



**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ADANA ALPARSLAN TÜRKER BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇELİK LİFLİ BETONARME KİRİŞLERİN DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

**SERKAN ŞİMŞEK
YÜKSEK LİSANS TEZİ**



**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ADANA ALPARSLAN TÜRKER BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇELİK LİFLİ BETONARME KİRİŞLERİN DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

**SERKAN ŞİMŞEK
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DANIŞMAN
PROF. DR. SERKAN TOKGÖZ**

ADANA, 2023

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak, bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın hazırladığım bu tez çalışmasında;

Bu tezin özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin akademik kurallara ve etik davranışa uygun olarak elde edilerek sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, tez kapsamında bu kuralların ve davranışların gerektirdiği şekilde bu çalışmaya özgün olmayan tüm veri ve bilgiler için bilimsel etik ve gelenek çerçevesinde kaynak gösterdiğimi; bu kaynakları da kaynakçada belirttiğimi beyan ederim. Çalışmam ile ilgili yaptığım beyana aykırı bir durum saptanması halinde tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.../.../20..

[İmza]

İsim SOYİSİM

ÖZET

ÇELİK LİFLİ BETONARME KİRİŞLERİN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Serkan ŞİMŞEK

Yüksek Lisans, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Serkan TOKGÖZ

OCAK 2023, 60 sayfa

Yüksek dayanımlı beton, betonarme yapıların yapımında giderek daha fazla kullanılmaktadır. Yüksek dayanımlı betonun normal dayanımlı betona kıyasla daha gevrek bir malzeme olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, yüksek dayanımlı betonun sünekliğini artırmak için beton karışımına çelik lifler eklenebilir. Çelik lifli betonarme elemanların davranışlarının belirlenmesi, elemanların doğru analiz ve tasarımı için çok önemlidir. Sunulan tez çalışmasında, çelik lifli betonarme kirişlerin davranışları incelenmiştir. Çalışmada toplam sekiz adet kiriş numunesi hazırlanmıştır. Betonarme kiriş numuneleri 150×200×1750 mm (b×h×L) boyutlarındadır. Bir kiriş numunesi çelik lifsiz, diğer yedi numune ise farklı çengel uçlu çelik lifler (3D, 4D, 5D) ve farklı miktarlarda çelik lif dozajları (20, 40, 60 kg/m³) ile üretilmiştir. Kiriş numuneleri, yapısal davranışı belirlemek için dört noktalı eğilme yüklemesi altında test edilmiştir. Testlerde çatlak ilerlemeleri gözlemlenmiş, yük ve karşılık gelen birim deformasyonlar ile deplasmanlar kaydedilmiştir. Deneysel yük ve deplasman değerleri kullanılarak kirişlerin deneysel yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Ayrıca çalışmada, betonarme kirişlerin taşıma gücü ve yük-deplasman eğrilerini elde etmek için bir analiz yöntemi sunulmuştur. Analizlerde beton malzemenin doğrusal olmayan davranışı dikkate alınmıştır. Test edilen kiriş numuneleri analiz edilmiş ve test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deneysel ve teorik sonuçlar arasında iyi derecede uyum elde edilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar dikkate alınarak kirişler için optimum miktarda çelik lif dozajı önerilmiştir. Sunulan çalışmada, çelik liflerin betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çelik lif, Betonarme Kiriş, Dört Nokta Eğilme Testi, Kiriş Analizi

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE BEAMS

Serkan ŞİMŞEK

M.Sc., Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Serkan TOKGÖZ

January 2023, 60 pages

High strength concrete is increasingly used in the construction of reinforced concrete structures. It is known that high strength concrete is a more brittle material when compared to normal strength concrete. Therefore, steel fibers can be added to the concrete mixture to improve the ductility of high strength concrete. It is very important to determine the behaviour of steel fiber reinforced concrete members for accurate analysis and design of members. In the presented thesis study, the behaviour of steel fiber reinforced concrete beams has been investigated. In the study, a total of eight beam specimens were prepared. The reinforced concrete beam specimens were 150×200×1750 mm (b×h×L) in sizes. One beam specimen was prepared without steel fiber and the other seven specimens were manufactured with different hooked end steel fibers (3D, 4D, 5D) and with different amount of steel fiber dosages (20, 40, 60 kg/m³). The beam specimens were tested under four-point bending loading to determine the structural behaviour. In the tests, the crack propagations were observed, the load and corresponding strains and deflections were recorded. The experimental load-deflection curves of the beams have been obtained using the experimental load and deflection values. In addition, a numerical procedure has been presented to obtain the theoretical load and load-deflection curves of reinforced concrete beams in the study. In the analysis, the nonlinear behaviour of the concrete material has been considered. The tested beam specimens were analysed and compared with test results. A good degree of correlation has been obtained between experimental and theoretical results. Optimum amount of steel fiber dosage has been recommended for beams by taking into account the obtained results of the study. It is concluded in the presented study that steel fibers significantly effect on the load carrying capacity of reinforced concrete beams.

Keywords: Steel Fiber, Reinforced Concrete Beam, Four-point Bending Test, Analysis of Beam



İthaf

Kıymetli Aileme ve Dostlarıma

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sürecinde desteğini esirgemeyen tecrübeleriyle yol gösteren tez danışmanım ve değerli hocam Prof. Dr. Serkan TOKGÖZ'e teşekkürlerimi sunarım. Çalışmamda, desteklerini esirgemeyen saygıdeğer hocam Arş. Gör. Sedat KARAAHMETLİ'ye ve üniversitemiz çalışanı Hasan DAŞ'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca çalışmada desteklerini esirgemeyen İnş. Yük. Müh. Hüseyin ÇOLAKOĞLU'na, İnş. Müh. Boğaçhan GÜRLER'e teşekkür ederim. Hayatım boyunca ve tez çalışması sürecinde her daim beni destekleyen, arkamda duran ve motivasyon kaynağım, annem, babam ve kardeşime sonsuz sevgi, saygı ve minnettarlığımı sunarım.

Bu tez 21303011 proje numarası ile Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

JÜRİ ONAY SAYFASI	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANNAMESİ	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
<i>İthaf</i>	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Önemi	3
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Çelik Lifli Betonların Kullanım Alanları	5
2.2. Önceki Çalışmalar	5
3. MATERYAL VE METOT	11
3.1. Deneysel Çalışma	11
3.1.1. Malzemeler	11
3.1.1.1. Agrega	11
3.1.1.2. Çimento	11
3.1.1.3. Kimyasal Katkı	12
3.1.1.4. Çelik Donatı	12
3.1.1.5. Çelik Lif	12
3.1.1.6. Su	12
3.1.1.7. Beton	12
3.1.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması	13
3.1.2.1. Karışım Oranlarının Belirlenmesi	13
3.1.2.2. Numunenin Geometrik Düzeni	14
3.1.2.3. Donatı ve malzemelerin hazırlanması	14
3.1.2.4. Çelik Lifli Betonun Üretimi	15

3.1.3.	Deney yöntemi	17
3.1.3.1.	Basınç dayanımı deneyi	17
3.1.3.2.	Eğilmede çekme dayanımı deneyi	23
3.1.4.	Kiriş Numune Deneyleri	23
3.1.4.1.	B-0 Numunesi	25
3.1.4.2.	BSF-20-5D Numunesi	27
3.1.4.3.	BSF-40-3D Numunesi	29
3.1.4.4.	BSF-40-4D Numunesi	32
3.1.4.5.	BSF-40-5D Numunesi	34
3.1.4.6.	BSF-60-3D Numunesi	36
3.1.4.7.	BSF-60-4D Numunesi	38
3.1.4.8.	BSF-60-5D Numunesi	40
3.2.	Analiz Yöntemi	43
3.2.1.	Yöntemde kabul edilen varsayımlar	43
3.2.2.	Beton ve çelik için kabul edilen gerilme-birim deformasyon modeli	44
3.2.3.	Yöntemin formülasyonu	45
3.2.4.	Analiz denge denklemleri	46
3.2.5.	Kiriş deplasman analizi	47
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	49
4.1.	Test edilen kirişlerin analizi	49
5.	SONUÇLAR	55
6.	ÖNERİLER	56
	KAYNAKÇA	57
	ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1. Çelik lifli beton kullanımına örnek yapı	1
Şekil 1.2. Çelik liflerin farklı uç kanca tipleri (Kozak, 2013).....	2
Şekil 1.3. Farklı lif boyutlarının çatlak köprülenmesine etkisi (Yalçın, 2009).....	3
Şekil 3.1. Çelik liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri	12
Şekil 3.2. Silindir ve prizma numune kalıpları	14
Şekil 3.3. Kiriş boyutları ve kirişin kesit detayları	15
Şekil 3.4. Donatı hazırlığı ve kiriş kalıbının içine yerleştirilmesi	15
Şekil 3.5. Beton harcının hazırlanması	16
Şekil 3.6. Kiriş numune üretim aşaması	17
Şekil 3.7. Silindir ve prizma numune hazırlığı ve kür havuzuna bırakılması.....	17
Şekil 3.8. Basınç deney testi uygulanmış silindir numuneler	18
Şekil 3.9. B-0 silindir numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği	19
Şekil 3.10. BSF-20-5D silindir numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	19
Şekil 3.11. BSF-40-3D silindir numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	20
Şekil 3.12. BSF-40-4D silindir numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	20
Şekil 3.13. BSF-40-5D silindir numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	21
Şekil 3.14. BSF-60-3D silindir numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	21
Şekil 3.15. BSF-60-4D silindir numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	22
Şekil 3.16. BSF-60-5D silindir numunenin gerilme-şekil değiştirme grafiği.....	22
Şekil 3.17. Dört noktalı eğilme deney düzeneği	24
Şekil 3.18. Deney öncesi hazırlığı ve deney sonunda oluşan deformasyonlar	26
Şekil 3.19. B-0 kiriş numunesinin yük-orta deplasman grafiği	27
Şekil 3.20. BSF-20-5D kiriş numunesinin yük-orta deplasman grafiği.....	28
Şekil 3.21. Deney öncesi hazırlığı ve deney sonunda oluşan deformasyonlar	29
Şekil 3.22. Deney öncesi hazırlığı ve deney sonunda oluşan deformasyonlar	31
Şekil 3.23. BSF-40-3D kiriş numunesinin yük-orta deplasman grafiği.....	31
Şekil 3.24. Deney öncesi hazırlığı ve deney sonunda oluşan deformasyonlar	33
Şekil 3.25. BSF-40-4D kiriş numunesinin yük-orta deplasman grafiği.....	34
Şekil 3.26. Deney öncesi hazırlığı ve deney sonunda oluşan deformasyonlar	35
Şekil 3.27. BSF-40-5D kiriş numunesinin yük-orta deplasman grafiği.....	36
Şekil 3.28. Deney öncesi hazırlığı ve deney sonunda oluşan deformasyonlar	37
Şekil 3.29. BSF-60-3D kiriş numunesinin yük-orta deplasman grafiği.....	38
Şekil 3.30. Deney öncesi hazırlığı ve deney sonunda oluşan deformasyonlar	39
Şekil 3.31. BSF-60-4D kiriş numunesinin yük-orta deplasman grafiği.....	40
Şekil 3.32. Deney öncesi hazırlığı ve deney sonunda oluşan deformasyonlar	41
Şekil 3.33. BSF-60-5D kiriş numunesinin yük-orta deplasman grafiği.....	42
Şekil 3.34. Kiriş numunelerin yük-orta deplasman (TD2) karşılaştırmalı grafiği	43
Şekil 3.35. Tipik beton ve çelik gerilme-birim deformasyon modelleri.....	44
Şekil 3.36. Kiriş birim deformasyon ve gerilme dağılımı.....	45
Şekil 3.37. Dört nokta yüklemesi altında kiriş eğilmiş hali görünümü.....	47

