deney düzeneği Şekil 4.4'de verilmiştir. Eğilme dayanımı için aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$F_{cf} = \frac{3xFL_m}{2xd_1xd_2^2} \quad (4.4)$$

Burada;

$F_{cf}$ : Eğilme dayanımı(MPa)

$F$ : En büyük yük (N)

$d_1$   $d_2$ : Numunelerin boyutları(mm)





Şekil 4. 4. Üç nokta yükleme deney düzeneği

#### 4.5. Schmidt Çekiç Testi

ASTM C 805 standardına uygun Schmidt çekiçi deneyi betonun basınç dayanımını yaklaşık olarak bulmada kullanılan tahribatsız bir yöntemdir. Bu yöntem bize yaklaşık bir beton basınç dayanımı sonucu vermektedir. Bu çalışma kapsamında çekiç testi yapılmıştır. Şekil 4.5’de Schmidt Çekiç Testi görülmektedir.



Şekil 4. 5. Schmidt çekiçi deneyi

#### 4.6. Ultrases Deneyi

Tahribatsız beton dayanım ölçme testlerinden birisi olan Ultrases testi beton hakkında mekanik bilgiler verebilmektedir. Bu bilgiler kesin değerler olmamakla birlikte beton

hakkında bir ön bilgi mahiyetindedir. Bu yöntemde, beton içerisinde geçen ses dalgalarının hızlarından yararlanılarak betonun dinamik elastisite değerleri aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilmektedir. Şekil 4.6'da beton için Ultrases Deneyi görülmektedir.

$$E_d = \frac{v^2 n (1 + \mu)(1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} (10^{-6}) \quad (4.5)$$

Burada;

$E_d$  : Dinamik elastisite modülü,(MPa)

$v$  : Puls hızı,(m/sn)

$n$  : Betonun birim ağırlığı,(kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$  : Poisson oranı

olarak tanımlanır.



Şekil 4. 6. Ultrases deney düzeneği

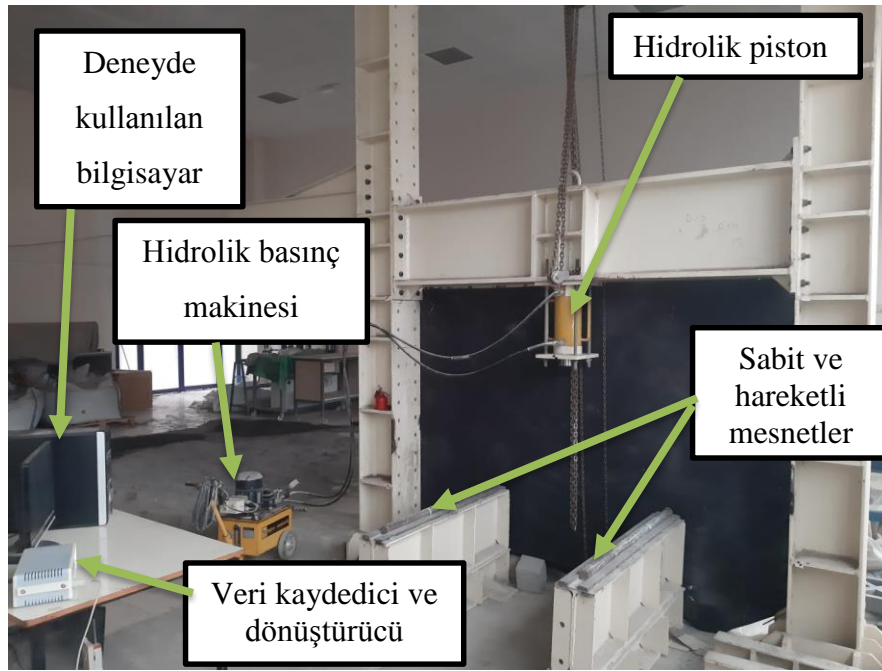
#### 4.7. Statik Elastisite Modülü

TS 500 standartlarına uygun statik elastisite modülü, 28 günlük kür havuzunda bekletilen küp numunelerin basınç dayanımından yararlanarak aşağıdaki formülden elde edilmiştir.

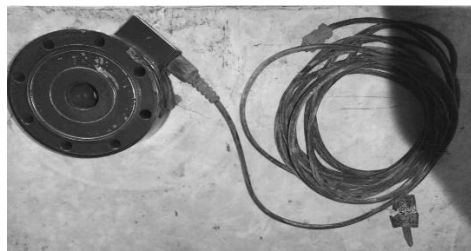
$$E = 14000 + 3250 \times \sigma^{\frac{1}{2}} \quad (4.6)$$

## 5. BÜYÜK KİRİŞLERİN DÖRT NOKTALI EĞİLME DENEYİ

Bu tez çalışmada kirişlerin dört noktali eğilme deneyi yapılmıştır. Yük çerçevesi ve deneyi düzeneği şekil 5.1’de, yük hücresi ise Şekil 5.2’de görülmektedir. Güçlendirilmemiş ve güçlendirilmiş betonarme kirişlerin yük-deplasman ilişkisi incelenmiştir. Betonarme kirişler ve CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin A-A kesiti Şekil 6.1 ve 6.2’de verilmiştir. Toplam 15 adet kiriş üretilmiştir. Kirişlerin kesit ve numune detayları Şekil 6.1, 6.2 ve 6.3’te verilmiştir.



Şekil 5.1. Yük çerçevesi .



Şekil 5.2. Deneyde kullanılan yük hücresi

### 5.1. Birinci Grup Kiriş Deneylei

Bu grupta 3 adet kiriş bulunmaktadır. Donatı içermeyen bu kirişler, geleneksel beton(KS), hacimce %0.4(KSL1) ve %0.8(KSL2) oranlarda lif içeren lifli beton kirişler üretilmiştir. Şekil 6.3’te verilmiştir.

### 5.2. İkinci Grup Kiriş Deneyleri

Bu gruptaki numuneler, sade beton (KD) , hacimce %0.4 (KDL1) ve %0.8 (KDL2) oranlarında lif içeren lifli betonarme kirişlerdir. Bu kirişlerde donatı olarak inşaat demiri kullanılmıştır. Basınç bölgesinde 8mm çapında ve çekme bölgesinde 10mm çapında inşaat demiri kullanılmıştır. Ertiyeler kiriş içerisinde 100 mm aralıklarla yerleştirilmiştir (Şekil 6.1).

### 5.3. Üçüncü Kiriş Deneyleri

Sade beton(KF) , hacimce %0.4 (KFL1) ve %0.8 (KFL2) oranlarla lifli betondan üretilen bu kirişlerde demir etriyeler ve GFRP donatılar kullanılmıştır. Basınç bölgesinde 8 mm ve çekme bölgesinde 10 mm çapında GFRP donatılar kullanılmıştır. Enine donatılar (etriye) 100 mm arayla 8'lik inşaat demiri kullanılmıştır. Şekil 6.3'te görülmektedir.

## 6. BÜYÜK KİRİŞLERİN CFRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ

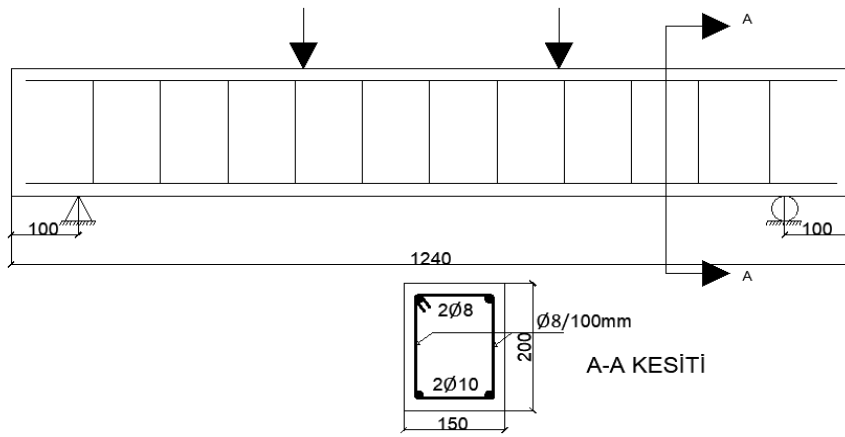
CFRP ile güçlendirilme işlemi, yapı güçlendirmesinin bir çeşididir. Bu çalışmada, güçlendirmenin etkisinin anlaşılabilmesi için, birinci, ikinci ve üçüncü grup numunelerin alt yüzeyleri CFRP ile güçlendirilmiştir. Bu kirişlerde 0°/90° tek katlı karbon fiber kumaş kullanılmıştır. Önce kirişlerin alt yüzeyi temiz hale getirilmiştir. Sonra MasterBrace P 3500 epoksi esaslı, iki bileşenli, özel olarak geliştirilmiş astar malzemesi el yatırma yöntemiyle kirişin alt yüzeyine sürülmüştür. A bileşeni 2,76 Kg ve B bileşeni 1,24 Kg olarak tarttırılmış ve matkap karıştırıcı kullanarak homojen karışım elde edildikten sonra yüzeye serilmiştir. Astar iyice kuruduktan sonra CFRP kumaşı yapıştırmak için MasterBrace SAT 4500, iki bileşenli, yüksek dayanımlı, epoksi esaslı özel yapıştırıcı kullanılmıştır. A bileşeni 3,73 Kg ve B bileşeni 1,27 Kg olarak tarttırılmış ve matkap karıştırıcı kullanarak homojen karışım elde edildikten sonra yüzeye rulo ile sürülmüştür. Ardından 1000x150 mm boyutunda tek katlı karbon fiber kumaşı yapıştırılmıştır. Daha sonra yüzeyi sert rulo ile iyice bastırılarak hava boşlukların kalmaması için özen gösterilmiştir.

### 6.1. Dördüncü Grup Kiriş Deneyleri

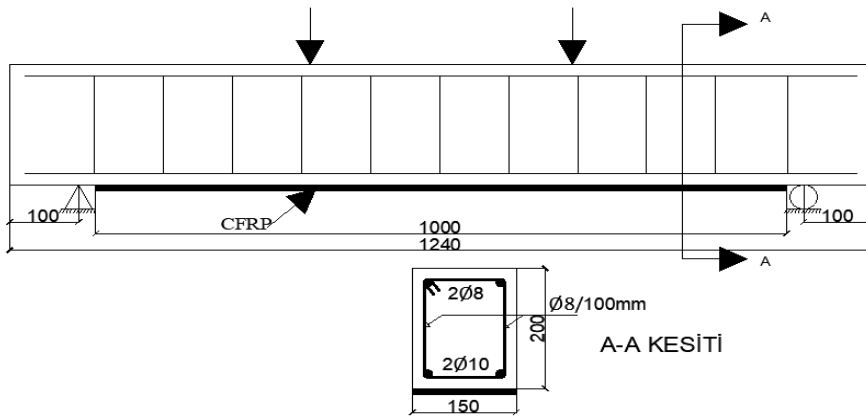
Bu grupta birinci gruptaki numuneler CFRP kumaş ile güçlendirilmiştir. Bu gruptaki numuneler Şekil 6.3'te görüldüğü gibi KSK, KSKL1 ve KSKL2 olarak kodlanmıştır. Bu numunelerin çekme bölgesinde 1000x150mm alana sahip CFRP kumaş kullanılmıştır.

### 6.2. Beşinci Grup Kiriş Deneyleri

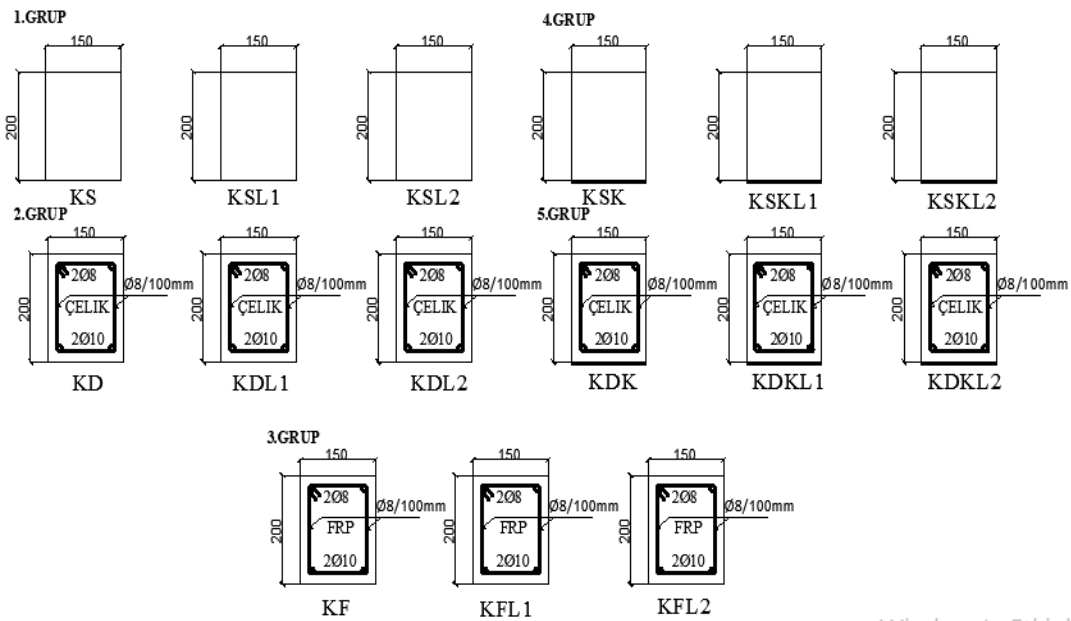
Bu grupta ikinci gruptaki numuneler CFRP kumaş ile güçlendirilmiştir. Bu gruptaki numuneler şekil 6.3'te görüldüğü gibi KDK, KDKL1 ve KDKL2 olarak kodlanmıştır. Bu numunelerin basın bölgesinde mesnetlerin 25mm içe doğru 1000x150mm alan ile CFRP kumaş kullanılmıştır.



Şekil 6. 1. Betonarme kirişlerin A-A kesiti



Şekil 6. 2. CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin A-A kesiti



Şekil 6. 3. Üretilen numune çeşitleri, detayı ve kesitleri

## 7. SONUÇLAR VE BULGULAR

Bu tez çalışmasının birinci aşamasında üretilen lifli ve lifsiz betonun mekanik davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesi için bazı standart mekanik testler yapılmıştır. İkinci aşamasında ise 150X200X1240 mm boyutlarındaki büyük kirişlerin statik yük altında eğilme dayanımı araştırılmıştır. Yük-deplasman ilişkisi incelenmiştir.

### 7.1. Betonun Mekanik Özellikleri

Birinci aşamada üretilen lifli ve lifsiz betonun mekanik davranışlarının daha iyi anlaşılabilmesi için bazı standart mekanik testler yapılmıştır. Yapılan deneylerin sonuçları aşağıda verilmiştir.

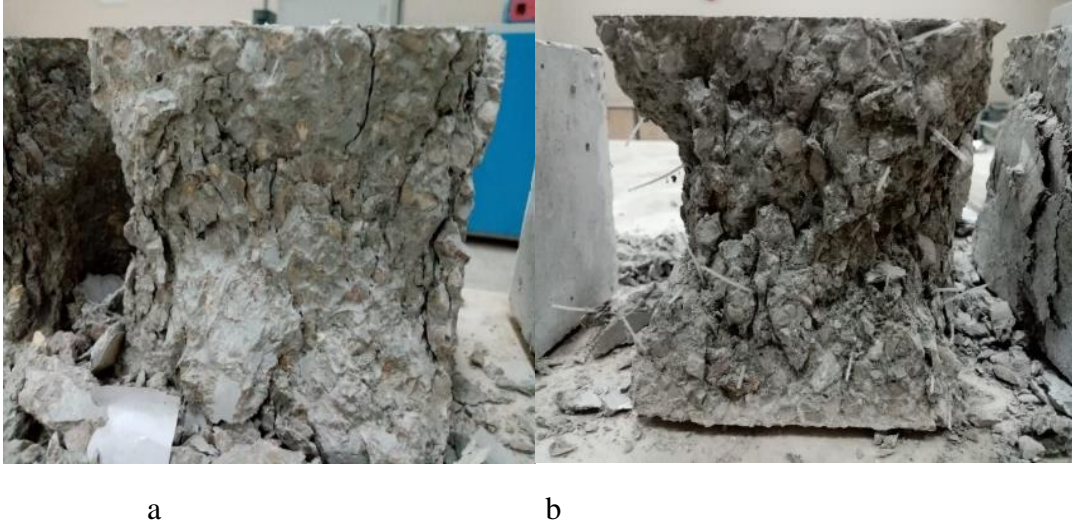
#### 7.1.1. Basınç deneyi

150x150x150 mm küp numuneler üzerine yapılan basınç testin sonucu çizelge 7.1’de verilmiştir.

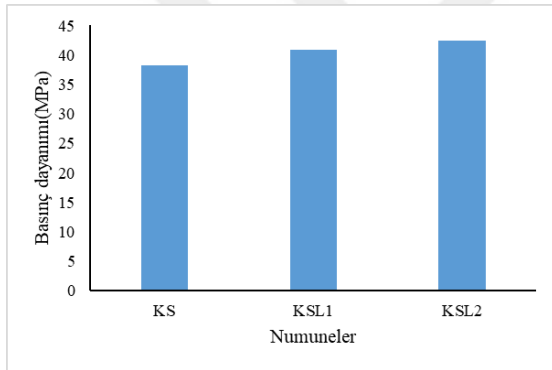
Çizelge 7. 1. Basınç dayanımı

Numune	Basınç dayanımı (MPa)
KS	38,232
KSL1	40,832
KSL2	42,472

Basınç deneyi sonucunda Çizelge 7.1 ve Şekil 7.2’de elde edilen değerler incelendiğinde, lif katkısının belli oranlarda kullanılmasının betonun basınç dayanımını arttırdığı görülmektedir. Şekil 7.1’de basınç altında lifli ve lifsiz betonun kırıldıktan sonraki durumu görülmektedir.



Şekil 7. 1. Basınç altında sade beton (a) basınç altında lifli beton (b)



Şekil 7. 2. Basınç dayanımı grafiği

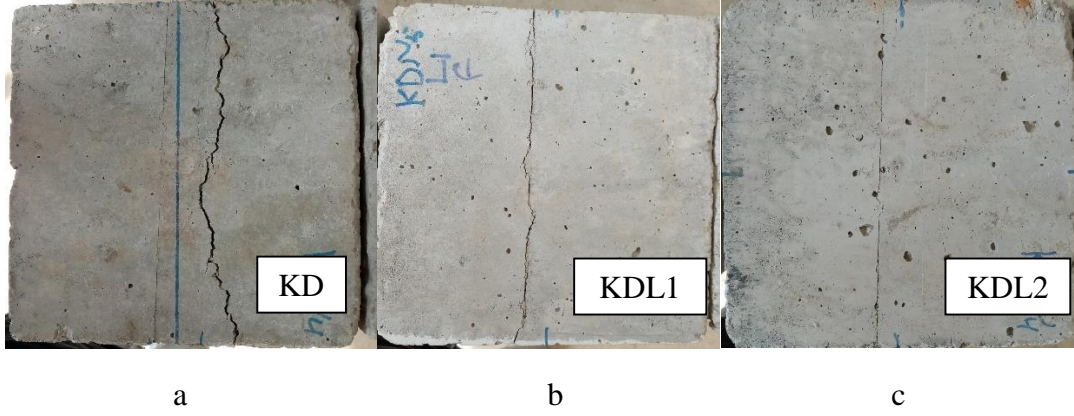
### 7.1.2. Yarma deneyi

150x150x150 mm küp numuneler üzerine yapılan yarma testin sonucu Çizelge 7.2'de verilmiştir.

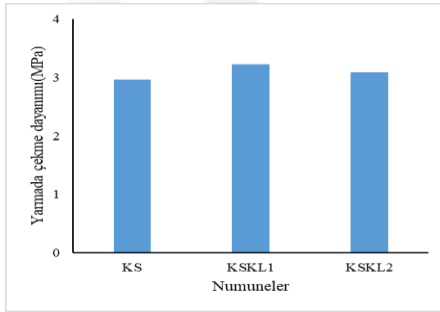
Çizelge 7. 2. Eğilmede çekme dayanımı

Numune	Basınç dayanımı (MPa)
KS	2.966
KSKL1	3.227
KSKL2	3.086





Şekil 7. 3. Yarma deneyi KD(a) Yarma deneyi KDL1(b) Yarma deneyi KDL2(c)



Şekil 7. 4. Yarmada Çekme Dayanımı

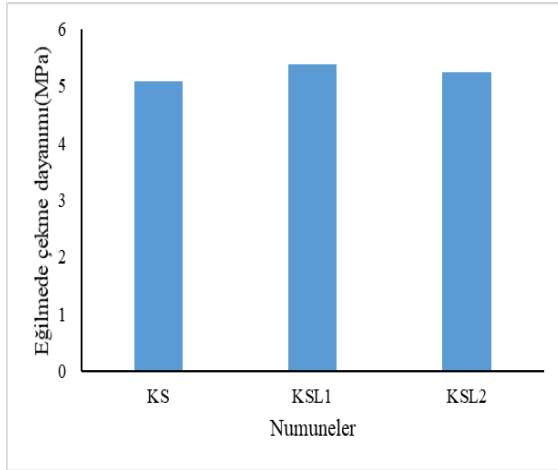
Yarma deneyi sonucunda Çizelge 7.2 ve Şekil 7.4'te elde edilen değerler incelendiğinde, beton içerisinde lif katkısının kullanılmasının betonun çekme dayanımını arttırdığı görülmektedir. Ancak lif miktarının daha fazla arttırılmasının çekme dayanımını daha fazla arttırmadığı hatta biraz düşürdüğü tespit edilmiştir. Şekil 7.3'te görüldüğü gibi, lif oranı arttığında çatlak genişlikleri azalmaktadır.

### 7.1.3. Eğilme deneyi

Eğilmede çekme dayanımı belirlemek için 100x100x500mm prizmatik numuneler hazırlanmıştır. Sonuçlar çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7. 3. Eğilmede çekme dayanımı

Numune	Basınç dayanımı (MPa)
KS	5,076
KSL1	5,375
KSL2	5,242



Şekil 7. 5. Eğilmede çekme dayanımı

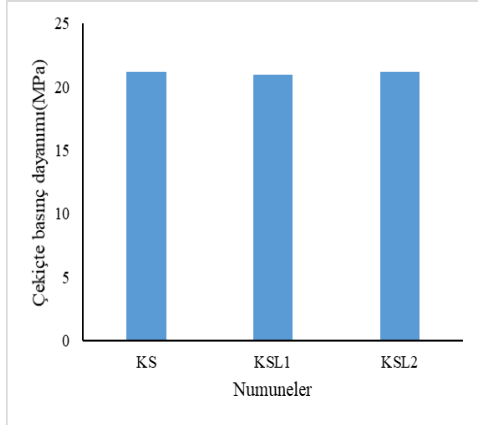
Eğilme deneyi sonucunda Çizelge 7.3 ve Şekil 7.5'te elde edilen değerler incelendiğinde, lif katkısının belli oranlarda kullanılmasının betonun eğilme dayanımını arttırdığı görülmektedir. Ancak lif miktarının daha fazla arttırılmasının eğilme dayanımını olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.

#### 7.1.4. Schmidt çekiç testi

ASTM C 805 standardına uygun Schmidt çekiç deneyi betonun basınç dayanımını yaklaşık olarak bulmada kullanılan tahribatsız bir yöntemdir. Bu yöntem bize yaklaşık bir beton basınç dayanımı sonucu vermektedir. 150x150x150 mm küp numuneler üzerine yapılan çekiç testin sonuçları Çizelge 7.4'te verilmiştir.

Çizelge 7. 4. Çekiç deney sonuçları

Numune	Basınç dayanımı (MPa)
KS	21.150
KSL1	20.959
KSL2	21.146



Şekil 7. 6. Schmidt çekici sonuçları



Şekil 7. 7. Schmidt çekici deneyi düzeneği

Schmidt çekici deneyi sonucunda, Çizelge 7.4 ve Şekil 7.6'de görüldüğü gibi lif miktarının artmasının betonun basınç dayanımını çok fazla etkilemediği görülmektedir.

### 7.1.5. Ultrases deneyi

Bu yöntem ile, beton içerisinden geçen ses dalgalarının hızlarından yararlanılarak betonun dinamik elastisite değerleri formül kullanılarak elde edilmiştir. Ultrases testin sonuçları Çizelge 7.5'te verilmiştir. Betonun dinamik elastisite modülü "Eş. 4.5" elde edilen sonuçlar Çizelge 7.6'de verilmiştir.

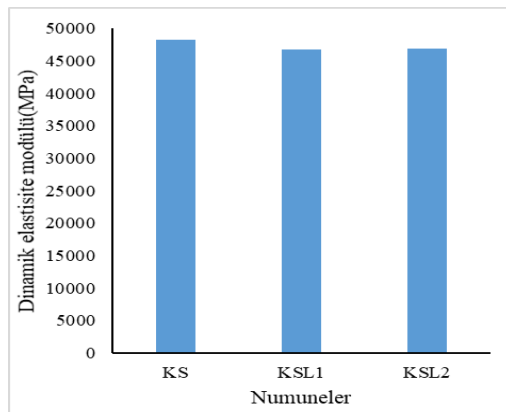
Çizelge 7. 5. Ultrases deney sonuçları

Numune	Dalga hızı m/s
KS	4809.313
KSL1	4756.062
KSL2	4750.982

Çizelge 7. 6. Dinamik elastisite modülü

Numune	Dinamik elastisite modülü (MPa)
KS	48207.500
KSL1	46829.770
KSL2	46901.420

Çizelge 7.6 ve Şekil 7.8’de görüldüğü gibi lif miktarının artmasının betonun dinamik elastisite modülünü çok fazla etkilemediği görülmektedir.



Şekil 7. 8. Dinamik elastisite modülü

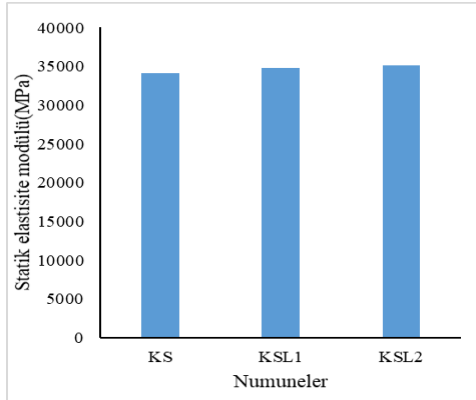
### 7.1.6. Statik elastisite modülü

TS 500 standartlarına uygun statik elastisite modülü 28 günlük kür havuzunda bekletilen küp numunelerin basınç dayanımından "Eş. 4.6" elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 7.7’de verilmiştir.

Çizelge 7. 7. Statik elastisite modülü

Numune	Statik elastisite modülü (MPa)
KS	34094.75
KSL1	34764.25
KSL2	35180.25

Çizelge 7.7 ve Şekil 7.9’da görüldüğü gibi lif miktarının artması betonun statik elastisite modülünü az da olsa arttırmaktadır.



Şekil 7. 9. Statik elastisite modülü değerlerinin karşılaştırılması

### 7.1.7. Betonun gerilme şekil değiştirme eğrisi

Bu deneysel çalışmada, betonun gerilme şekil değiştirme eğrisi, üretilen küp numunelerden faydalanarak elde edilen dayanım değerlerinin kullanılmasıyla belirlenmiştir. Çalışmada KS, KSL1 ve KSL2 olmak üzere üç tip beton için ayrı ayrı gerilme şekil değiştirme grafikleri Şekil 7.10-11-12’de verilmiştir.