Sinüs Eğrisi Yöntemi'nde kirişte oluşan deplasman Denklem (3.6) ile ifade edilmektedir. ...	47
Şekil 4.1. B-0 kiriş numunenin deneysel ve teorik olarak Yük-Deplasman eğrileri	50
Şekil 4.2. BSF-20-5D kiriş numunenin deneysel ve teorik olarak Yük-Deplasman eğrileri...	50
Şekil 4.3. BSF-40-3D kiriş numunenin deneysel ve teorik olarak Yük-Deplasman eğrileri...	51
Şekil 4.4. BSF-40-4D kiriş numunenin deneysel ve teorik olarak Yük-Deplasman eğrileri...	51
Şekil 4.5. BSF-40-5D kiriş numunenin deneysel ve teorik olarak Yük-Deplasman eğrileri...	52
Şekil 4.6. BSF-60-3D kiriş numunenin deneysel ve teorik olarak Yük-Deplasman eğrileri...	53
Şekil 4.7. BSF-60-4D kiriş numunenin deneysel ve teorik olarak Yük-Deplasman eğrileri...	53
Şekil 4.8. BSF-60-5D kiriş numunenin deneysel ve teorik olarak Yük-Deplasman eğrileri...	54



TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1. Kiriş numunelerin karışım oranları (kg/m ³)	13
Tablo 3.2. Portland Çimento betonunun karışım oranları (kg/m ³)	13
Tablo 3.3. Kiriş numune isim ve içerikleri	23
Tablo 4.1. Test edilen kirişlerin teorik ve deneysel değerlerinin kıyaslaması	49



KISALTMALAR

m	: Metre
cm	: Santimetre
mm	: Milimetre
vd.	: Ve diğ�erleri
kg	: Kilogram
N	: Newton
kN	: KiloNewton
m ³	: Metreküp
MPa	: Megapaskal
CEM	: Çimento sınıfı
RC	: Betonarme
BS	: İngiliz Standardı
EN	: Avrupa normu
Tic.	: Ticaret
Ltd. �ti.	: Limited �irketi
TS	: Türk Standardı
ASTM	: American Society Testing And Materials
b	: Genişlik
h	: Yükseklik
L	: Uzunluk

SEMBOLLER

A_s	: Donatı alanı
A_c	: Beton alanı
σ_s	: Çeliğin gerilmesi
ϵ_s	: Çeliğin birim deformasyonu
E_s	: Çeliğin elastisite modülü
f_y	: Çeliğin akma dayanımı
$\emptyset$	: Çelik donatı çapı
T_{d2}	: Kiriş açıklık orta noktası deplasmanı
ϵ_{cu}	: Betonun maksimum birim deformasyonu
P_u	: Kiriş teorik yükü
P_{test}	: Kiriş deneysel yükü
ϕ	: Eğrilik
M	: Moment
N	: Kuvvet denge denklemi eşiti
L_e	: Etkili boy
Δ	: Deplasman

1. GİRİŞ

İnşaat sektörünün ana malzemelerinden olan beton, sağladığı birçok avantajı nedeniyle yapılarda yaygın olarak kullanım alanı bulunmaktadır. Günümüzde teknolojinin gelişmesine bağlı olarak çok katlı yapılar inşa edilmekte ve söz konusu yapılarda yüksek dayanımlı beton kullanılmaktadır. Betonarme yapıların yüksek dayanımlı beton ile yapımında yüksek dayanımlı betonun gevrek davranışının hesaplara yansıtılması büyük önem arz etmektedir. Bilindiği üzere yüksek dayanımlı beton normal dayanımlı betona kıyasla daha gevrek bir malzeme olduğundan maksimum gerilme değerine ulaştıktan sonra sınırlı düzeyde deformasyon kapasitesine sahiptir. Bu nedenle yüksek dayanımlı beton ile inşa edilen yapının özellikle deprem gibi dinamik yük etkisi altında enerji yutma kapasitesinin iyileştirilmesi önemli bir problemidir.

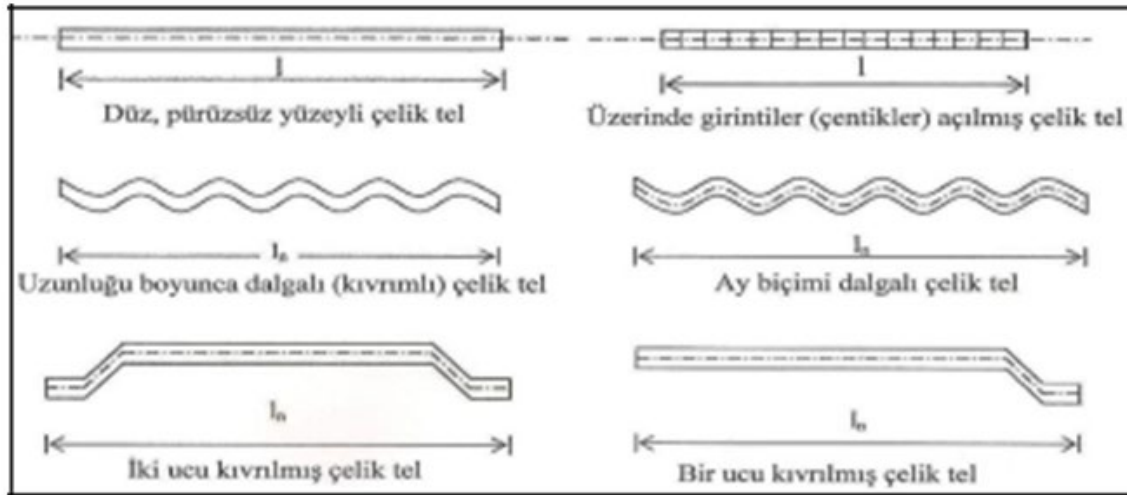
Yüksek dayanımlı betonun yapısal elemanlarda kullanımında elemanın gevrek davranışını daha sünek hale getirebilmek için birtakım çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan başlıcaları uzun zamandır uygulanan ve günümüzde giderek yaygınlaşan katkı içeren beton kullanımıdır. Lif olarak adlandırılan bu malzemelerden betonarme yapısal elemanlarda en yaygın olarak kullanılanı çelik liflerdir. Çelik lifler uzun yıllardır kullanılan bir malzeme olmasına rağmen günümüzde geliştirilerek kullanımı daha da yaygınlaşmıştır (Şekil 1.1). Çelik liflerin en çok kullanım alanı olarak yüksek dayanımlı betonarme yapılar, depreme dayanıklı yapılar, çok katlı binalar, havaalanı kaplamaları ve endüstri yapıları olarak söylenebilir (Kozak, 2013).



Şekil 1.1. Çelik lifli beton kullanımına örnek yapı (Blaszczynski ve Przybylska-Falek, 2015)

Çelik liflerin uygun oranlarda betona ilave edilmesi ile betonun ve betonarme yapı elemanların mekanik özelliklerinin yanında elemanların süneklik kapasitesinde de önemli derecede iyileşmeler sağlanabilmektedir. Ayrıca çelik lifler ısıya karşı dayanıklı olması, çekme dayanımının betona kıyasla daha yüksek olması ve beton içinde çimento hamuruyla bağlanmayı sağlayan geometrik özellikleri sonucu beton ile aderansını iyi sağlayarak betonarme yapılarda meydana gelen çatlakların fazla genişlemesini önleyebilmesiyle de ön plana çıkmaktadır. Ancak söz konusu liflerin literatürde önerilen optimum oranlarda kullanılması gerekmektedir. Aksi takdirde özellikle homojen bir çimento hamuru elde edilmesinde ve betonun kalıba yerleştirilmesinde olumsuzluklar oluşturabilmektedir (Tahenni, 2016).

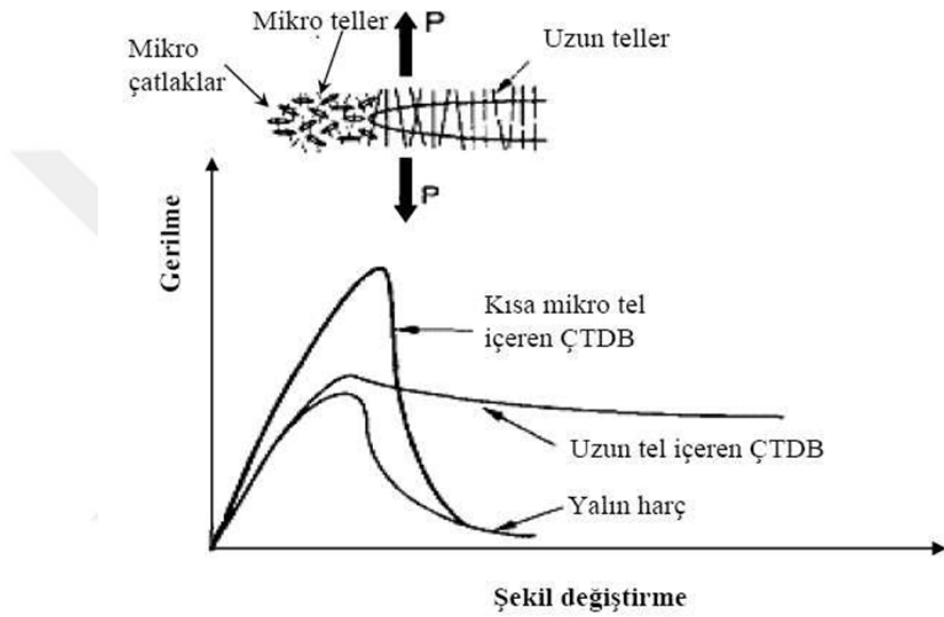
Çelik lifler genellikle boy/çap oranları ve uç geometrik şekilleri ile sınıflandırılmaktadır (Şekil 1.2). Ayrıca çelik lifin tipi, geometrisi ve narinliği gibi malzemenin fiziksel parametreleri lifli betonarme yapıların performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Lifin narinliği boy/çap oranı olarak kabul edilen bir parametredir. Fiziksel özelliklere ek olarak lifin beton içerisinde hacimce oranı ve liflerin betona eklendikten sonra beton içerisinde homojen olarak dağılımı da betonun performansını etkileyen diğer önemli parametrelerdir (Tokgöz, 2012).