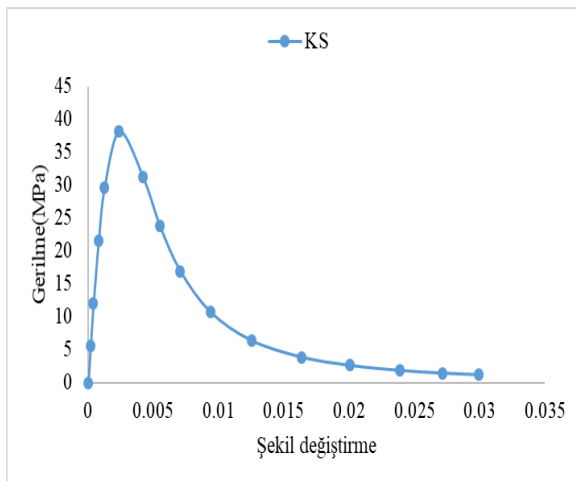
$$\sigma_c = \frac{E_c \varepsilon_c}{1 + (R + R_E - 2) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right) - (2R - 1) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^2 + R \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^3} \quad (6.1)$$

$$R_E = \frac{E_c}{E_0} \quad (6.2)$$

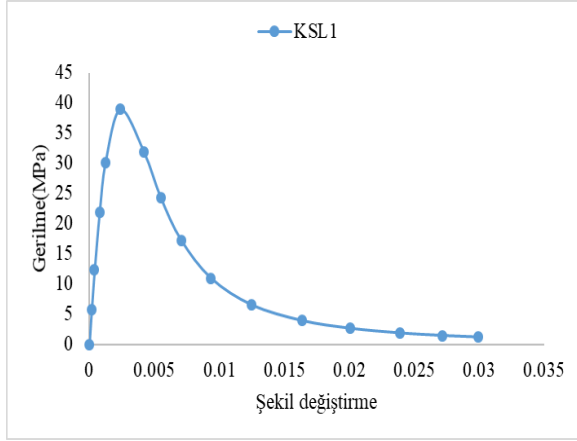
$$E_0 = \frac{f'_c}{\varepsilon_0} \quad (6.3)$$

$$R = \frac{R_E (R_\sigma - 1)}{(R_E - 1)^2} - \frac{1}{R_\sigma} \quad (6.4)$$

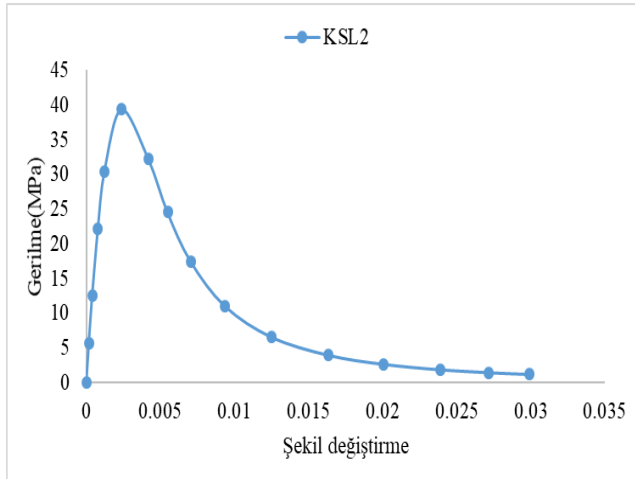
Burada  $R_E = 4$  ve  $R_\sigma = 4$  olarak sabit kabul edilmiştir (Obaidat 2009).



Şekil 7. 10. KS betonun gerilme şekil değiştirme grafiği



Şekil 7. 11. KSL1 betonun gerilme şekil değiştirme grafiği



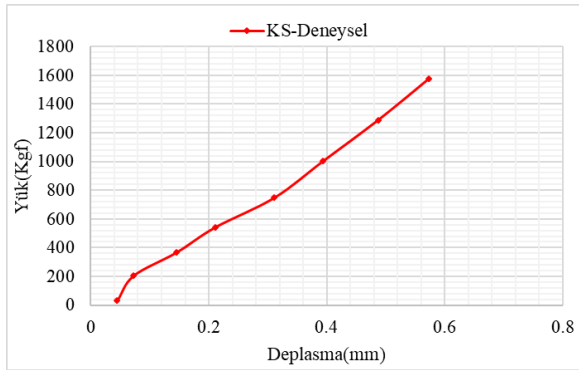
Şekil 7. 12. KSL2 betonun gerilme şekil değiştirme grafiği

## 7.2. Büyük Kirişlerin Eğilme Deneyi Sonuçları

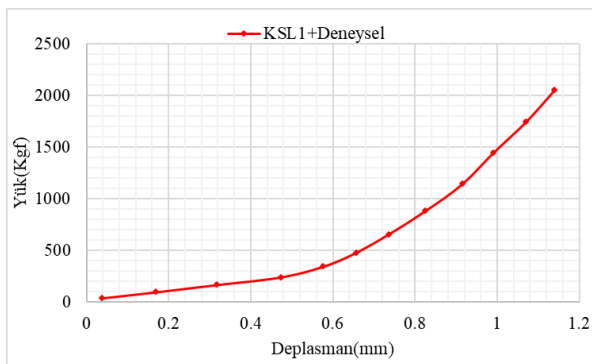
Bu deneysel çalışmada, lifli ve lifsiz sade beton ve betonarme kirişler üretilmiştir. Betonarme kirişlerde demir ve GFRP donatılar kullanılmıştır. Tüm betonarme kirişlerde demir etriye kullanılmıştır. Deneylerde beş grup kiriş çeşidi mevcuttur. Numunelerin detayları verilmiştir (Bkz. Şekil 6.1-2-3).

### 7.2.1. Birinci grup kiriş deney sonuçları

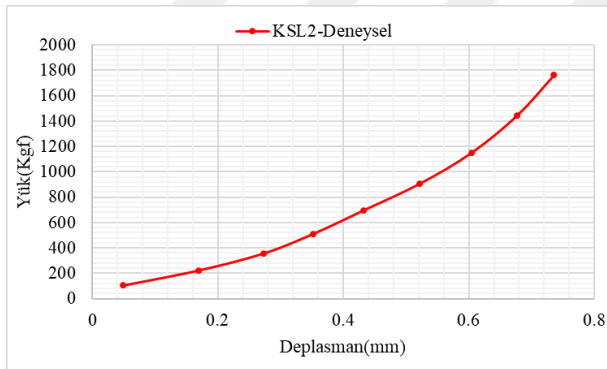
Bu gruptaki 3 adet kiriş bulunmaktadır. Donatı içermeyen bu kirişler, geleneksel beton (KS), hacimce %0,4 (KSL1) ve %0,8 (KSL2) oranlarında lif içeren betondan kirişler üretilmiştir. Yük deplasman grafiği sırasıyla Şekil 7.13-14 ve 15’de verilmiştir.



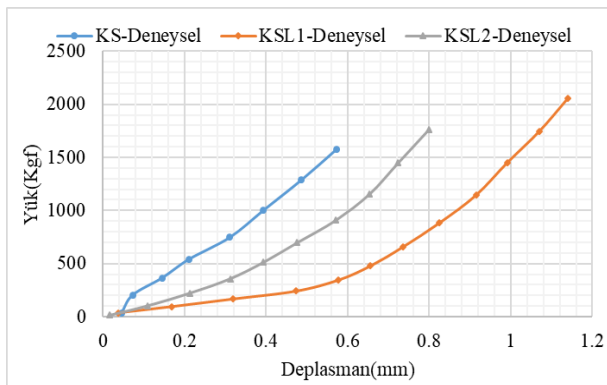
Şekil 7. 13. KS yük-deplasman grafiği



Şekil 7. 14. KSL1 yük-deplasman grafiği

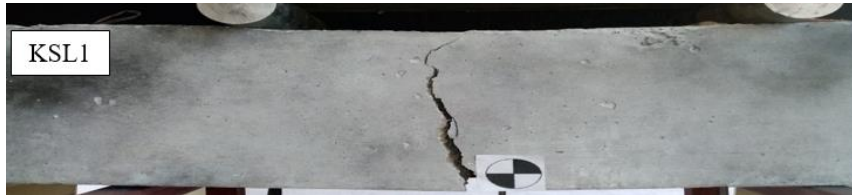


Şekil 7. 15. KSL2 yük-deplasman grafiği



Şekil 7. 16. KS-KSL1-KSL2 yük-deplasman grafiği

Şekil 7.16'da KS-KSL1-KSL2 numuneleri için elde edilen yük-deplasman grafiği görülmektedir. Yük deplasman grafiğine bakıldığında, hacimce %0,4 lif ilavesiyle KSL1 kirişi KS kirişe göre daha fazla yük alırken aynı zamanda %0,8 oranında lif içeren KSL2 numunesinden de fazla yük taşımaktadır. Sonuç olarak betona uygun oranda lif ilavesi dayanımı arttırırken gereğinden fazla lif ilave etmekle betonda dayanım azalabilmektedir. Bu duruma sebep olarak, lif miktarının artması ile beton içerisinde hava boşluklarının oluştuğu düşünülmekte ve lif miktarının artması ile beton içerisinde lif topaklanması meydana gelerek beton homojenliğinin bozulmasına sebep olması gösterilebilir. Burada etriye ve donatı olmadan makro-sentetik elyaf takviyeli beton kirişlerin kesme dayanımı sade betona göre iyileştirilmiştir. Çalışmada, makro sentetik lifler, hacimce %0,4 oranında karışıma eklenince, kirişlerin kesme mukavemetini ve sünekliğini önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür. Betonun ani kırılma davranışı inşaat yapılarında istenmeyen bir husustur. Oluşan bu gevrek davranışı ortadan kaldırmak için makro sentetik lifler kullanılmaktadır. KS kirişin yük altında ani kırılma davranışı göstererek iki parçaya bölünmüştür. KSL1 ve KSL2 kirişleri ise makro sentetik liften dolayı sünek davranış göstermiştir. Şekil 7.17 ve Şekil 7.18 incelendiğinde lif oranı fazla olan kirişte büyük çatlaklar meydana gelmiştir. Diğer yandan lif, betonla birlikte çalışmış ve aderans özelliğini iyi yönde korumuştur.



Şekil 7. 17. Yük altında KSL1 kirişi



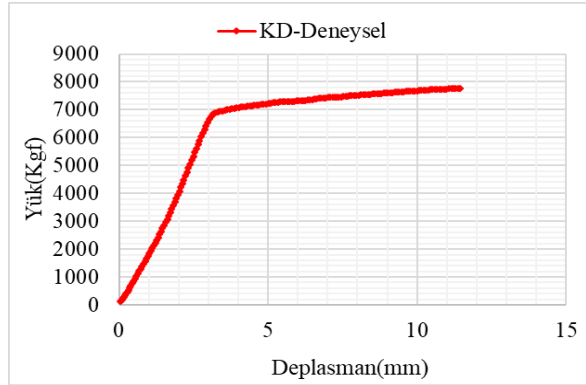
Şekil 7. 18. Yük altında KSL2 kirişi

### 7.3.2 İkinci grup kiriş deney sonuçları

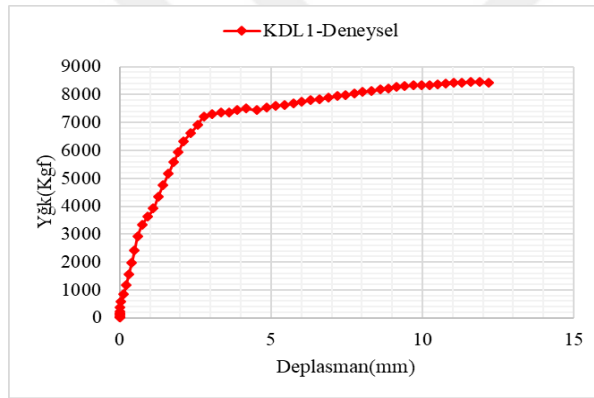
Bu gruptaki numuneler, sade beton (KD) , hacimce %0,4 (KDL1) ve %0,8 (KDL2) oranlarında lifli betondan üretilen bu kirişler etriye ve boyuna inşaat demir donatılarıyla güçlendirilmiştir (Şekil 7.23-24-25). Basınç bölgesinde 8 mm çapında ve çekme bölgesinde



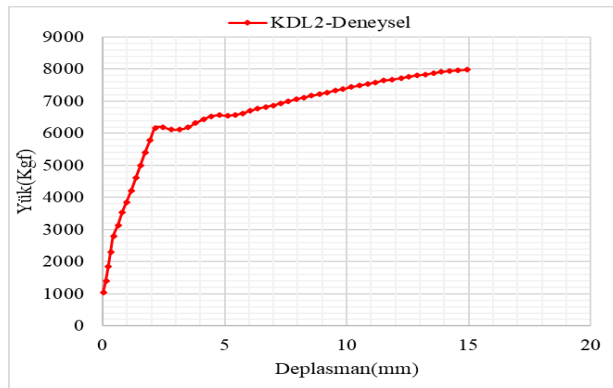
10 mm çapında inşaat demiri kullanılmıştır. Etriye olarak 100 mm arayla yerleştirilen 8 mm çapında demir kullanılmıştır (Şekil 6.1).



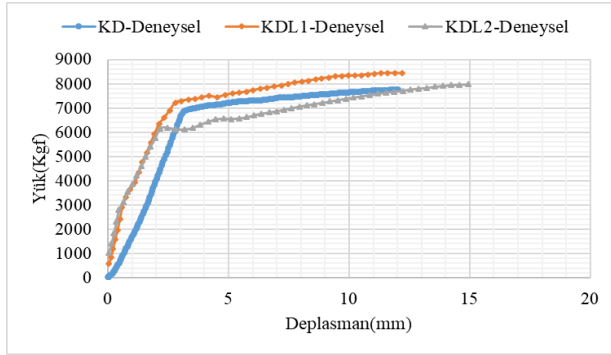
Şekil 7. 19. KD yük-deplasman grafiği



Şekil 7. 20. KDL1 kirişi için yük-deplasman grafiği



Şekil 7. 21. KDL2 kirişi için yük-deplasman grafiği

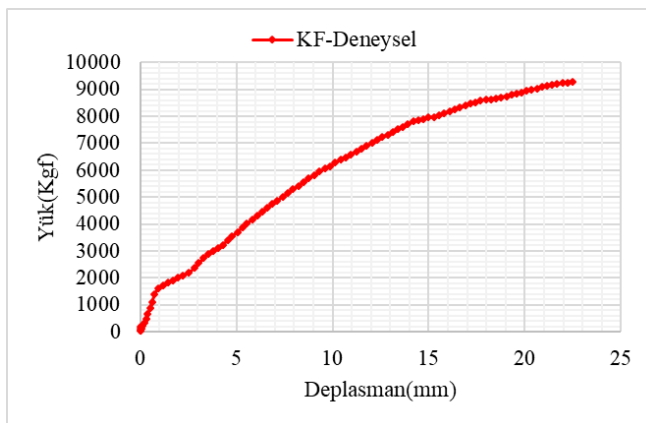


Şekil 7. 22. KD-KDL1-KDL2 yük-deplasman grafiği

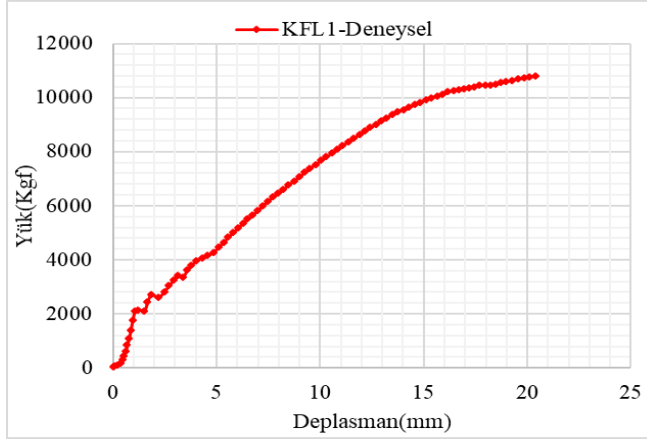
Şekil 7.22 'de KD-KDL1-KDL2 betonarme kirişlerin yük deplasman grafiğine bakıldığında, hacimce %0,4 lif ilavesiyle KDL1 kirişi KD kirişe göre fazla yük almaktadır. KDL2 kirişinin lif içeriği fazladır. Lif oranının fazla olması sebebiyle KDL2 kirişi KDL1 kirişine göre daha az yük almaktadır. Lif oranı fazla olduğu için KDL2 kirişinde lif topaklanması ve fazladan hava boşluklarının meydana gelmesi ile beton homojenliği bozulmuştur. Bu sebeple beton içerisindeki liflerin homojen dağılmaması betonun yük alma kapasitesini ve dayanımını olumsuz etkilemektedir. Diğer yandan KDL2 kirişi KD ve KDL1'ye göre fazla deplasman yapmıştır.

### 7.3.3. Üçüncü grup kiriş deney sonuçları

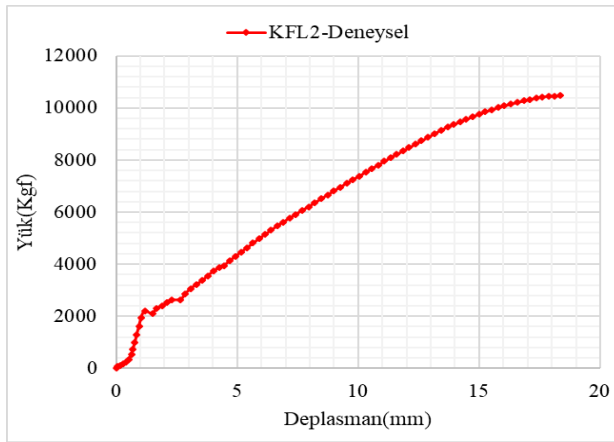
Sade beton (KF) , hacimce %0,4 (KFL1) ve %0,8 (KFL2) oranlarında lifli betondan üretilen bu kirişlerde demir etriyeler ve GFRP donatılar kullanılmıştır. Basınç bölgesinde 8 mm çapında ve çekme bölgesinde 10 mm çapında FRP donatılar kullanılmıştır. Etriye olarak 100 mm arayla 8 mm çapında inşaat demiri kullanılmıştır.



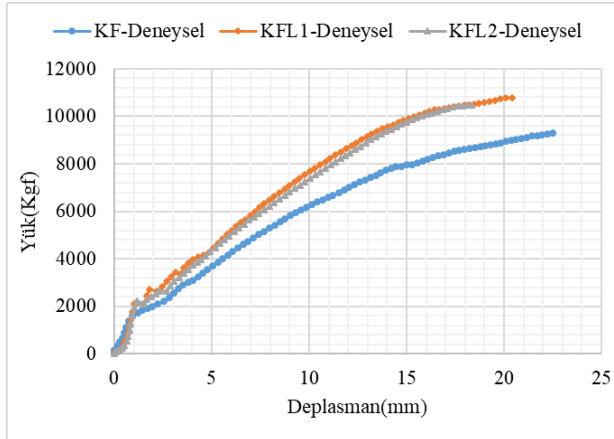
Şekil 7. 23. KF yük-deplasman grafiği



Şekil 7. 24. KFL1 yük-deplasman grafiği



Şekil 7. 25. KFL2 yük-deplasman grafiği



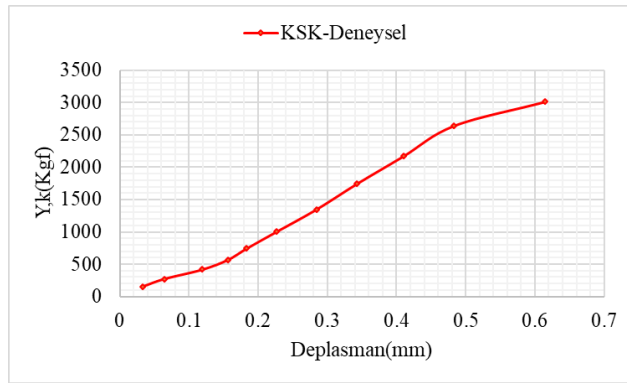
Şekil 7. 26. KF-KFL1-KFL2 yük-deplasman grafiği

Şekil 7.26'da görülen KF-KFL1-KFL2 kirişlerinin yük deplasman grafiği ile Şekil 22'de görülen KD-KDL1-KDL2 kirişlerinin yük deplasman grafiği birlikte incelendiğinde, GFRP donatılı betonarme kirişin davranışı ile çelik donatılı betonarme kirişin davranışının farkı açıkça görülmektedir. GFRP çubuklar, çelik donatılı kirişe göre daha esnek bir davranış sergilemiştir. Dayanım açısından, GFRP betonarme kirişin çelik donatılı betonarme kirişe

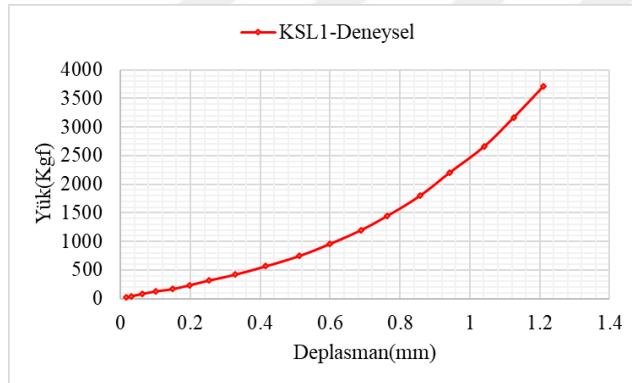
göre daha olumlu etki gösterdiği tespit edilmiştir. Diğer yandan, %0,4 oranında lifin ilave edilmesiyle elde edilen KFL1 kirişi KF ve KFL2'ye göre fazla yük taşımaktadır.

### 7.3.4. Dördüncü grup kiriş deney sonuçları

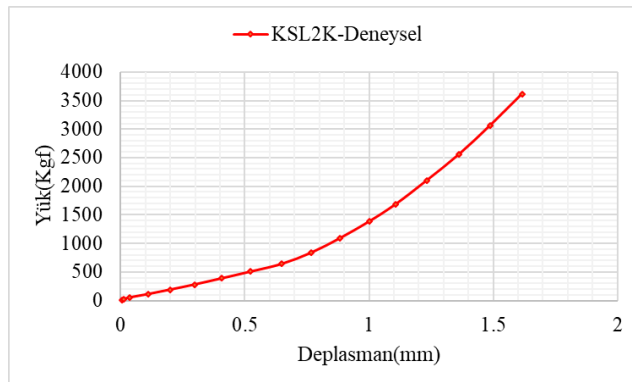
Bu grupta birinci gruptaki numuneler CFRP kumaş ile güçlendirilmiştir. Bu gruptaki numuneler şekil 6.3'te görüldüğü gibi KSK, KSKL1 ve KSKL2 olarak kodlanmıştır. Bu numunelerin çekme bölgesinde 1000x150mm boyutlarında CFRP kumaş kullanılmıştır.



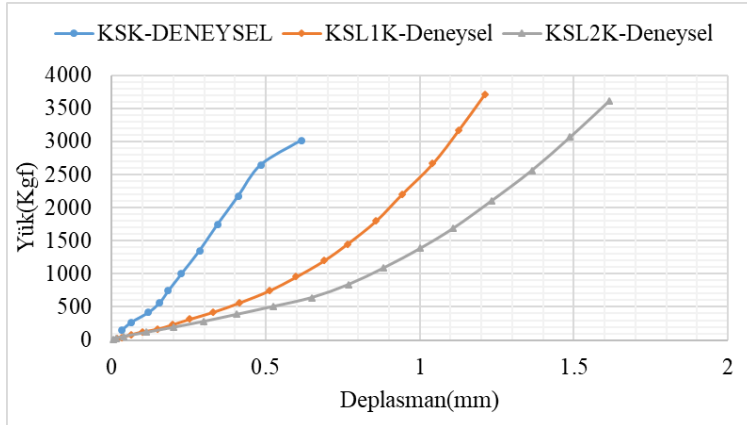
Şekil 7. 27. KSK yük-deplasman grafiği



Şekil 7. 28. KSL1K yük-deplasman grafiği

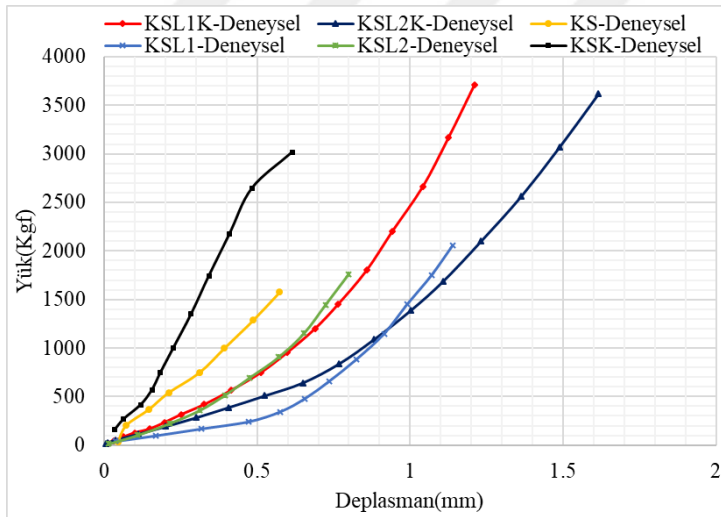


Şekil 7. 29. KSL2K yük-deplasman grafiği



Şekil 7. 30. KSK-KSL1K-KSL2K Yük deplasman grafikleri

Şekil 7.30 'da KSK-KSL1K-KSL2K yük deplasman grafiğine bakıldığında, hacimce %0,4 lif ilavesiyle KSL1K kirişi, KSK ve KSL2K kirişe göre fazla yük almaktadır. Şekil 7.16 ve Şekil 7.30 karşılaştırıldığında CFRP ile kaplı numunelerin yük taşıma kapasitelerinin daha fazla olduğu görülmektedir. CFRP güçlendirmesi, kirişin çekme bölgesinde betona çekme dayanımı sağlamıştır. Özellikle CFRP ile güçlendirilmiş KS kirişinin ani kırılma davranışı ortadan kaldırılmıştır.



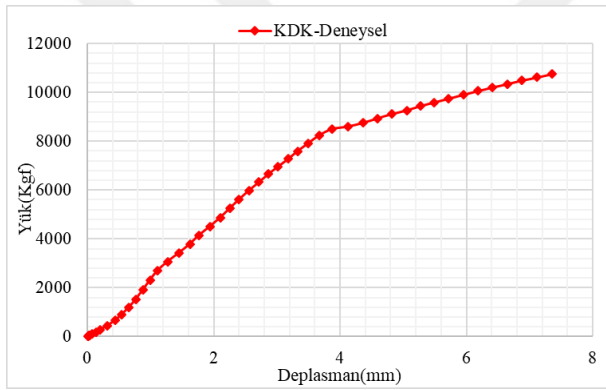
Şekil 7.31. KS-KSL1-KSL2-KSK-KSL1K-KSL2K kirişlerin yük deplasman grafiğinin karşılaştırılması

Şekil 7.31 incelendiğinde CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin fazdan yük aldığı açıkça görülmektedir. CFRP çekme dayanımı yüksek kompozit bir malzemedir. CFRP betonun çekme dayanımını olumlu yönde iyileştirmiştir. KS kirişi yük altında gevrek özelliğini koruyarak ikiye bölünmüşken, KSK kirişi CFRP ile güçlendirildiği için sünek davranış sergilemiştir. Ayrıca KSL1 ve KSL1K kirişleri incelendiğinde KSL1K kirişinde yük taşıma

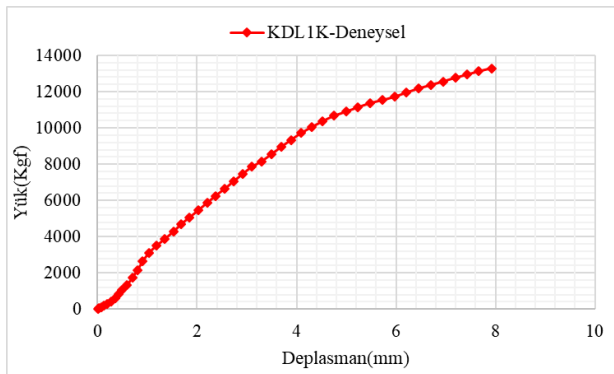
kapasitesinde büyük artış görülmüştür. KSL2 ve KSL2K kirişlere bakıldığında CFRP ile güçlendirilmiş olan KSL2K kirişi oldukça fazla yük almıştır. Sonuç itibariyle CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin yük taşıma kapasitesi kaplamasız kirişlere göre daha yüksek görülmüştür. Lifli kirişlerin güçlendirilmesi ile süneklik düzeyleri artmıştır ve daha fazla düşey deplasman yapabilmişlerdir.

### 7.3.5. Beşinci grup kiriş deney sonuçları

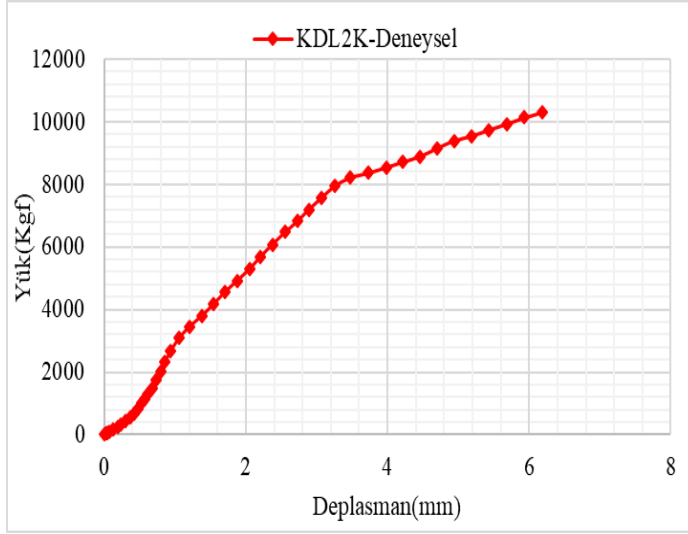
Bu grupta ikinci gruptaki numuneler CFRP kumaş ile güçlendirilmiştir. Bu gruptaki numuneler şekil 6.1’de görüldüğü gibi KDK, KDKL1 ve KDKL2 olarak kodlanmıştır. Bu numunelerin çekme bölgesi 1000x150 mm boyutlarına sahip CFRP kumaş ile kaplanmıştır.