Şekil 1.2. Çelik liflerin farklı uç kanca tipleri (Kozak, 2013)

Farklı geometrideki liflerin yanı sıra boyutsal olarak da mikro ve makro lif olarak adlandırılan çelik lif türleri vardır. Mikro lifler boyutları nedeniyle beton içerisinde daha sık bir lif dağılımı oluşturarak betonda oluşan çatlakların makro boyuta ulaşmasını engeller ya da gecikmesine

yardımcı olur. Mikro lifler betonarme yapının yapının belirli bir yük altında maksimum yüke ulaşana kadar olan elastik bölgedeki davranışın geliştirilmesinde etkilidir. Makro lifler ise elemanın elastisite modülü, çekme ve eğilme dayanımlarının iyileştirilmesinde daha fazla etkilidir. Makro çatlakların kontrol edilmesinde ve ayrıca gerilimin yayılmasını sağlayarak elemanın sünek davranış göstermesinde etkilidir. Maksimum yük ve ilk çatlak sonrası betonun davranışında etkilidir. Farklı lif boyutlarının, çatlak köprülenmesindeki etkisi Şekil 1.3'te gösterilmektedir (Yalçın, 2009; Güngör, 2013).



Şekil 1.3. Farklı lif boyutlarının çatlak köprülenmesine etkisi (Yalçın, 2009)

1.1. Çalışmanın Önemi

Çelik lifli yapı elemanları üzerine birtakım çalışmalar literatürde yer almaktadır. Farklı geometrik şekillerde üretilen yeni tip lif türleri (3D, 4D ve 5D) üzerine çalışmalar güncel olarak devam etmektedir. Günümüzde özellikle 3D, 4D ve 5D gibi çeşitli uç kanca düzenlemesine sahip çelik lifler ile üretilen yapısal elemanların davranışının incelenmesi üzerine çalışmalar yoğun olarak devam etmektedir.

Sunulan çalışma kapsamında farklı tipte uç kancalı çelik lifli betonarme kirişler üretilmiş ve çelik lif katkısının kirişlerin davranışı üzerine etkisinin incelenmesi amacıyla kirişlere dört nokta yükleme eğilme testi uygulanmıştır. Üç farklı oranda çelik lifli ve bir adet çelik lifsiz olmak üzere toplam 8 adet kiriş hazırlanmıştır. Deney sonuçları ile kirişlerin taşıma gücü

kapasiteleri ve yük deplasman eğrileri elde edilerek çelik liflerin kiriş davranışına etkisi araştırılmıştır. Ayrıca çalışma kapsamında malzemelerin doğrusal olmayan davranışını esas alan teorik bir yöntem geliştirilerek, test edilen kirişler taşıma gücü ve yük-deplasman eğrilerinin belirlenmesi amacıyla analiz edilmiştir. Çalışmada, deneysel olarak elde edilen sonuçlar analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bölüm 1 – Giriş: Tezin konusu ile ilgili genel bilgiler verilmiştir.

Bölüm 2 – Önceki Çalışmalar: Çelik ve karma lifli betonarme kirişlerin özellikleri, kullanım alanları ve yapısı ile ilgili yapılan araştırmalar sunulmuştur. Literatürdeki çalışmalar kapsamında elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Bölüm 3 – Malzeme ve Yöntem: Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan malzemeler ve deney yöntemlerine yer verilmiştir. Dört nokta yüklemesi eğilme testi uygulanan çelik lifli ve lifsiz betonarme kirişlerin davranışı ele alınmıştır.

Bölüm 4 – Bulgular ve Tartışma: Deneysel sonuçların değerlendirilerek elde edilen bulgular sunulmuştur. Test edilen çelik lifli ve lifsiz betonarme kirişler analiz edilmiştir. Elde edilen teorik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak sunulmuştur.

Bölüm 5 – Sonuçlar: Çalışma kapsamında test edilen çelik lifli ve lifsiz kiriş numunelerin deneysel ve teorik davranışından elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Bölüm 6 – Öneriler: Daha sonra yapılacak çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Çelik Lifli Betonların Kullanım Alanları

Betonun bilinen olumlu özelliklerinin yanı sıra özellikle yüksek dayanımlı betonun gevrek davranış gösteren mekanik özelliğinin iyileştirilmesi için çelik lif kullanımı artmaktadır. Depreme dayanıklı yapı inşasında, yapının dinamik yüklere karşı daha sünek bir davranış sergileyebilmesi için çelik lifli beton kullanılabilir. Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde yüksek kesme kuvveti meydana gelebilmekte ve çelik lifli beton kullanımı ile çatlak oluşumu engellenebilmektedir. Fabrika, depo döşemeleri aşırı yük ve zorlamalara ve dinamik yüklere maruz kalmaktadır. Bu yükleri karşılayabilmek için çelik lifli yüksek dayanımlı betonların kullanımı mevcuttur. Havaalanı ve liman kaplamalarında da bu avantajları nedeniyle kullanılmaktadır. Ayrıca betonarme borular ve altyapı malzemelerinde hasır çelik yerine çelik lif kullanımı yaygındır (Kozak, 2013).

Sunulan tez çalışmasının bu bölümünde konu kapsamında yapılmış olan önceki çalışmalar aşağıda verilmiştir.

2.2. Önceki Çalışmalar

Fatih ALTUN vd. (2006), çelik lifli ve lifsiz betonarme kirişlerin basit eğilme etkisi altında elemanların davranışını incelemişlerdir. Çalışmanın ilk aşamasında 0-30-60 kg/m³ dozajlarında her karışım için 6 adet olmak üzere 18 adet silindir numune üretilmiş ve çelik lif katkısının, betonun mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise 0-30-60 kg/m³ hacimsel oranda çelik lif katkılı toplam 9 adet betonarme kiriş üretilmiştir. Kirişlerin boyutu 300×300×2000 mm'dir. Çalışmada, C30 beton sınıfı ve S420 donatısı ve çelik lif olarak RC 80/0,60 BN tipi çelik lif kullanılmıştır. Çalışmada RC 80/0,60 BN tipi çelik lif kullanılmıştır. Silindir numuneler 28 gün sonunda kırılmış ve gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Beton dayanım sonuçlarının birbirine yakın olduğu, Elastisite modüllerinde ise lifsiz numunenin daha avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır. Enerji yutma kapasiteleri incelendiğinde ise çelik lif dozajı arttıkça kapasitesinin arttığı ve daha sünek davranış sergilediği vurgulanmıştır. Ayrıca çelik lifin taşıma gücü kapasitesini artırdığı ve bu çelik lif

katkısının kirişlerin çekme bölgesinde çatlak oluşumunun azalmasını veya geciktirilmesinin bir sonucu olduğu kanısına varılmıştır.

Fuad OKAY ve arkadaşları (2009), çelik lifli normal dayanımlı betonarme kirişlerin burulma davranışını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada, beton karışımlarında farklı boyutlarda boy/çap oranlı (40, 55, 67, 80) çelik lifler kullanılmıştır. Çelik lif hacimce %0,3-0,6 oranlarında 12 adet kiriş numune üretilmiştir. Üretilen kirişler düzenli artan yükleme ile test uygulanmış ve burulma momenti – birim dönme açısı eğrileri elde edilmiştir. Yazarlar deneyler sonucunda çelik lif miktarının enerji yutma kapasitesi ve burulma kapasitesi üstündeki etkisini incelemişlerdir. Analizler sonucunda betona çelik lif eklenmesinin kirişlerin burulma momenti, taşıma ve enerji yutma kapasitelerinde önemli artış olduğunu saptamışlardır. Yapıların ani göçmesinin engellenip daha fazla sünek davranış gösterdiği gözlenmiştir. Çelik lif ilavesi ile kirişlerde kılcal çatlak oluşumunda artış gözlemlendiği ama çatlak genişliğinin kılcal düzeyde kaldığı belirtilmiştir.

Rao Tadeipalli vd. (2009), farklı tipte çelik lifli betonarme kirişlerin mekanik özelliklerinin araştırılması üzerine çalışmışlardır. Çalışma kapsamında kiriş numunelerde 3 farklı çelik lif kullanılmıştır. Toplam 13 kiriş numune üretilmiş ve her bir kiriş üretiminde üç adet silindir numune alınmıştır. Kirişlerin eğilme testlerinde ASTM C 1609 standardına uygun olarak dört noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Deneysel çalışmada, kirişlerin basınç dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü, tokluk ve süneklik özellikleri üzerine incelemeler yapılmıştır. Çelik lif tipi ve miktarının söz konusu mekanik özellikler üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda çelik lifsiz kirişin maksimum dayanımına ulaştığı anda ani şekilde kırıldığı ve sünek davranış gösteremediği gözlenmiştir. Hacimce çelik lif oranı arttıkça kirişin eğilme kapasitesinin arttığı, kancalı lifli kirişlerin düşük hacimsel yüzdelerde kirişin tokluğunu önemli ölçüde artırdığını belirtilmiştir. Ayrıca çelik lif katkısının basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerinde etkisinin az olduğu ancak eğilme dayanımı, tokluk ve süneklik özellikleri üzerinde önemli gelişmeler sağladığı gözlenmiştir.

Song ve Hwang (2004), çelik lifli yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin mekanik özelliklerinin araştırılması üzerine çalışma yapmışlardır. Yüksek dayanımlı betonarme yapı elemanları daha gevrek davranış gösterdikleri ve düşük çekme dayanımlarına sahip olduğu için çelik lif katkısı

ile bu özelliklerin iyileştirilebilmesi üzerine çalışma yürütülmüştür. Ayrıca basınç ve direk çekme dayanımları ve tokluk indeksi üzerine araştırmalar yapılmıştır. Beton karışımına hacimce %0,5-1-1,5-2 oranlarında çelik lif eklenerek betonarme kiriş numuneler üretilmiştir. Ayrıca 15 silindir numune ile basınç testi ve 15 silindir numune ile çekme testi yapılmıştır. Deney verilerine göre basınçta maksimum değere (%15 gelişim) %1,5 çelik lifli kirişte ulaşılmış, direk çekme testinde ise %2 çelik lifli numuneye kadar artış %126'ya kadar görülmüştür. Bu durumda elde edilen verilere göre çelik lifler basınç dayanımı üzerinde daha az etki gösterirken çekme dayanımında önemli derecede artışa katkı sağlamıştır. Bunun yanında, çelik lif oranı artışının elemanın tokluğunu yani enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde artırdığını gözlemlemişlerdir.

Young Lee vd. (2017), çelik lif katkılı ve katkısız betonarme kirişlerin farklı yükleme koşulları altında davranışını incelemişlerdir. Ayrıca çalışmada etriyeli ve etriyesiz de üretilerek davranış incelemesi yapılmıştır. Kiriş boyutları 125×250×2438 mm'dir. Çalışmada 3 farklı hacimsel oranda (0-0,5-1) kanca uçlu çelik lif karışımlı kiriş numuneler üretilmiş ve ayrıca her karışım etriyeli ve etriyesiz olarak 2 farklı şekilde üretilerek kıyaslaması yapılmıştır. Statik ve dinamik olmak üzere 2 farklı tipte yükleme uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre çelik lif katkısının statik ve dinamik yükler altında taşıma gücü kapasitesi, enerji yutma kapasitesi değerlerini artırdığı, deplasman değerlerini azalttığı görülmüştür. Ancak etriyesiz kirişlerde %0,5-1 çelik lif katkısının gevrek kesme kırılmasını önlemede yetersiz kaldığı belirtilmiştir. Diğer taraftan şekil değiştirme oranlarına bakılmaksızın tüm yükleme durumlarında çelik lifli kirişlerin daha yüksek performans gösterdiği vurgulanmıştır.

Altun ve Aktaş (2012), çelik lif katkılı hafif betonarme kirişlerin davranışı üzerine çalışma yürütmüşlerdir. Öncelikle çalışma kapsamında hafif betonların kullanımı üzerine çalışma yapılmıştır. Hangi özelliklerinin avantajlı ya da dezavantajlı olduğu belirlenmiş ve çelik lif katkısı ile bu olumsuz özelliklerin azaltılabileceği açıklanmıştır. Bu kapsamda farklı hacimsel oranlarda (0, 30, 60 kg/m³) çelik lif katkılı betonarme kiriş numuneler üretilmiştir. Çalışmada, Dramix RC 80/0,60 BN tipi kancalı çelik lif kullanılmıştır. Ayrıca 3 farklı dozajda beton karışımı elde edilmiş olup numunelere dört noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, çelik lif katkısı ile kirişin tokluğunda ve sünek davranış göstermesinde önemli faydası olduğu, taşıma gücü değerlerinde de önemli artış sağladığı belirtilmiştir.

Mehmet Gülşan (2019), yüksek dayanımlı çelik lifli değişken kesitli betonarme kirişlerin mekanik davranışı üzerine çalışma yapmıştır. Çalışmada dördü prizmatik ve dördü değişken kesitli olmak üzere toplam 8 adet kiriş numune üretilmiştir. Üretilen kirişlerdeki değişken parametreler kiriş geometrisi ve çelik lif katkı oranıdır. Bu kapsamda kullanılan çelik lif oranları hacimce %0-0,5'tir. Betonun hedef basınç dayanımı 60 MPa, çelik lif türü ise Dramix 35/0,75 mm'dir. Üretilen kirişlere dört nokta yükleme eğilme testi uygulanmıştır. Yükleme testleri ile yük-deplasman eğrileri elde edilmiş, çatlak oluşum ve yayılımları takip edilmiştir. Deneysel veriler sonucunda çelik lif katkısının kirişlerin yük taşıma kapasitesine ve deplasman yapabilme özelliklerine önemli katkı sağladığı belirtilmiştir. Çelik lif katkısının yüksek dayanımlı kirişlerin yük taşıma kapasitesini ve göçme tipini çok değiştirmedeğini ancak kirişlerin gevrek biçimde kırılmasını engellediği, sünekliğini ve enerji yutma kapasitesini artırdığı ifade edilmiştir.

Hoang ve Fehling (2017), çalışmasında farklı hacimsel oranda ve farklı narinlik oranlarında üretilen çok yüksek dayanımlı betonların çekme ve basınç yüklemesi altında davranışlarını test etmişlerdir. Çalışma kapsamında basınç testi için 150×300 mm boyutlarında lif katkılı silindir numuneler; çekme testi için 40×40×80 mm boyutlarında lif katkılı prizma numuneler üretilmiştir. Araştırmacılar deney kapsamında 3 farklı narinlik oranında (0,175-0,25-0,15) ve farklı hacimsel oranda çelik lif katkılı (1,5% ve 3%) numuneler üretmişlerdir. Deney sonucunda çelik lif katkı oranı ve narinlik oranlarının basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerinde etkisinin önemli ölçüde olmadığı ancak, betonun kırılma davranışında önemli ölçüde katkısının olduğu vurgulanmıştır.

Çivici ve Güngör (2016), farklı tipte lif katkılı betonların performansları üzerine çalışma yürütmüşlerdir. Çalışma kapsamında 11 adet farklı beton numune üretilmiş olup farklı karışım oranlarında çelik lif (20-40 kg/m³) ve polipropilen lif katkısı kullanılıp 150×150×550 mm'lik kiriş ve 150×150×150 mm'lik küp beton numuneler eğilme ve basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda lif katkısının artmasıyla betonun enerji yutma kapasitesinin arttığı ve ayrıca en iyi performansın karma lif katkılı numunelerde meydana geldiği sonucuna varılmıştır.

Yoo vd. (2016), çelik lif katkısının betonarme kirişin sünek davranışına etkisini incelemek için çalışma yürütmüşlerdir. Çalışma kapsamında 3 farklı uzunluk (13-16,3-19,5 mm) ve narinlikte çelik lif kullanılmış olup çekme davranışı için kırılma öncesi ve sonrası olarak modelleme yapılmıştır. Deneysel çalışma sonucunda 19,5 mm uzunluğunda çelik lif katkılı kirişin çekme dayanımında daha fazla artış olduğu taşıma kapasitesinin de yaklaşık 15-36% oranında arttığı sonucuna varmışlardır. Ayrıca 19,5 mm çelik lif katkılı numunenin daha sünek davranış sergilediği ve mikro çatlak oluşumunun daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

Wang vd. (2018), çalışmada çelik lifli betonarme kirişlerin deneysel ve teorik analizlerini yapmışlardır. Farklı hacimsel oranda ve tipte çelik lif kullanılarak 9 adet yüksek dayanımlı betonarme kiriş üretilip sünek davranışları test edilmiştir. Çalışmada dört nokta eğilme testi uygulanmıştır. Çalışma sonucunda çelik lif katkısıyla ilk çatlak oluşum yükünün arttığı ancak kiriş dayanımı ve taşıma gücü kapasitesinde az miktarda artış olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çelik lif tipinin kırılma davranışında belirgin farklılık oluşturmadığı ancak kirişin dayanımında önemli artış oluşturduğu vurgulanmıştır.

Venkateshwaran vd. (2018), çalışmasında çelik lifli beton prizma numunelerin 3 nokta eğilme yüklemesi altında performansı incelenmiştir. Çalışma EN 14651 standardına uygun olarak yürütülmüştür. 3 tip çelik lif (3D-4D-5D) ve farklı lif boyutunda (35 ve 60 mm) kullanılmış olup 150×150×550 mm prizma numuneler test edilmiştir. Deney sonucunda 20 kg/m³'ten daha fazla uç kancalı çelik lif katkılı numunelerde ilk çatlak sonrasındaki dayanıma önemli etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Test sonucuna göre, deneysel analizde eğilme davranış verilerinin literatüre uygun olduğu çıkarımı yapılmıştır.

Lee vd. (2018), çelik lifli, lifsiz ve etriyeli, etriyesiz olarak üretilen betonarme kirişlerin yapısal davranışlarını incelemişlerdir. Farklı yükleme tiplerinde ve Farklı hacimsel karışım oranlı çelik lif katkısının etkisi tespit edilmiştir. Test sonuçlarına göre, çelik lifli kirişlerin farklı yükleme altında lifsiz kirişlere göre daha fazla taşıma gücü kapasitesine ulaştığı, daha fazla enerji yuttuğu ve daha düşük kalıcı deformasyonun olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak etriyesiz çelik lif katkılı kirişlerin kesme kırılmasında yeteri kadar etkili olmadığı saptanmıştır.

Kim vd. (2011), çalışmasında dört adet farklı tip çelik lifli yüksek dayanımlı beton numunelerin performansını araştırmışlardır. Kısa ve uzun düz uçlu çelik lif, iki tip uç kancalı çelik lif ve kıvrımlı çelik lif eklenerek numuneler üretilmiştir. Çalışma sonucunda farklı tipte çelik lif katkısının betonun eğilme dayanımını artırdığı, enerji yutma kapasitesinde artış sağladığı tespit edilmiştir. Çelik lif katkılı numunelerin etkileri kıyaslandığında ise en fazla katkının uç kancalı çelik lif katkılı numunede görüldüğü, en az katkının ise kısa düz uçlu çelik lifli numunede olduğu sonucuna varılmıştır.



3. MATERYAL VE METOT

Sunulan çalışmada, dört nokta yükleme altında çelik lifli betonarme kirişlerin eğilme davranışının belirlenmesi amacıyla deneysel ve teorik bir çalışma yürütülmüştür. Deneysel çalışma kapsamında, 8 adet kiriş numunesi üretilmiştir. Söz konusu kirişler farklı uç kancalı çelik lif (3D, 4D ve 5D) ve farklı hacimsel oranda (20, 40, 60 kg/m³) ile ve bir adet numune de çelik lifsiz beton ile üretilmiştir. Kiriş numuneler dört nokta yükleme etkisi altında test edilerek yük taşıma kapasiteleri ve yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında aşağıdaki deney parametreleri esas alınmıştır.