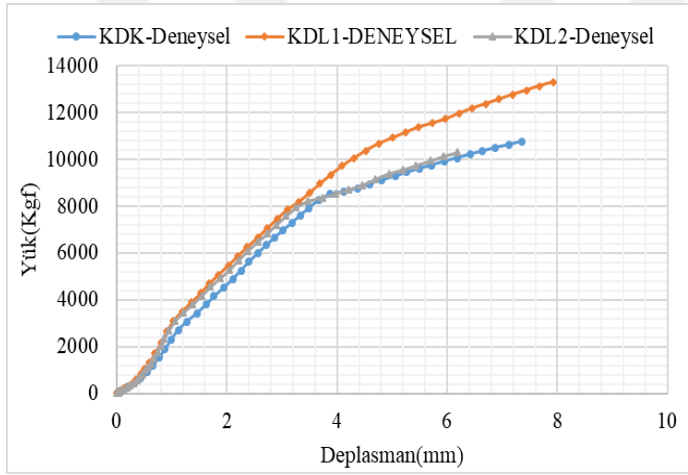
Şekil 7.32. KDK yük deplasman grafiği



Şekil 7.33. KDL1K yük deplasman grafiği

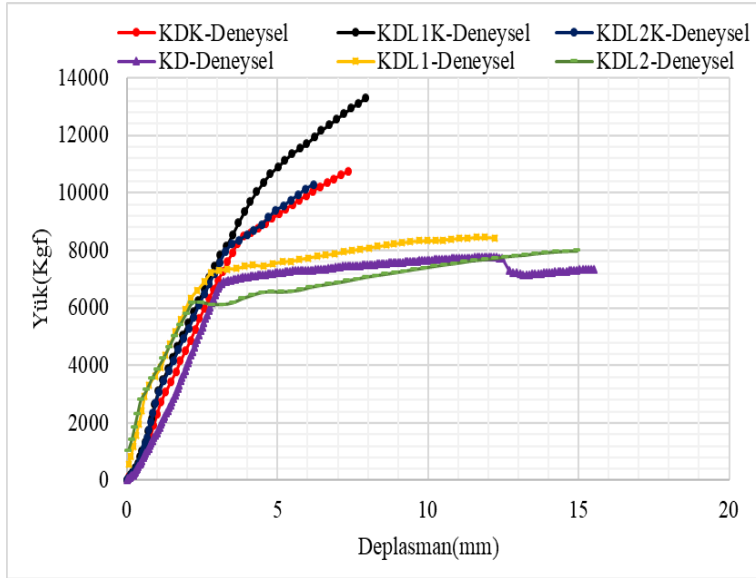


Şekil 7.34. KDL2K yük deplasman grafiği



Şekil 7.35. KDK-KDL1-KDL2K yük deplasman grafiği

Şekil 7.34'de KDK-KDL1K-KDL2K yük deplasman grafiğine bakıldığında, hacimce %0,4 lif ilavesiyle KDL1K kirişi KDK ve KDL2K kirişine göre daha fazla yük taşımaktadır. Şekil 7.22 ve Şekil 7.34 karşılaştırıldığında CFRP ile kaplı numunelerin yük taşıma kapasitelerinin daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 7.36. KD-KDL1-KDL2-KDK-KDL1K-KDL2K kirişlerin yük deplasman grafiğinin karşılaştırılması

Şekil 7.36 incelendiğinde CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin fazla yük aldığı açıkça görülmektedir. CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin dayanımı gözle görülür derecede artmıştır. KDK kirişinin yük taşıma kapasitesi KD kirişine göre daha yüksektir. Diğer yandan KDL1 ve KDL1K kirişleri incelendiğinde, KDL1K kirişinde yük taşıma kapasitesinde büyük artış görülmüştür. KDL2 ve KDL2K kirişlere bakıldığında ise, CFRP ile güçlendirilmiş KDL2K kirişi oldukça fazla yük almıştır. Sonuç olarak betonarme kirişlerin CFRP ile güçlendirilmesiyle kirişlerde dayanım açısından büyük artışlar meydana gelmiştir.

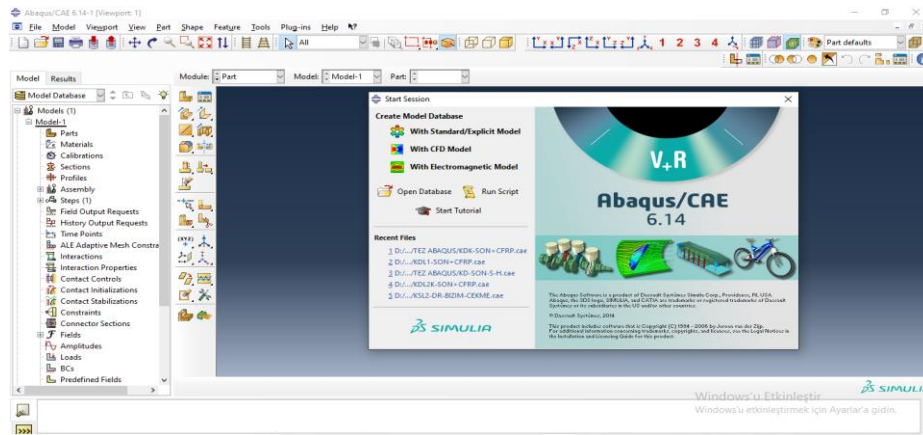


## 8. SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ TEMELLİ ANALİZ PROGRAMI İLE ÇÖZÜM

Sonlu elemanlar yönteminin kullanımı, son yıllarda mühendislik alanda oldukça yaygındır. Sonlu elemanlar yöntemi birden çok analizleri yapabilmektedir. Sonlu elemanlar metodundaki karmaşık problemleri basit hale indirgeyerek bir çözüm elde etmektir. Karmaşık bir problem, bilinen veya kavranması daha kolay alt problemlere ayrılarak daha anlaşılır bir hale getirilir. Oluşturulan alt problemler çözülüp birleştirilerek esas problemin çözümü yapılabilir.(Şirin 2016) . Tez çalışmamızda, sonlu elemanlar temelinde çözüm yapan ABAQUS analiz programı kullanılmıştır.

### 8.1. Abaqus Bilgisayar Modelleme ve Analiz Programı

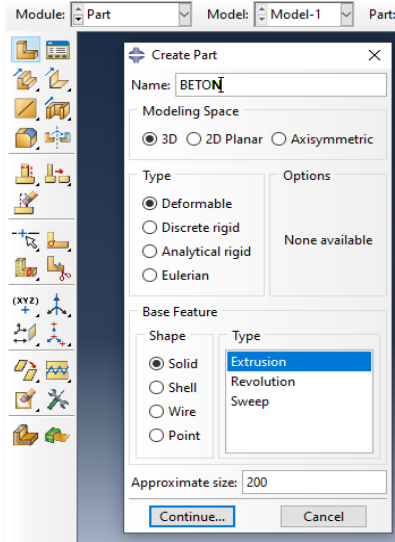
Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz yapan çeşitli bilgisayar programları vardır. Bunlardan birisi Abaqus analiz programıdır. Abaqus programı mühendisliğin birden çok alanında çeşitli analizler yapmak için kullanabilmektedir. Bu program Statik, Dinamik, ısı transfer ve akışlar gibi çeşitli analizler yapabilmektedir. Abaqus'te analiz yapmak parçanın çiziminden başlayıp sonra malzeme tanıma, kesit oluşturma, malzeme atama, montaj yapma, analiz tipini seçme, kontak, sınır şartları belirleme, ağ (mesh) oluşturma ve çözümleme ile son bulmaktadır. Bu çalışmada statik analiz yapılmıştır. Yapılan mevcut çalışmanın adımları kısa bir şekilde aşağıda verilmiştir.



Şekil 8.1. Abaqus ara yüzeyi

## Part

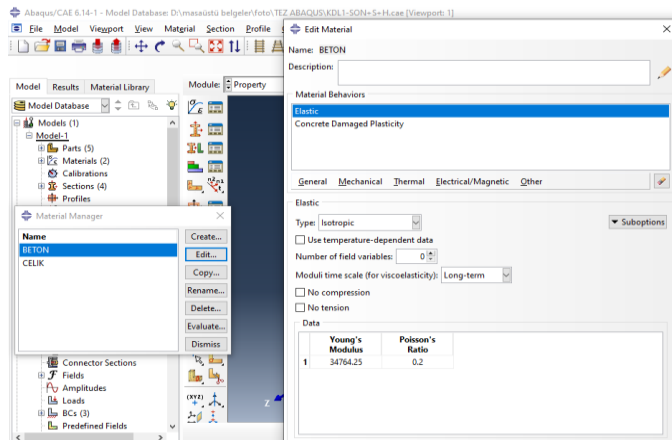
Bu kısımda yapılan çalışmanın parçaları beton, mesnetler, boyuna ve enine donatıları oluşturulmuştur. Bu parçalardan beton 3D solid, mesnetler 3D rigid, boyuna ve enine donatıları 3D wire olarak seçilmiştir.(Şekil 8.2)



Şekil 8.2. Parça oluşturma

## Property

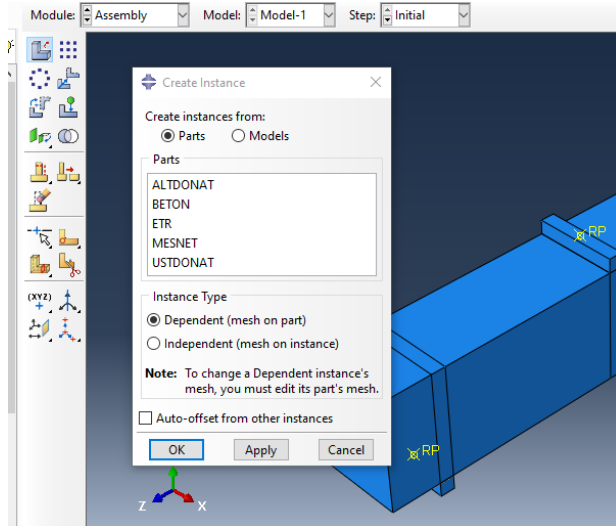
Bu kısımda malzeme özellikleri tanımlanıp oluşturulan kesitlere malzeme atama yapılmıştır. (Şekil 8.3)



Şekil 8.3. Malzeme tanımlama

## Assembly

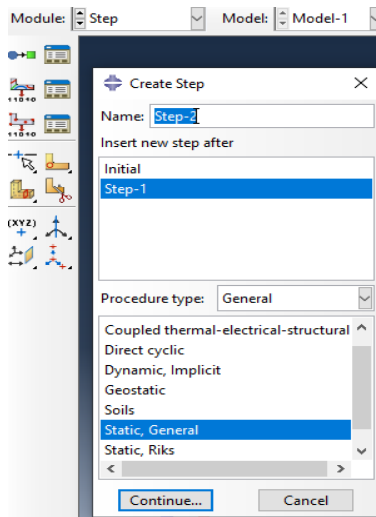
Bu kısımda beton, boyuna ve enine donatıları montajlanmıştır. (Şekil 8.4)



Şekil 8.4. Parçaları montajlama

## Step

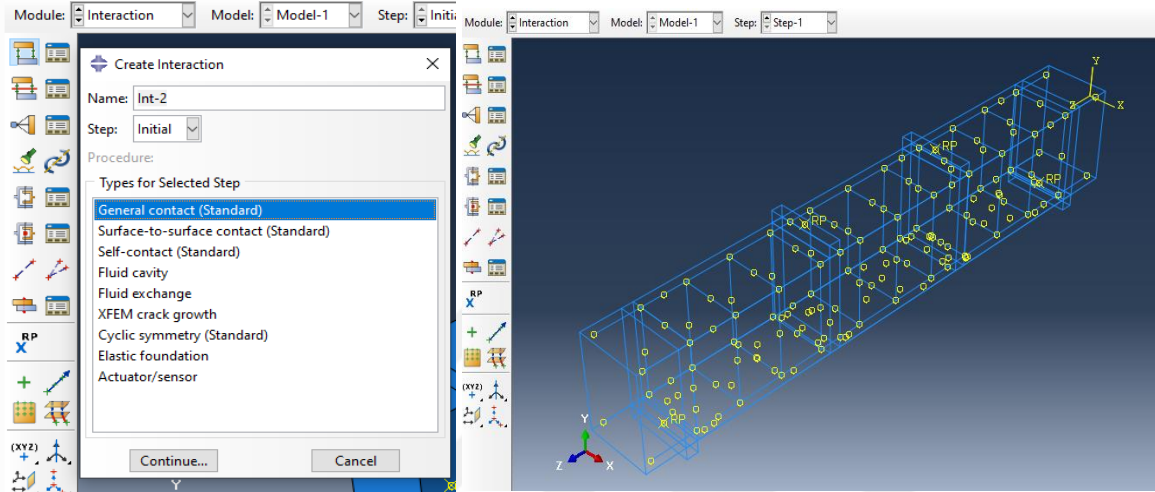
Bu kısımda çalışmanın analiz türü ve adımları tanımlanmıştır. (Şekil 8.5)



Şekil 8.5. Analiz türü seçme

## Interaction

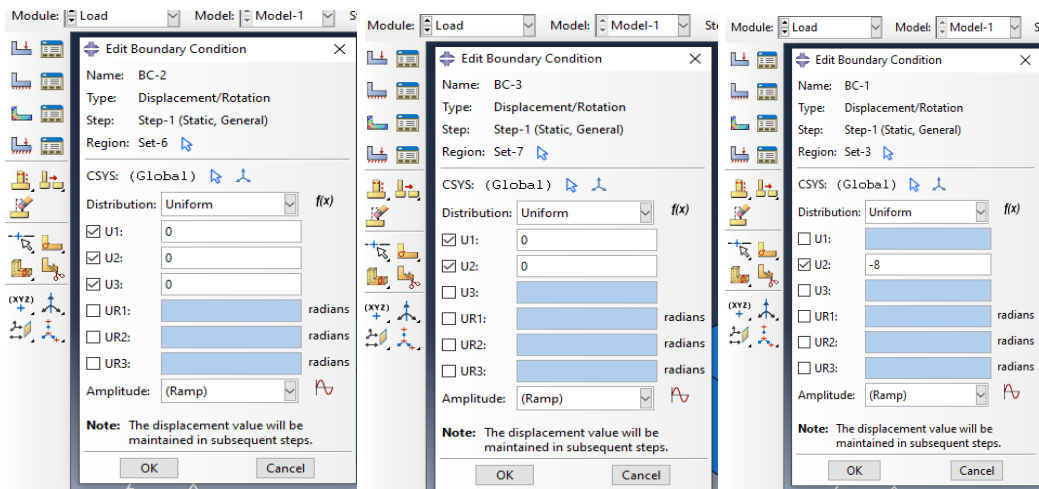
Bu kısımda montajı yapılmış olan elemanların parçalar arası temas ve bağlantıları tanımlanmıştır. (Şekil 8.6)