- Betonun silindir basınç dayanımı
- Çelik lifli ve lifsiz beton
- Kullanılan çelik lif tipi (3D-4D-5D) ve hacimsel oranları (20, 40, 60 kg/m³)

3.1. Deneysel Çalışma

3.1.1. Malzemeler

Deneysel çalışma kapsamında Portland çimentosu içeren 1 adet çelik lifsiz olmak üzere toplam 8 adet kiriş numune üretilmiştir. Söz konusu numunelerin beton üretiminde farklı boyutlarda agrega, Portland çimentosu, süper akışkanlaştırıcı ve su kullanılmıştır. Deney kiriş numunesi boyutları 150×200×1750 mm (b×h×L) olup kirişlerde betonarme çelik donatısı ve çelik lifli ve lifsiz beton kullanılmıştır. Numune hazırlığında kullanılan malzemelerin özellikleri aşağıda sunulmuştur.

3.1.1.1. Agrega

Tez çalışması kapsamında üretilen beton karışımların yapısında kullanılan ince ve kaba agrega olarak farklı boyutlu agregalar, Adana'da dere yataklarından doğal olarak elde edilmiştir. Söz konusu kullanılan agregalar; 0-5 mm ince, 12-19 mm kaba agrega olmak zere 2 farklı boyut aralığındadır.

3.1.1.2. Çimento

Tez çalışmasında elde edilen numunelerde, Oyak Çimento tarafından TS EN 197-1 standardına uygun olarak üretilen CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır.

3.1.1.3. Kimyasal Katkı

Söz konusu tez çalışmasında, betonun işlenebilirliğini artırmak için, Master Builders Solutions Yapı Kimyasalları San. ve Tic. Ltd. Şti. Firmasından hazır olarak temin edilen MasterGlenium 51 polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı nitelikli beton katkısı kullanılmıştır.

3.1.1.4. Çelik Donatı

Çalışma kapsamında kiriş üretiminde basınç ve çekme donatısı olarak standart betonarme çelik donatıları kullanılmıştır. Söz konusu donatılar 10 mm ve 14 mm çaplı, akma dayanımı 550 MPa ve Elastisite modülü 2×10^5 MPa çelik donatılardır.

3.1.1.5. Çelik Lif

Sunulan çalışma kapsamında, beton karışımında Dramix RC 65/60 BN lif türünde 3 farklı tipte kanca uçlu çelik lifler kullanılmıştır. Söz konusu çelik lifler farklı uç kanca özelliklerine sahip olup 3D, 4D ve 5D olarak isimlendirilmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan çelik liflerin özellikleri ve geometrik şekilleri Şekil 3.1’de görülmektedir.

Lif Tipi	Lif geometrisi	Kanca Tipi	Narinlik Oranı	Boy (mm)	Çap (mm)	Çekme (MPa)	Dayanım ı
3D 65/60		3D	65	60	0,90	1160	
4D 65/60		4D	65	60	0,90	1500	
5D 65/60		5D	65	60	0,90	2300	

Şekil 3.1. Çelik liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri

3.1.1.6. Su

Çalışmada üretilen numunelerin beton karışımında Adana ili şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.1.7. Beton

Yapılan deneysel çalışma kapsamında farklı hacimsel oranda ve tipte çelik lifli ve standart çelik lifsiz beton kullanılmıştır. Beton karışımında CEM I 42,5R sınıfı çimento kullanılmış olup beton karışımı içerisinde farklı hacimsel oranda kaba ve ince agrega yer almıştır. Farklı tip çelik lif ve 20, 40, 60 kg/m³ hacimsel oranında çelik lif içeren 3 farklı türde çelik lifli beton karışımı üretilmiştir. Karışım oranlarının detayları Tablo. 3.1' de görülmektedir.

Tablo 3.1. Kiriş numunelerin karışım oranları (kg/m³)

<i>Numune</i>	<i>Çakıl</i>	<i>Kum</i>	<i>Çimento</i>	<i>Su</i>	<i>Akışkanlaştırıcı</i>	<i>Çelik lif</i>	<i>Çelik lif Tipi</i>
B-0	1120	760	400	140	5	0	-
BSF-20-5D	1120	765	400	140	5	20	5D
BSF-40-3D	1120	760	400	140	5	40	3D
BSF-40-4D	1120	760	400	140	5	40	4D
BSF-40-5D	1120	760	400	140	5	40	5D
BSF-60-3D	1120	750	400	140	5	60	3D
BSF-60-4D	1120	750	400	140	5	60	4D
BSF-60-5D	1120	750	400	140	5	60	5D

3.1.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

3.1.2.1. Karışım Oranlarının Belirlenmesi

Deney hazırlığı kapsamında üretilen kiriş numunelerin içerisinde bulunan betonun karışım oranının tespit edilmesi için literatür incelemesi ve değerlendirilmesi sonucunda, farklı oranlarda karışım hazırlanmıştır. Kiriş numune içerisinde yer alacak olan beton karışım oranlarının farklı lif oranlı numunelere göre içerikleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Portland Çimento betonunun karışım oranları (kg/m³)

Karışım Adı	Agrega (kg/m³)		Su (kg/m³)	Bağlayıcı (kg/m³)	Su/Bağlayıcı Oranı	Kimyasal Katkı (kg/m³)	Çelik Lif (kg/m³)
	İnce	Kaba		Çimento			
B-0	1135	760	140	400	0,35	5	0
BSF-20	1120	765	140	400	0,35	5	20
BSF-40	1120	760	140	400	0,35	5	40
BSF-60	1120	750	140	400	0,35	5	60

Tez kapsamında elik lifli (7 adet) ve liffsiz (1 adet) 8 adet kiriş numune üretilmiştir. Kiriş numunelerin boyutları 15×20×175 cm olup birer adet liffsiz ve 20 kg/m³ hacimsel oranda elik lifli kiriş ve üçer adet 40 ve 60 kg/m³ hacimsel oranda elik lifli kirişler üretilmiştir.

3.1.2.2. *Numunenin Geometrik Düzeni*

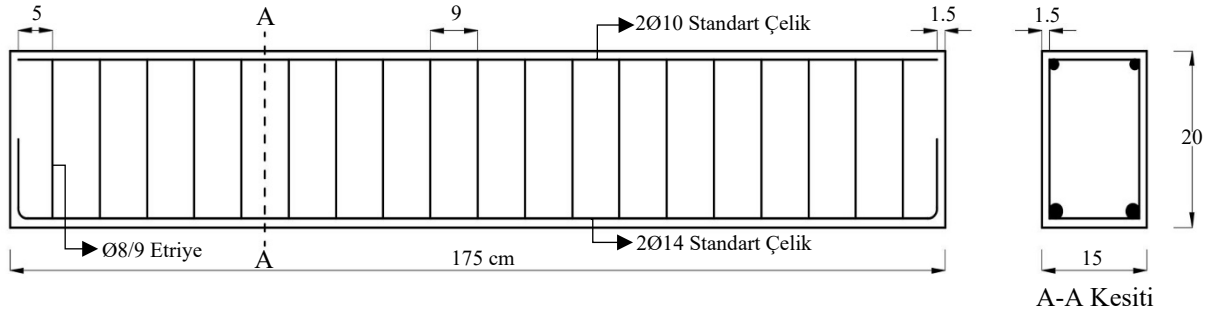
Kiriş numunelerin karışım oranlarının belirlenmesinin ardından bunların boyutlandırılması donatı detayının belirlenmesi aşamasına geçilmiştir. Tez kapsamında, bir adet elik lif katkısız ve yedi adet elik lif katkılı, 150×200 mm kesit boyutlarında ve 1750 mm uzunluğunda 8 adet kiriş numunesi hazırlanmıştır. Kiriş numunelerin çekme bölgesinde 2 adet 14 mm çapında standart elik donatı, basınç bölgesinde ise 2 adet 10 mm çapında standart elik donatı kullanılmıştır. Numunelerin kesit detayları, mekanik davranışının tespit edilebilmesi için kullanılan silindir ve prizma kalıpları şekil 3.2’de gösterilmiştir.



şekil 3.2. Silindir ve prizma numune kalıpları

3.1.2.3. *Donatı ve malzemelerin hazırlanması*

Çalışmada kirişler için boyuna donatı olarak S420 ekil sınıfında 2014 çekme ve 2010 basınç donatı, kesme donatısı olarak da Ø8/9 cm etriye kullanılmıştır. Kiriş boyut ve kesit özellikleri şekil 3.3’te görülmektedir. Uygun şekilde hazırlanan donatılar 1,5 cm paspayı ile kalıp içerisine yerleştirilmiştir (şekil 3.4).



Şekil 3.3. Kiriş boyutları ve kirişin kesit detayları



Şekil 3.4. Donatı hazırlığı ve kiriş kalıbının içine yerleştirilmesi

3.1.2.4. Çelik Lifli Betonun Üretimi

Çelik lifli betonun hazırlanması sürecinde, öngörülen karışım dikkate alınarak (Tablo 3.2) kum, doğal agrega, çelik lif, akışkanlaştırıcı ve su malzemeleri tartılarak hazırlanmıştır. Gerekli nem koşulları sağlanarak agrega ve kum 250 litre kapasiteli mikserle eklenip yaklaşık 5 dakika kuru olarak karıştırılmıştır. Bu sırada su ve akışkanlaştırıcı bir kap içerisinde dökülerek karıştırılmıştır. Çelik lifler üretim aşamasında hafif bağlayıcı ile yapışık olduğundan çözünmesi için söz konusu sıvı karışım içerisine eklenmiştir. Sonraki aşamada su ve akışkanlaştırıcı ile çimento kademeli olarak mikser içerisine eklenerek homojen karışım elde edilmiş ve bunun devamında çelik lif eklenip karıştırma işlemine devam edilmiştir (Şekil 3.5). Çelik lif çimento hamurunun içerisinde homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır. Kiriş dökümü esnasında betonun basınç dayanımını belirlemek için her döküm esnasında 2 adet prizma ve 3 adet silindir numune alınmıştır. Homojen olarak hazırlanan beton karışımı 150×200×1750 mm boyutlarına sahip metal çelik lif kalıplarına hızlı bir şekilde dökülmüştür.

Beton dökümü sırasında aynı zamanda boşluksuz yerleşmesi adına vibratör kullanılmıştır (Şekil 3.6). Kiriş dökümü sırasında betonun basınç dayanımını belirlemek amacıyla karışım içerisinde 3 adet 150×300 mm standart silindir numune alınmıştır. Ayrıca betonun çekme dayanımının belirlenmesi için 2 adet 100×100×500 mm prizma numune alınmıştır. Bu aşamalardan sonra beton dökümü tamamlanan numuneler prizini alması için 24 saat laboratuvar ortamında bırakılmıştır. Bu sürenin tamamlanmasının ardından silindir ve prizma numunelerin kalıpları sökülerek laboratuvar ortamında kür edilmiş olup aynı zamanda silindir ve prizma numuneler kür havuzuna bırakılmıştır. Beton dökümünün tamamlanmasından iki gün sonra kiriş numunelerin kalıpları sökülerek dayanımlarını kazanması için laboratuvar ortam şartlarında bekletilmiştir. Bu süreçte kiriş numuneler düzenli olarak sulanmıştır. Deney süreci kapsamında aşamaların detayları Şekil 3.5 ve Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’de görülmektedir.



Şekil 3.5. Beton harcının hazırlanması



Şekil 3.6. Kiriş numune üretim aşaması



Şekil 3.7. Silindir ve prizma numune hazırlığı ve kür havuzuna bırakılması

3.1.3. Deney yöntemi

3.1.3.1. Basınç dayanımı deneyi

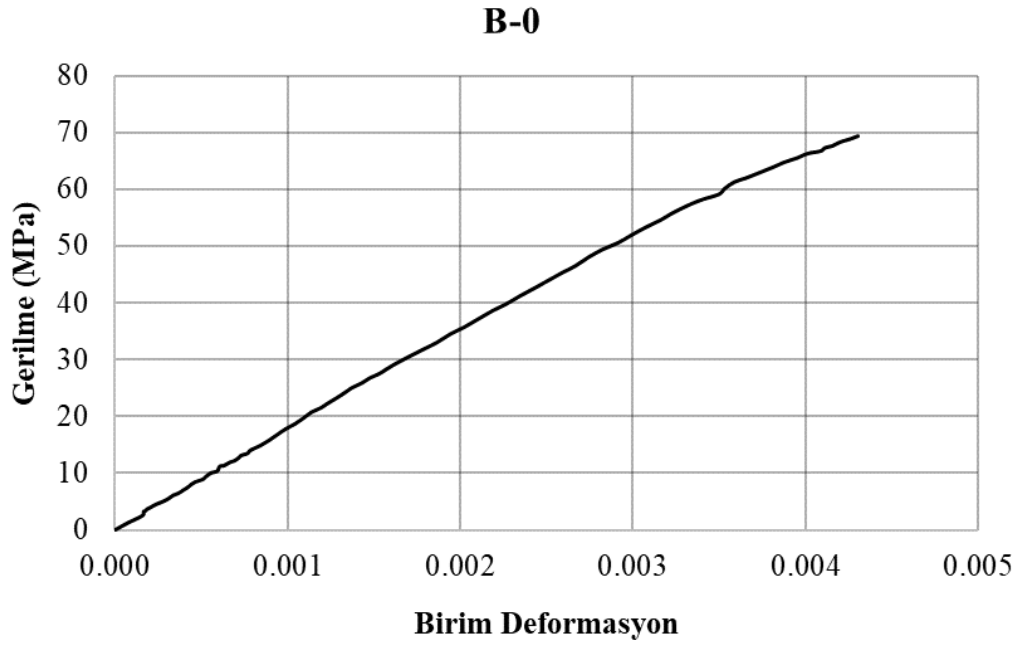
Betonun basınç dayanımının belirlenmesi; TS EN 12390-2 standardına uygun olarak hazırlanan ve kür işlemi uygulanan numunelerin, TS EN 12390-3 standardına uygun olarak basınç

dayanımlarının belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Tez kapsamında üretilerek kür havuzu içerisinde bekletilen silindir numunelerin, basınç testi öncesinde öncelikle kür havuzundan çıkarılarak kurutma işlemi uygulanmıştır. Kurutma işleminin ardından uygulanacak yükün üniform yayılması ve silindir üst kısmının düz olmasını sağlamak için silindir numunelerin üst kısmına kükürt başlık yapılmıştır. Bu uygulama; kükürt ve parafinden oluşan katı karışımın eritme havuzu içerisinde eritilmesi, başlık plakası hazırlama süreci ve numunelere uygulanması esaslarına dayanmaktadır. Bütün bu işlemlerin ardından, silindir numuneler tek eksenli basınç deney cihazı içerisine yerleştirilerek sabit yük altında test işlemi uygulanmıştır. Deney sonucuna göre uygulanan maksimum yük numunenin kesit alanına bölünerek beton basınç dayanımı hesaplanmıştır (Denklem 3.1). Deneysel çalışma kapsamında silindir numunelerin basınç dayanım testi sonucunda kırılma biçimi Şekil 3.8’de verilmiştir. Her bir karışıma ait silindir numunelerden elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 3.9-Şekil 3.16 aralığında verilmiştir.

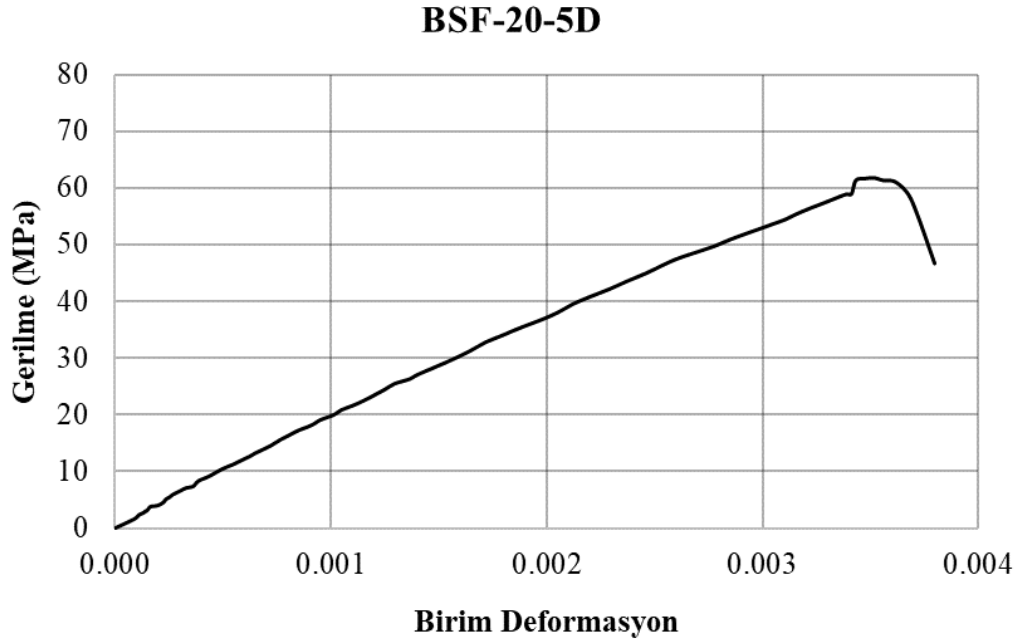
$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$



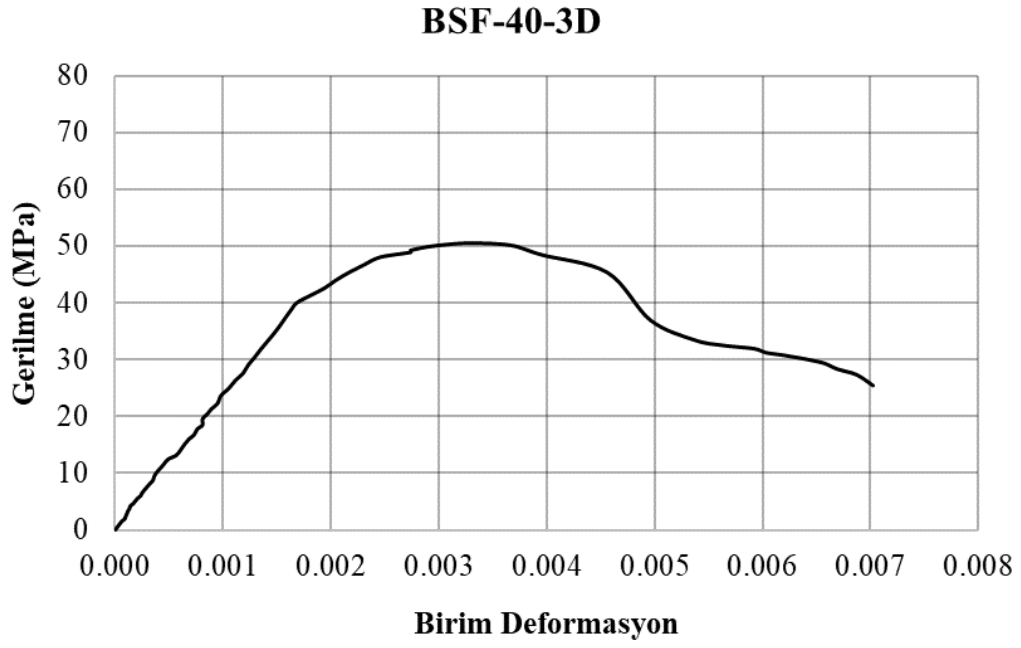
Şekil 3.8. Basınç deney testi uygulanmış silindir numuneler



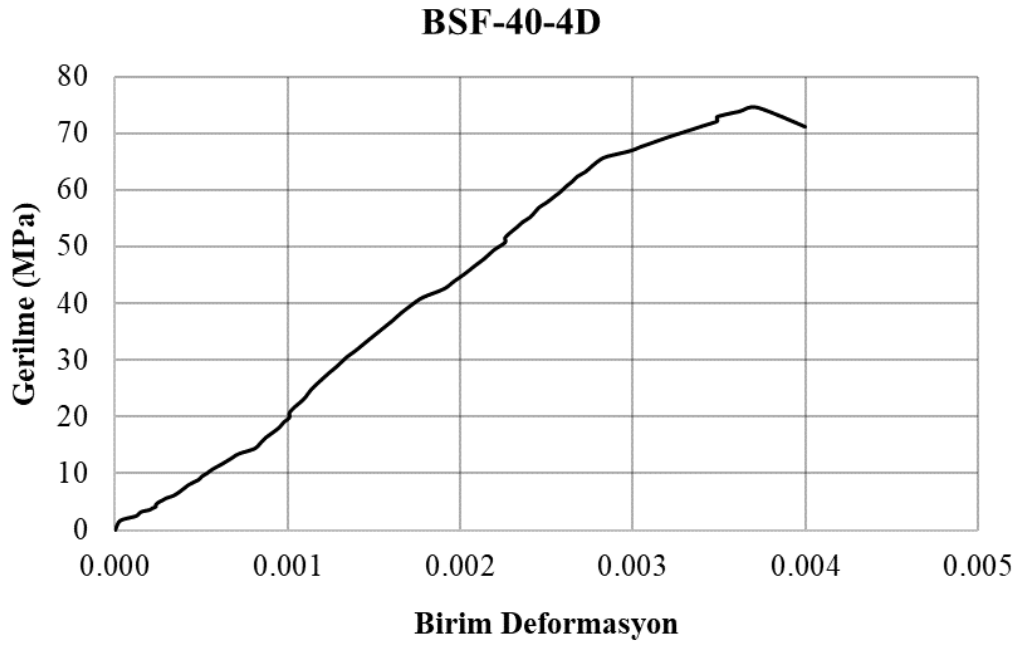
Şekil 3.9. B-0 numunesi beton gerilme-birim deformasyon grafiği