Şekil 8.6. Parçaların temas ve bağlantıları

## Load

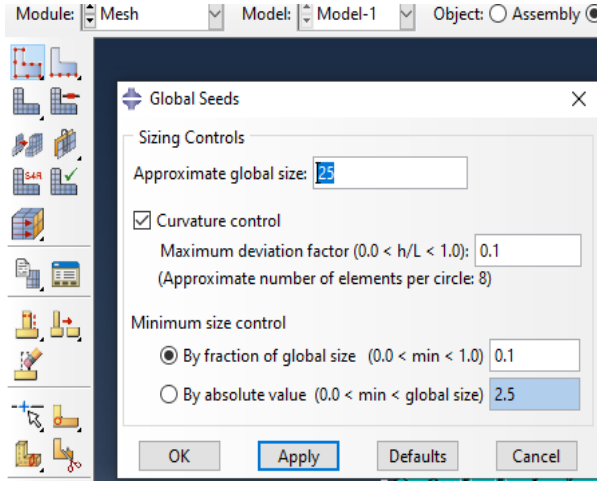
Bu kısımda sınır şartları ve yük tanımlanmıştır. Sınır şartları olarak bir tarafı sabit diğer tarafı kayıcı mesnet tanımlanmıştır. (Şekil 8.7)



Şekil 8.7. Sınır şartlarının tanımlanması

## Mesh

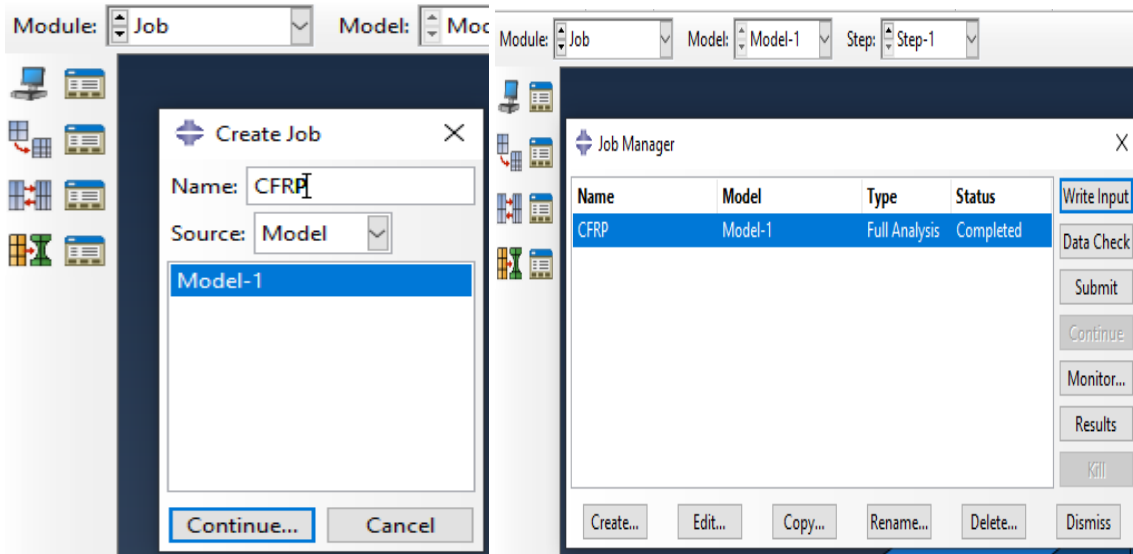
Bu kısımda her parça ayrı ayrı çözüm ağı oluşturularak küçük parçalara bölünmüştür. Beton parçası için 25mm, alt ve üst boyuna donatılar için 50 mm, etriye için 17mm ve mesnetler için ise 15mm aralıklı ağ (meşh) oluşturulmuştur.(Şekil 8.8)



Şekil 8.8. Ağ oluşturma

## Job

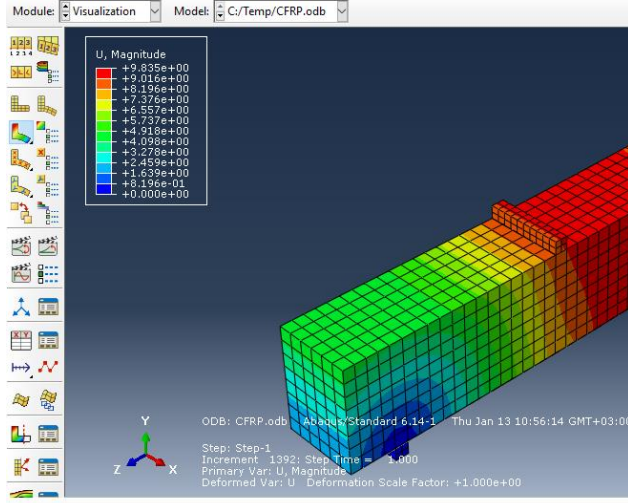
Bu kısımda hazır hale getirilmiş olan model analize başlanmıştır.(Şekil 8.9)



Şekil 8.9. Modeli çözüme gönderme

## Visualization

Analizi yapılan model için istenilen sonuçların elde edilebildiği kısımdır. (Şekil 8.10)

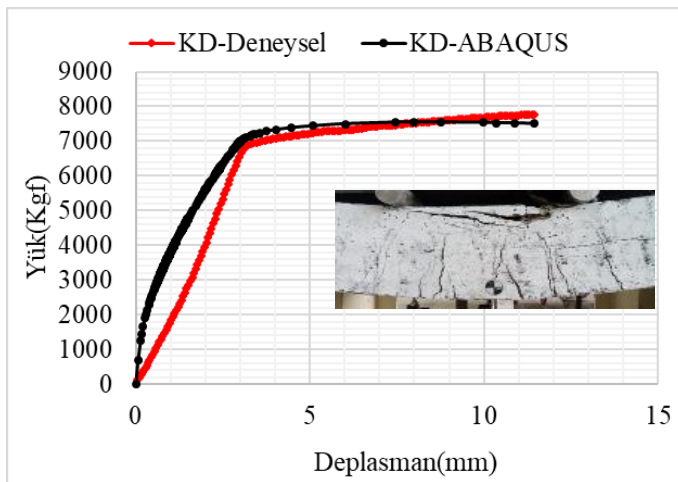


Şekil 8.10. Sonuçların alınması

## 8.2. Deneysel Çalışmanın ABAQUS Sonuçlarıyla Karşılaştırılması.

Bu bölümde, hibrit kompozit kirişlerin Abaqus analiz programı ile deneysel sonuçların karşılaştırması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar çeşitli şekiller yardımıyla gösterilmiştir

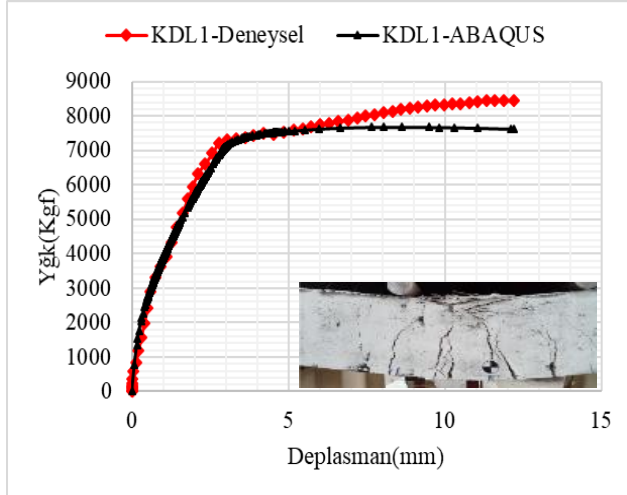
### 8.2.1. KD kirişi



Şekil 8. 11. KD deneysel ve ABAQUS yük-deplasman grafiği

Şekil 8.11'e incelendiğinde deneysel sonuçlarla Abaqus analiz programı ile elde edilen sonuçların birbirlerine yakın olduğu görülmüştür.

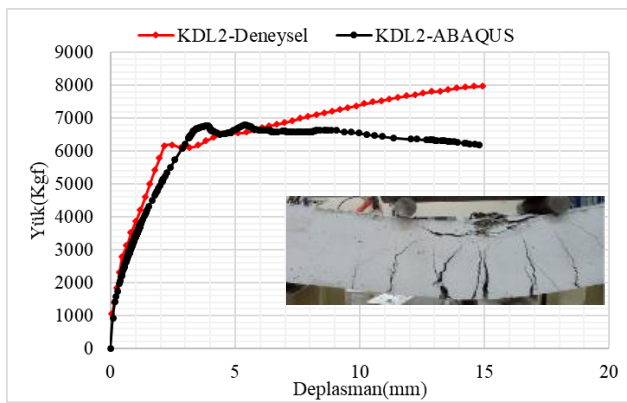
### 8.2.2. KDL1 kirişi



Şekil 8.12. KDL1 deneysel ve ABAQUS yük-deplasman grafiği

Şekil 8.12'ye bakıldığında deneysel ve Abaqus sonuçlarının hemen hemen uyumlu olduğu görülmüştür.

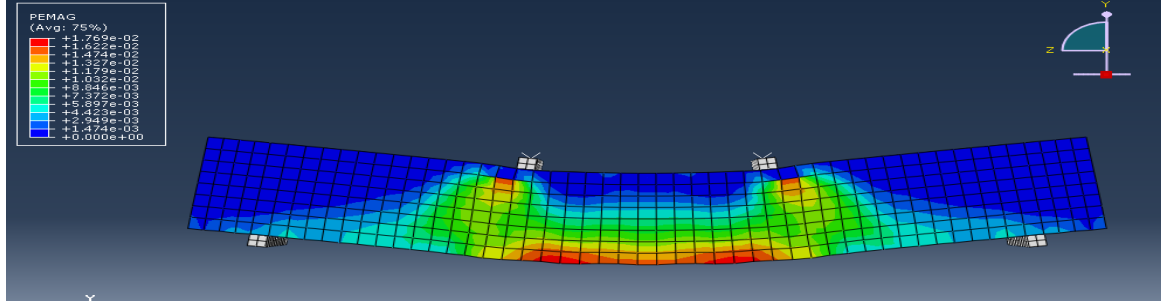
### 8.2.3. KDL2 kirişi



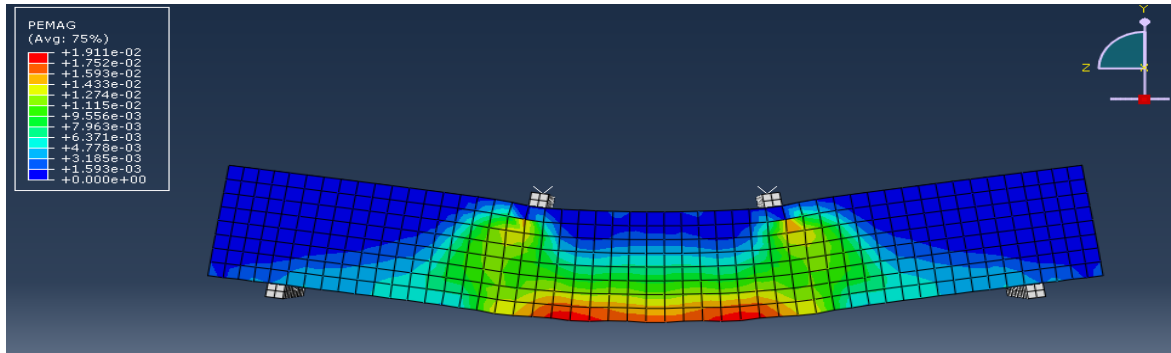
Şekil 8.13. KDL2 kirişin deneysel ve ABAQUS yük-deplasman grafiği

Şekil 8.13'e bakıldığında deneysel ve Abaqus sonuçlarının daha çok başlangıç bölgesinde (elastik bölgede) birbirine yakın olduğu görülmüştür. Şekil 8.1-12 ve 13 incelendiğinde en

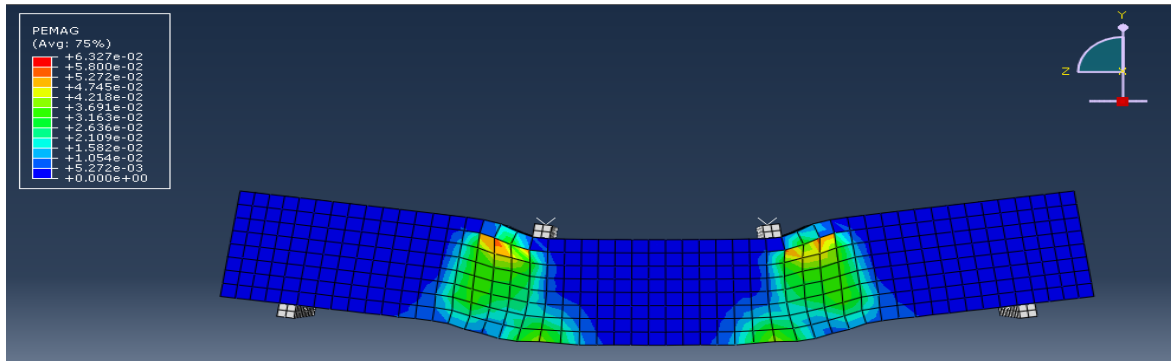
iyi sonucun %0.4 lif içerikli betonarme kiriş için meydana geldiği anlaşılmaktadır. Lif oranının artmasının yük taşıma kapasitesine çok büyük bir katkı sağlamadığı görülmektedir.



Şekil 8.14. KD kirişin betonundaki plastik şekil değiştirme gerilmesi(PEMAG)



Şekil 8.15. KDL1 kirişin betonundaki plastik şekil değiştirme gerilmesi(PEMAG)

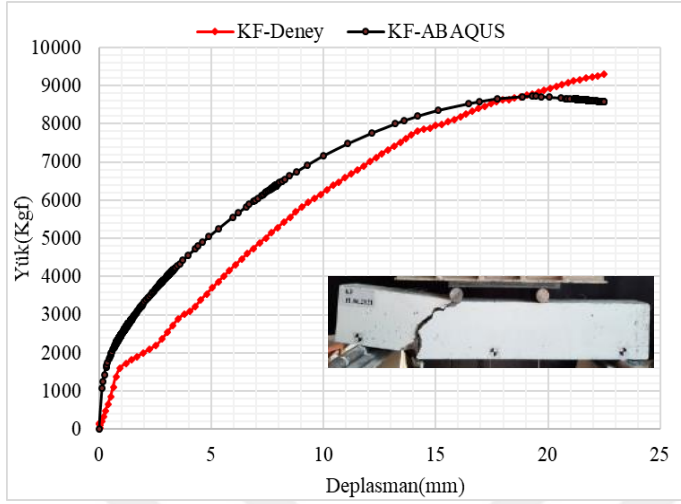


Şekil 8.16. KDL2 kirişin betonundaki plastik şekil değiştirme gerilmesi(PEMAG)

Abaqus sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlara göre, KD, KDL1 ve KDL2 kirişleri için betonda meydana gelen plastik şekil değiştirme gerilmesi karşılaştırıldığında, KD kirişinde görülen plastik şekil değiştirme gerilmesi, KDL1 ve KDL2 kirişine göre düşük görülmektedir(Şekil 8.14-15-16). Bunun sebebi KDL1 ve KDL2 kirişlerinde makro sentetik donatıların bulunmasıdır.