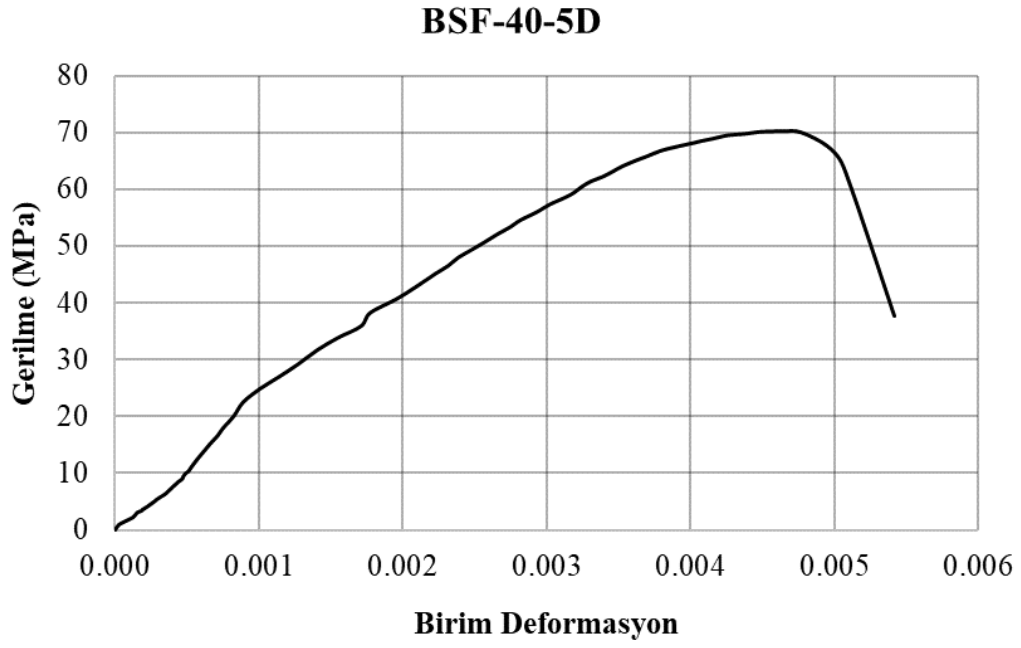
Şekil 3.10. BSF-20-5D numunesi beton gerilme-birim deformasyon grafiği



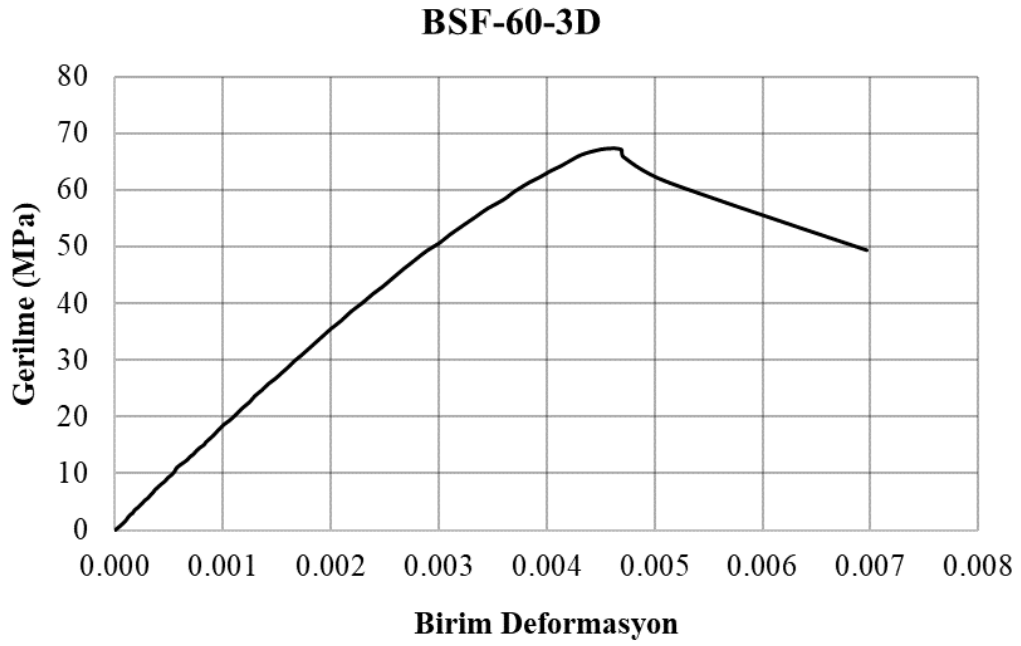
Şekil 3.11. BSF-40-3D numunesi beton gerilme-birim deformasyon grafiği



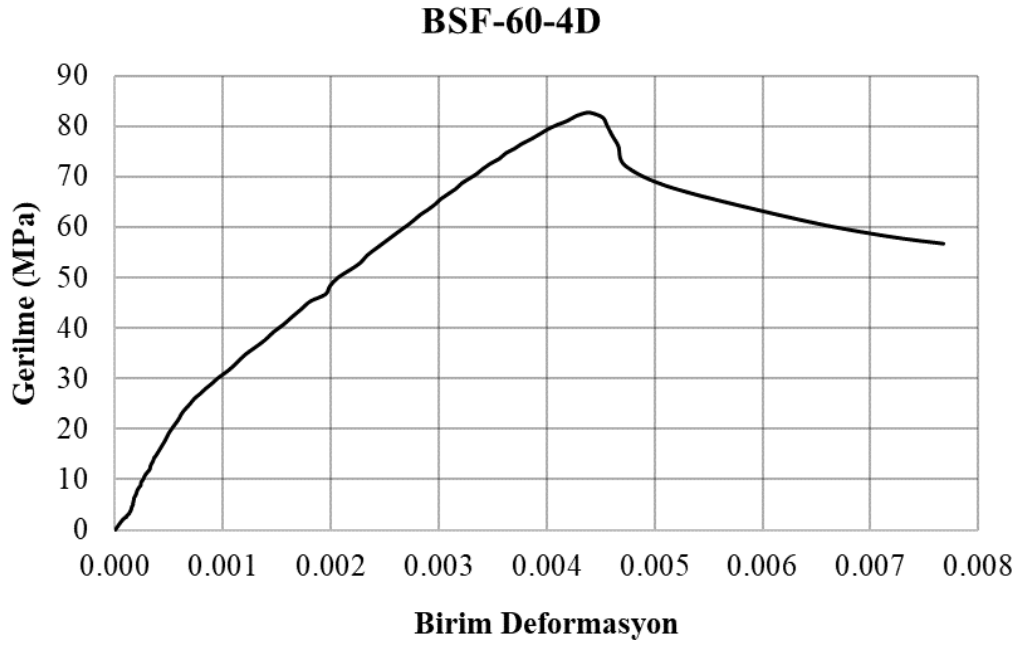
Şekil 3.12. BSF-40-4D numunesi beton gerilme-birim deformasyon grafiği



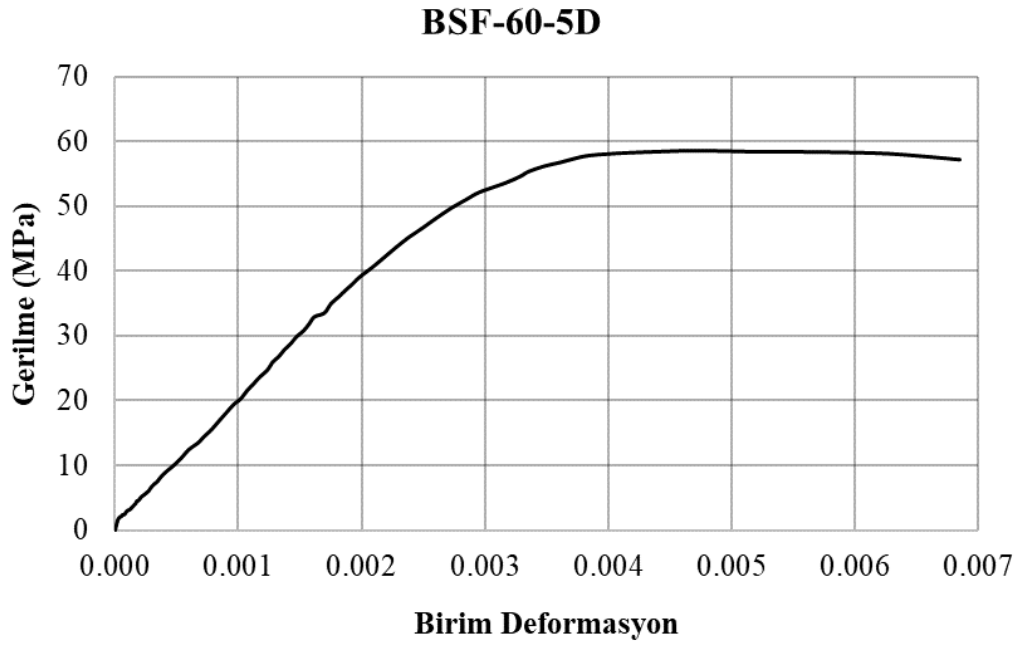
Şekil 3.13. BSF-40-5D numunesi beton gerilme-birim deformasyon grafiği