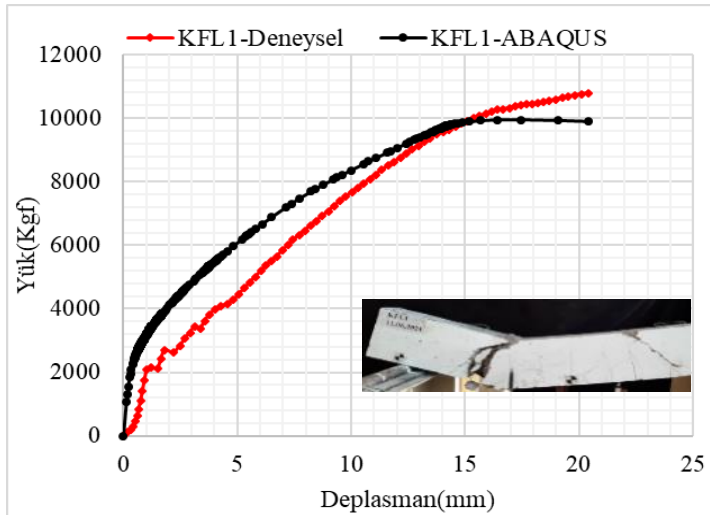
### 8.2.4. KF kirişi



Şekil 8.17. KF kirişin deneysel ve ABAQUS yük-deplasman grafiği

Şekil 8.17'e bakıldığında deneysel ve Abaqus'un sonuçları tepe noktaya doğru birbirine yakın davranışı gösterirken, plastik bölgede Abaqus ve deneysel çalışmanın kesiştiği görülmüştür. Şekil 8.12 ve 8.17 incelendiğinde, GFRP çubukların davranışı çelik çubuklara göre büyük fark göstermiştir.

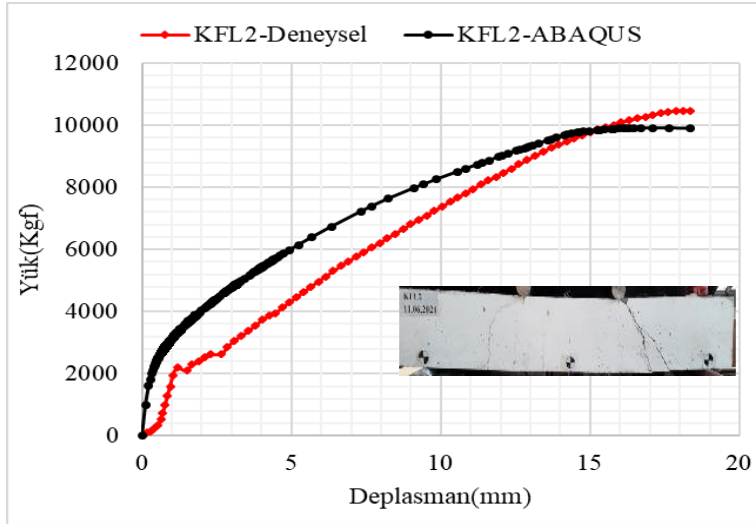
### 8.2.5. KFL1 kirişi



Şekil 8.18. KFL1 kirişin deneysel ve ABAQUS yük-deplasman grafiği

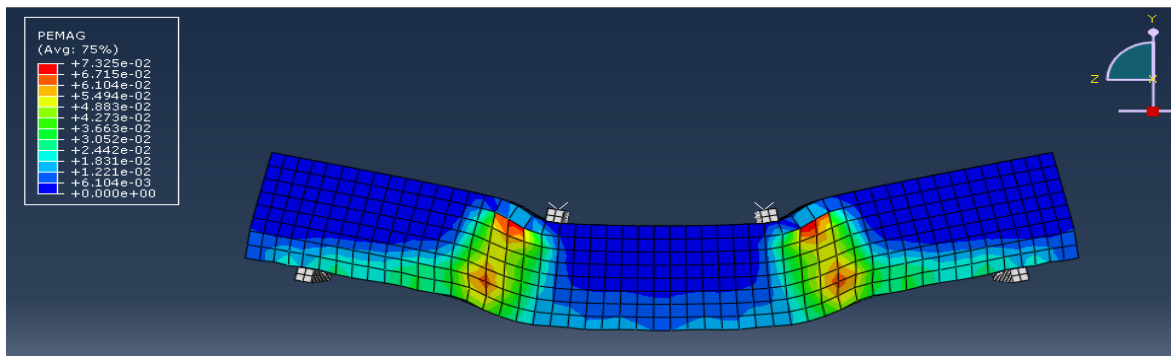
Şekil 8.18'e bakıldığında deneysel ve Abaqus'un sonuçları tepe noktaya doğru birbirine yakın davranışı gösterirken, plastik bölgede Abaqus'un deneysel çalışma ile kesiştiği görülmüştür.

### 8.2.6. KFL2 kirişi

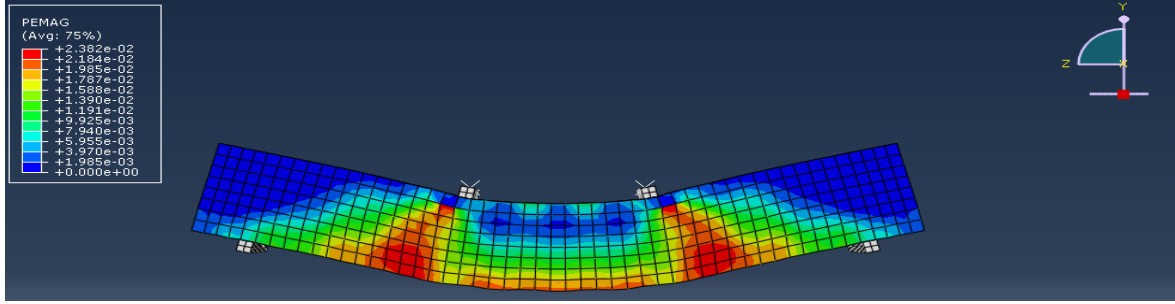


Şekil 8.19. KFL2 kirişin deneysel ve ABAQUS yük-deplasman grafiği

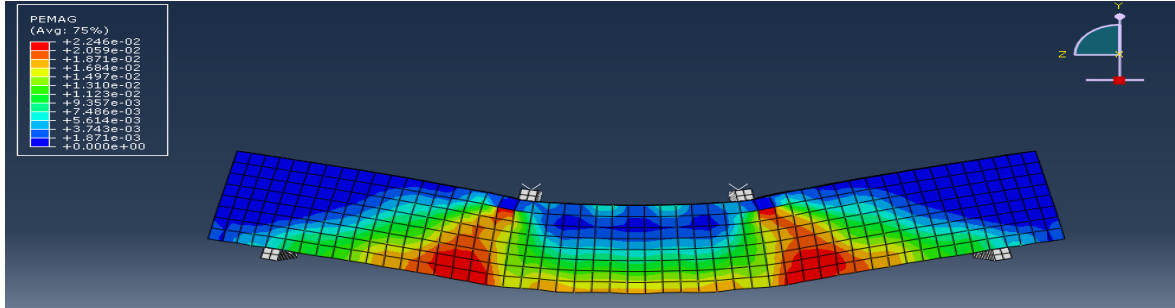
Şekil 8.19 bakıldığında deneysel ve Abaqus'un sonuçları tepe noktaya doğru birbirine yakın davranış gösterirken, plastik bölgede Abaqus sonuçları ile deneysel çalışma ile elde edilen sonuçların kesiştiği görülmüştür.



Şekil 8.20. KF kirişin betonundaki plastik şekil değiştirme gerilmesi(PEMAG)



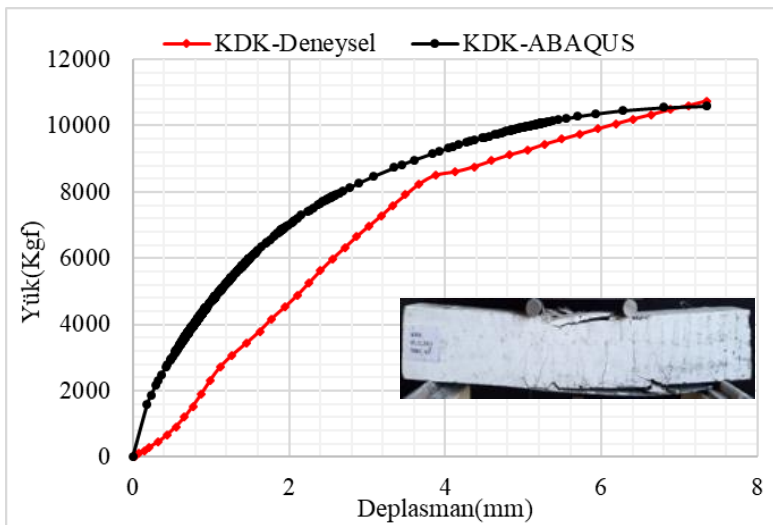
Şekil 8.21. KFL1 kirişin betonundaki plastik şekil değiştirme gerilmesi(PEMAG)



Şekil 8.22. KFL2 kirişin betonundaki plastik şekil değiştirme gerilmesi(PEMAG)

Abaqus sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçları incelendiğinde KF, KFL1 ve KFL2 kirişleri için betonda meydana gelen plastik şekil değiştirme gerilmesi, KF kirişi KFL1 ve KFL2 kirişe göre yüksek çıkmaktadır. Bunun sebebi ise GFRP çubuklar ve betonun içinde makro sentetik liflerin bulunmasıdır. (Şekil 8.20-21-22).

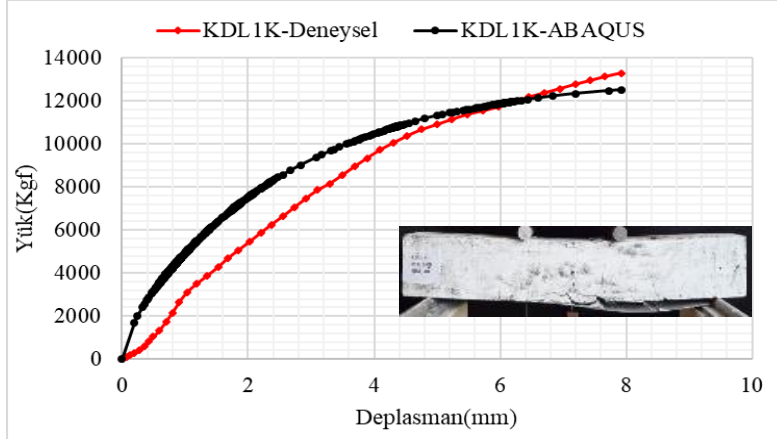
### 8.2.7. KDK kirişi



Şekil 8.23. KDK kirişin deneysel ve ABAQUS yük-deplasman grafiği

Şekil 8.23'e bakıldığında deneysel ve Abaqus sonuçları tepe noktada çakışmıştır. İki yöntem ile elde edilen davranış birbirine yakındır.

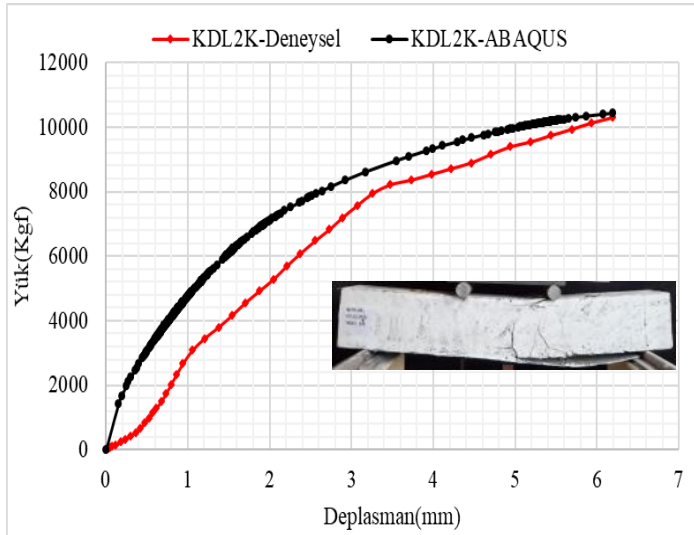
### 8.2.8. KDL1K kirişi



Şekil 8.24. KDL1K kirişin deneysel ve ABAQUS yük-deplasman grafiği

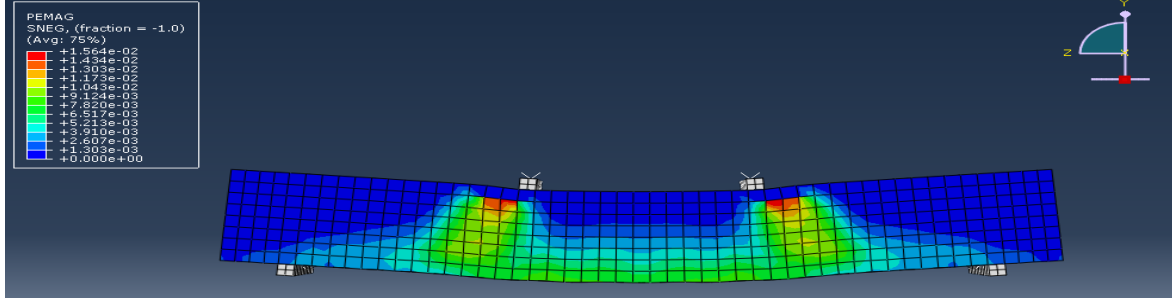
Şekil 8.24 bakıldığında deneysel ve Abaqus'un sonuçları tepe noktaya doğru birbirine yakın davranışı gösterirken, plastik bölgede Abaqus'un deneysel çalışma ile kesiştiği görülmüştür.

### 8.2.9. KDL2K kirişi

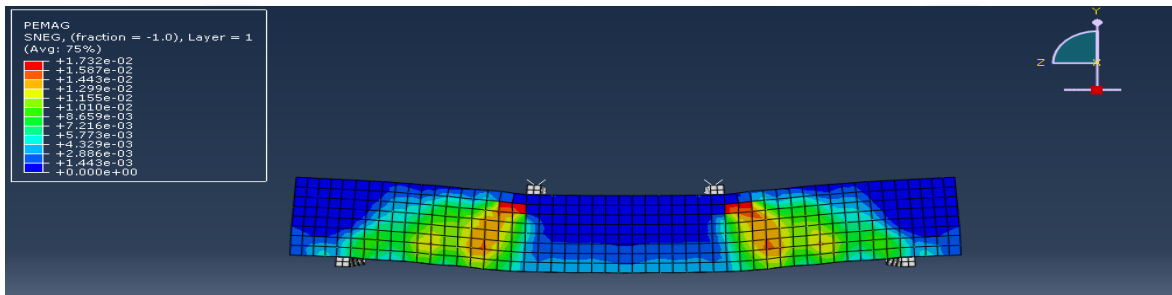


Şekil 8.25. KDL2K kirişin deneysel ve ABAQUS yük-deplasman grafiği

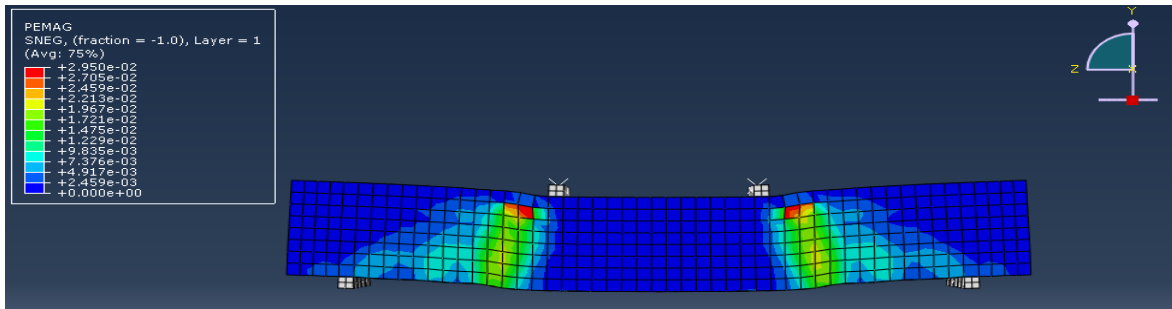
Şekil 8.25'e bakıldığında deneysel ve Abaqus sonuçları tepe noktaya doğru birbirine yakın davranış gösterilmiştir.



Şekil 8.26. KDK kirişin betonundaki plastik şekil değiştirme gerilmesi(PEMAG)



Şekil 8.27. KDL1K kirişin betonundaki plastik şekil değiştirme gerilmesi(PEMAG)



Şekil 8.28. KDL2K kirişin betonundaki plastik şekil değiştirme gerilmesi(PEMAG)

Abaqus sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlara göre, KD, KDL1 ve KDL2 kirişleri için betonda meydana gelen plastik şekil değiştirme gerilmesi karşılaştırıldığında, KD kirinde görülen plastik şekil değiştirme gerilmesi KDL1 ve KDL2 kirişine göre düşük görülmektedir(Şekil 8.26-27-28). Bunun sebebi KDL1 ve KDL2 kirişlerde makro sentetik donatıların bulunmasıdır.

## 9. SONUÇLAR VE ÖNERİ

Bu çalışmanın birinci aşamasında, makro sentetik lif katkılı betonun mekanik özellikleri araştırılmış, ikinci aşamasında büyük kirişler için dört noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Büyük kirişler Abaqus programında modellenip statik analizleri yapılmıştır. Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Beton içerisine eklenen liflerin beton basınç dayanımını bir miktar arttırdığı görülmüştür. Lif yüzdesinin beton çekme dayanımı üzerinde kayda değer derecede etkili olduğu tespit edilmiştir. Fazla miktarda lif kullanılmasının ise çekme dayanımını daha da fazla arttırmadığı görülmüştür. Beton eğilme dayanımının lif kullanımıyla arttığı fakat belli bir lif yüzdesinden sonra eğilme dayanımının olumsuz etkilendiği anlaşılmıştır. Lif kullanımının Schmidt çekici deneyi sonuçlarını çok fazla etkilemediği görülmektedir. Ultrases deneyi sonucunda elde edilen veriler ışığında hesaplanan dinamik elastisite modülü değerlerinin lif kullanılması ile az miktarda düştüğü görülmüştür. Lif kullanımının statik elastisite modülü değerini biraz arttırdığı tespit edilmiştir.

Büyük kirişler için yapılan deneylerde ise, hacimce %0,4 lif katkılı kiriş, lif katkısız sade kirişe göre dayanım açısından daha olumlu etki göstermiştir. Diğer yandan %0,8 lifli büyük kiriş %0,4'e göre daha az yük almaktadır. Lif oranı fazla olduğu için numunelerde hava boşlukları oluştuğu, liflerin miktarının artması ile lif dağılımının homojen olmaması gibi sebeplerden dolayı kirişin yük taşıma kapasitesi açısından olumsuz etkilendiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple, lif oranı fazla numunelerin üretiminde lifin homojen dağılımı önerilmiştir. Lifin ideal miktarlarda ve homojen dağılımının sağlanması ile betonarme kirişlerde çatlakların azaldığı ve dayanımın lifsiz betonarme kirişlere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Etriye ve donatı olmadan makro-sentetik elyaf takviyeli beton kirişlerin kesme dayanımı sade betona göre iyileştirilmiştir. Çalışmada, makro sentetik lifler, hacimce %0,4 oranında karışıma eklenince, kirişlerin kesme mukavemetini ve sünekliğini önemli ölçüde iyileştirdiği görülmüştür.

GFRP donatılı kirişler, çelik donatılı kirişlere göre daha esnek davranış göstermiştir. Buna ek olarak, CFRP ile güçlendirilen kirişlerde dayanımda önemli artışlar olmaktadır. CFRP ile güçlendirilmiş donatısız betonarme kirişlerde yük taşıma kapasitesinde artış görülmüştür. CFRP kullanımı sayesinde, sade betondan üretilen kirişin gevrek davranışının ortadan

kaldırıldığı anlaşılmıştır. Demirli veya GFRP donatılı betonarme kirişlerin eğilme davranışları birbirleriyle bir miktar farklıdır. Bu tez çalışmasında, deneysel ve Abaqus sonuçları birbirlerine yakın sonuçlar vermişlerdir. Böylece deneysel çalışmalar, nümerik çalışmalar ile doğrulanmıştır. Abaqus sonlu elemanlar programından elde edilen sonuçlara göre, KD, KDL1 ve KDL2 kirişleri için, betonda meydana gelen plastik şekil değiştirme gerilmesi karşılaştırıldığında, KD kirişinde görülen plastik şekil değiştirme gerilmesi, KDL1 ve KDL2 kirişine göre düşük görülmektedir. Bunun sebebi KDL1 ve KDL2 kirişlerinde makro sentetik donatıların bulunmasıdır. KF, KFL1 ve KFL2 kirişleri için betonda meydana gelen plastik şekil değiştirme gerilmesi incelendiğinde, KF kirişinin analizi sonucu elde edilen plastik şekil değiştirme gerilmesi değerlerinin KFL1 ve KFL2 kirişlerine göre daha yüksek çıktığı görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- Abaqus. (2020) Theory Manual Hibbit, Karlsson and Sorenson Inc. Pawtucket, USA.
- Abdelkarim, O. I., Ahmed, E. A., Mohamed, H. M., & Benmokrane, B. (2019). Flexural strength and serviceability evaluation of concrete beams reinforced with deformed GFRP bars. *Engineering Structures*, 186, 282-296.
- Al-Majidi, M. H., Lampropoulos, A. P., Cundy, A. B., Tsioulou, O. T., & Alrekabi, S. (2019, June). Flexural performance of reinforced concrete beams strengthened with fibre reinforced geopolymer concrete under accelerated corrosion. *In Structures* (Vol. 19, pp. 394-410). Elsevier.
- Almusallam, T. H., Elsanadedy, H. M., Al-Salloum, Y. A., & Alsayed, S. H. (2013). 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.
- Al-Rousan, R., & Issa, M. (2011). Fatigue performance of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3520-3529.
- Altoubat, Salah, Ardavan Yazdanbakhsh, and Klaus-Alexander Rieder. (2009) "Shear behavior of macro-synthetic fiber-reinforced concrete beams without stirrups." *ACI Materials Journal* 106.4: 381.
- Altoubat, S., Yazdanbakhsh, A., & Rieder, K. A. (2009). Shear behavior of macro-synthetic fiber-reinforced concrete beams without stirrups. *ACI Materials Journal*, 106(4), 381.
- Ascione, L., Mancusi, G., & Spadea, S. (2010). Flexural behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars. *Strain*, 46(5), 460-469.
- Ashour, A. F. (2006). Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars. *Construction and Building Materials*, 20(10), 1005-1015.
- ASTM, C. (1993). 805-85. *Test for Rebound Number of Hardened Concrete*, ASTM, USA.
- ASTM C143, 2015. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- El Refai, A., Abed, F., & Al-Rahmani, A. (2015). Structural performance and serviceability of concrete beams reinforced with hybrid (GFRP and steel) bars. *Construction and Building Materials*, 96, 518-529.
- EN 12390-1 / BS 1881:108 / ASTM C192, C39 / AASHTO T23, T126 / NF P18-400 Hard plastic moulds are manufactured in accordance with dimensions and tolerances stated in the relevant standard. Made from BMC (Bulk Moulding Compound)
- EN 12390-6,2010. Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, ANKARA



- Esfahani, M. R., Kianoush, M. R., & Tajari, A. R. (2007). Flexural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by CFRP sheets. *Engineering structures*, 29(10), 2428-2444.
- Ghahremannejad, M., Mahdavi, M., Saleh, A. E., Abhaee, S., & Abolmaali, A. (2018). Experimental investigation and identification of single and multiple cracks in synthetic fiber concrete beams. *Case Studies in Construction Materials*, 9, e00182.
- Goldston, M., Remennikov, A., & Sheikh, M. N. (2016). Experimental investigation of the behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars under static and impact loading. *Engineering Structures*, 113, 220-232.
- Guerini, V., Conforti, A., Plizzari, G., & Kawashima, S. (2018). Influence of steel and macro-synthetic fibers on concrete properties. *Fibers*, 6(3), 47.
- Hamrat, M., Bouziadi, F., Boulekbache, B., Daouadji, T. H., Chergui, S., Labeled, A., & Amziane, S. (2020). Experimental and numerical investigation on the deflection behavior of pre-cracked and repaired reinforced concrete beams with fiber-reinforced polymer. *Construction and Building Materials*, 249, 118745.
- Hasan, M. J., Afroz, M., & Mahmud, H. M. I. (2011). An experimental investigation on mechanical behavior of macro synthetic fiber reinforced concrete. *Int. J. Civ. Environ. Eng*, 11(3), 19-23.
- Hawileh, R. A., Nawaz, W., Abdalla, J. A., & Saqan, E. I. (2015). Effect of flexural CFRP sheets on shear resistance of reinforced concrete beams. *Composite Structures*, 122, 468-476.
- Irshidat, M. R., Al-Saleh, M. H., & Almashagbeh, H. (2016). Effect of carbon nanotubes on strengthening of RC beams retrofitted with carbon fiber/epoxy composites. *Materials & Design*, 89, 225-234.
- Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Wu, Y. F., Patnaikuni, I., Zhou, Y., & Xing, F. (2019). Axial stress-strain behavior of macro-synthetic fiber reinforced recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 97, 341-356.
- Murthy, A. R., Pukazhendhi, D. M., Vishnuvardhan, S., Saravanan, M., & Gandhi, P. (2020, October). Performance of concrete beams reinforced with GFRP bars under monotonic loading. In *Structures* (Vol. 27, pp. 1274-1288). Elsevier.
- Obaidat, Y. T., Heyden, S., & Dahlblom, O. (2010). The effect of CFRP and CFRP/concrete interface models when modelling retrofitted RC beams with FEM. *Composite Structures*, 92(6), 1391-1398.
- Ruan, X., Lu, C., Xu, K., Xuan, G., & Ni, M. (2020). Flexural behavior and serviceability of concrete beams hybrid-reinforced with GFRP bars and steel bars. *Composite structures*, 235, 111772.
- Şirin, G., & Aydemir, D. (2016). Sonlu Elemanlar Metodunun Ahşap Malzemelerde Kullanımına İlişkin Bir Araştırma. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 18(2), 205-212.
- Täljsten, B. (2003). Strengthening concrete beams for shear with CFRP sheets. *Construction*

*and Building Materials*, 17(1), 15-26.

Tavares, D. H., Giongo, J. S., & Paultre, P. (2008). Behavior of reinforced concrete beams reinforced with GFRP bars. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 1(3), 285-295.

Toutanji, H., Zhao, L., & Zhang, Y. (2006). Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix. *Engineering structures*, 28(4), 557-566.

Enstitüsü, T. S. (2010). TS EN 12390-3: Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. *Ankara: Türk Standardları Enstitüsü*.

TS EN 197-1:2012 - Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri

Ustabaş, İ., GÜRBÜZ, A., Zafer, K. U. R. T., & DEŞİK, F. Betonda cfrp sargı uygulamasının deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(3), 921-930.

Yavuz, G. (2011). Lif takviyeli polimerlerin betonarme kirişlerde donatı olarak kullanımı. *Engineering Sciences*, 6(4), 1001-1015.

## DİZİN

**A**

ABAQUS · iv, v, 43, 48, 53  
Agrega · 8

**B**

basınç · iv, 1, 2, 3, 4, 6, 9, 10, 15,  
16, 18, 19, 22, 23, 25, 26, 28,  
43, 53  
Beton · iv, 1, 2, 5, 11, 14, 15, 46,  
53  
betonarme · iv, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 19,  
31

**C**

Cam · iv, xiii, 6

**Ç**

Çekme · iv, 12, 24  
Çimento · 7

**D**

demir · 2, 9, 10, 20, 31, 33  
Deney · iv  
donatılar · 9, 10, 11, 20, 31, 36,  
46

**E**

eğilme · iv, 1, 4, 5, 6, 14, 19, 22,  
25, 53  
epoksi · 5, 12, 20  
etriyeler · 6, 9, 10

**F**

fiber · iv, v, 2, 3, 4, 5, 10, 11, 20,  
54, 55

**G**

güçlendirme · 2, 5

**H**

hafif · iv, 2

**I**

ısı · 43

**İ**

inşaat · iv, 2, 10, 20, 33, 36  
iri · 8, 13  
İskenderun · 2, 8

**K**

kompozit · iv, 1, 2

**L**

Lifli · xiii, xiv, 2, 13, 15

**M**

makro · iv, 1, 2, 3, 4, 13, 53

**N**

Nervürlü · 12

**O**

oranı · iv, 1, 4, 13, 19

**Ö**

özellikleri · iv, 1, 4, 7, 8, 9, 10, 12,  
13, 44, 53

**R**

rötre · 10, 11

**S**

Sade · xiii, 13, 20, 36  
Schmidt · iv, v, 18, 25, 26, 53  
sentetik · iv, 1, 2, 3, 4, 10, 11, 12,  
13, 53

**T**

tez · 2, vi, 1, 19, 22

**U**

ultrasonic · iv, v

**Y**

yarma · iv, 1, 14, 16, 23  
yöntem · 17, 18, 25, 27

**Z**

zayıf · iv



**TEKNOVERSİTE**



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