Şekil 3.14. BSF-60-3D numunesi beton gerilme-birim deformasyon grafiği



Şekil 3.15. BSF-60-4D numunesi beton gerilme-birim deformasyon grafiği



Şekil 3.16. BSF-60-5D numunesi beton gerilme-birim deformasyon grafiği

3.1.3.2. Eğilmede çekme dayanımı deneyi

Betonun çekme dayanımının belirlenmesi; TS EN 12390-2 standardına uygun olarak hazırlanan ve kür işlemi uygulanan numunelerin en dış liflerde meydana gelen eğilme dayanımlarının TS EN 12390-5 standardına uygun olarak tayin edilmesi esasına dayanmaktadır. Tez kapsamında üretilen 100×100×500 mm boyutlu prizma numuneler kür havuzunda bekletilmiştir. Söz konusu numunelerin eğilme testi uygulamasından önce kür havuzundan çıkarılarak kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemin ardından numuneler deney aleti içerisine yerleştirilip sabit yükleme altında dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sırasında prizma numunelerin kırıldığı andaki yükü tespit edilerek Denklem (3.2) yardımıyla prizma numunelerin eğilme dayanımları (f_{cf}) hesaplanmıştır.

$$f_{cf} = \frac{F \times L}{d_1 \times d_2^2} \quad (3.2)$$

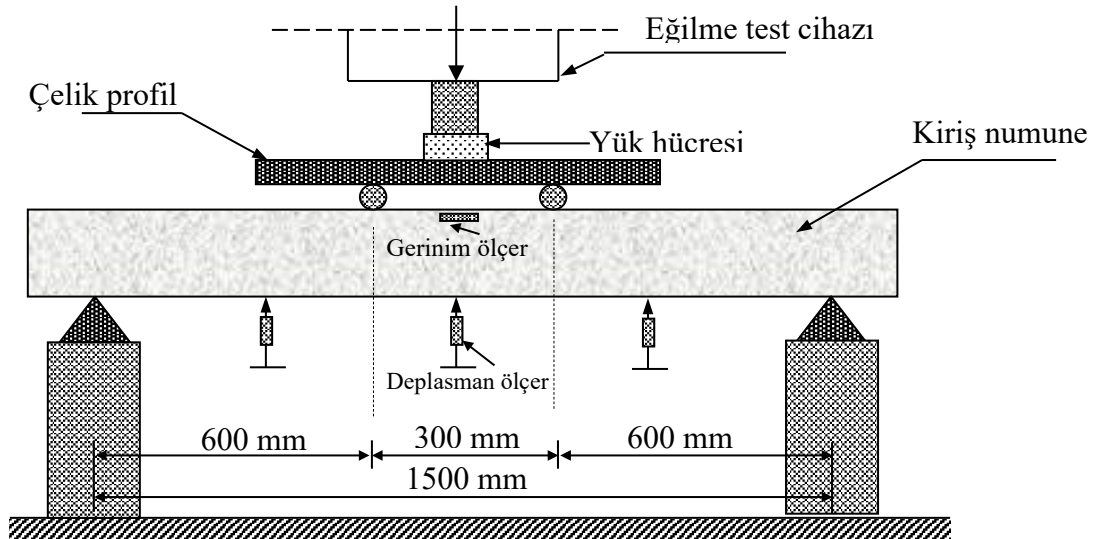
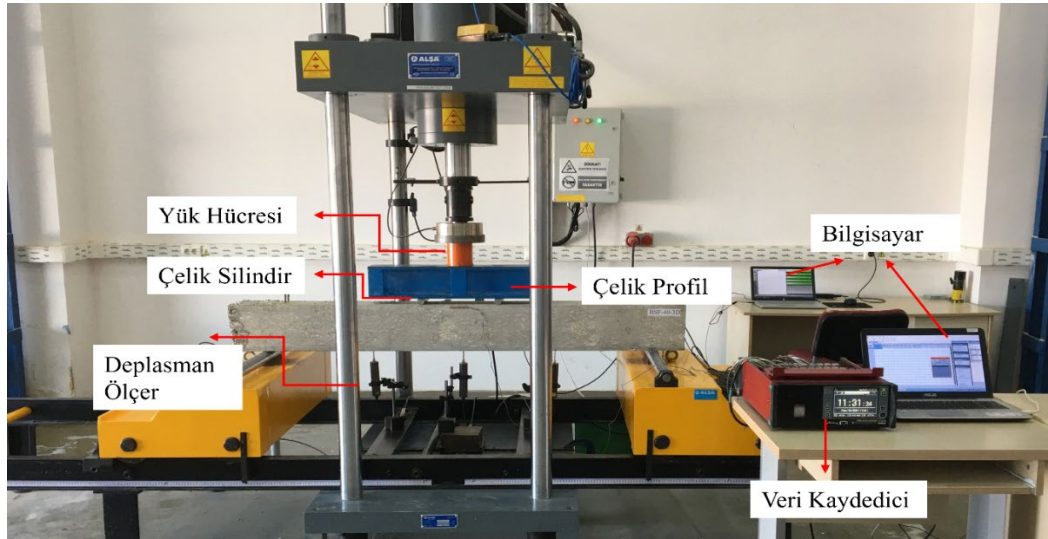
3.1.4. Kiriş Numune Deneyleri

Deneyisel çalışma kapsamında üretilen kiriş numuneler Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Yapı Laboratuvarı'nda Dört nokta yüklemesi eğilme testine tabi tutulmuştur. Eğilme test cihazı yük kontrollü yükleme yapabilen, 400 kN kapasiteli ve tek açıklıklıdır. Deney esnasında yükü ölçmek için deney düzeneğine bir adet 500 kN kapasiteli yük hücresi yerleştirilmiştir. Deneyisel çalışmada uygulanan yükü ölçmek için yükölçer, kirişte oluşan deplasmanları ölçmek amacıyla deplasmanölçer kullanılmıştır. Yük, deplasman ve birim deformasyonları okumak için bilgisayar destekli elektronik veri toplama sistemi kurulmuştur (Şekil 3.17). Tez çalışması kapsamında üretilen bir tanesi lifsiz yedi tanesi farklı uç kanca ve hacimsel oranda lif içeren toplam sekiz adet betonarme kirişlerin dört nokta eğilme testleri yapılmıştır. Kiriş numune isimleri ve içerikleri Tablo 3.3'te görülmektedir.

Tablo 3.3. Kiriş numune isim ve içerikleri

NUMUNE İSMİ	İÇERİK
B-0	Standart betonarme kiriş
BSF-20-5D	20 kg/m ³ ve 5D çelik lif
BSF-40-3D	40 kg/m ³ ve 3D çelik lif

BSF-40-4D	40 kg/m ³ ve 4D çelik lif
BSF-40-5D	40 kg/m ³ ve 5D çelik lif
BSF-60-3D	60 kg/m ³ ve 3D çelik lif
BSF-60-4D	60 kg/m ³ ve 4D çelik lif
BSF-60-5D	60 kg/m ³ ve 5D çelik lif

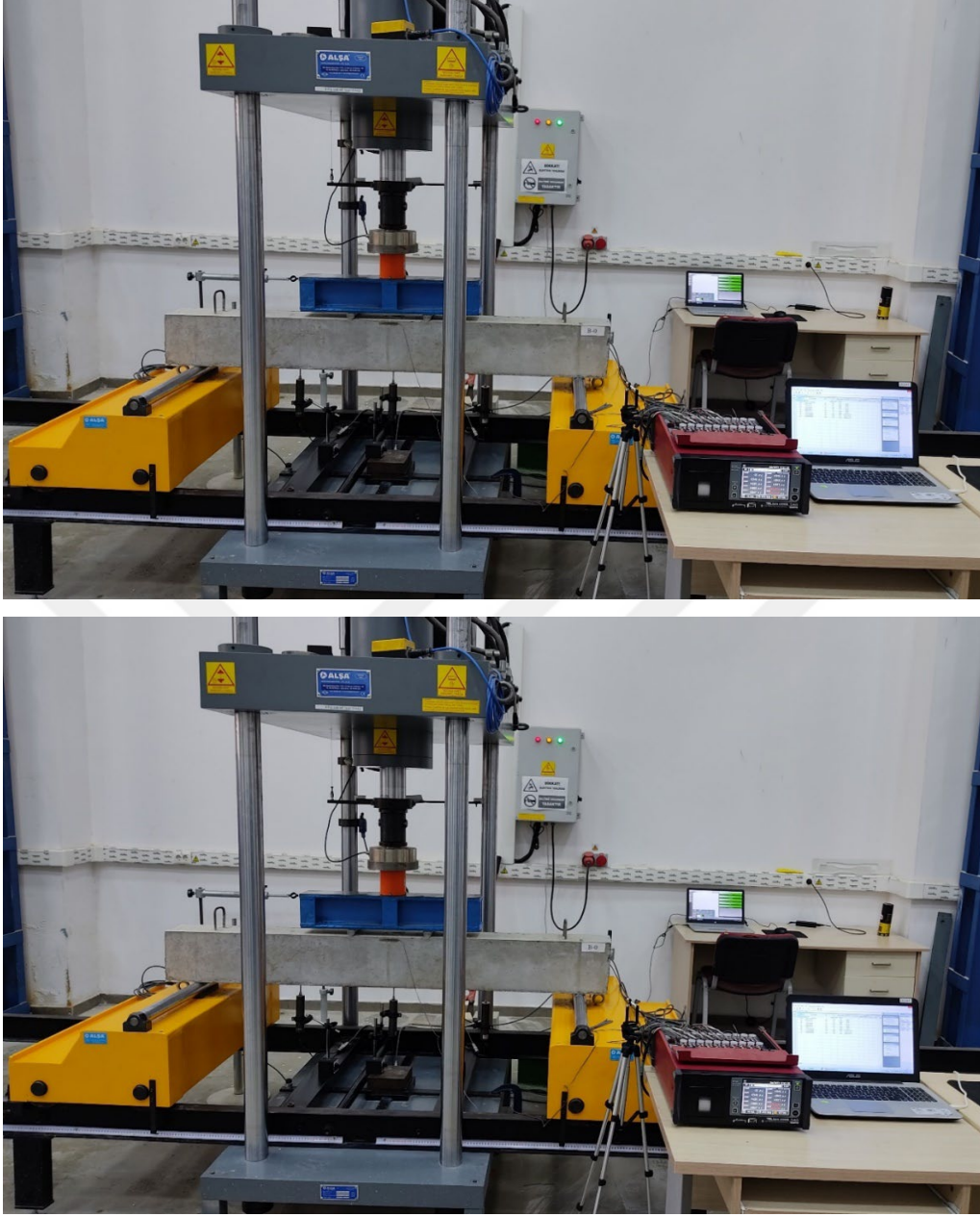


Şekil 3.17. Dört noktalı eğilme deney düzeneği

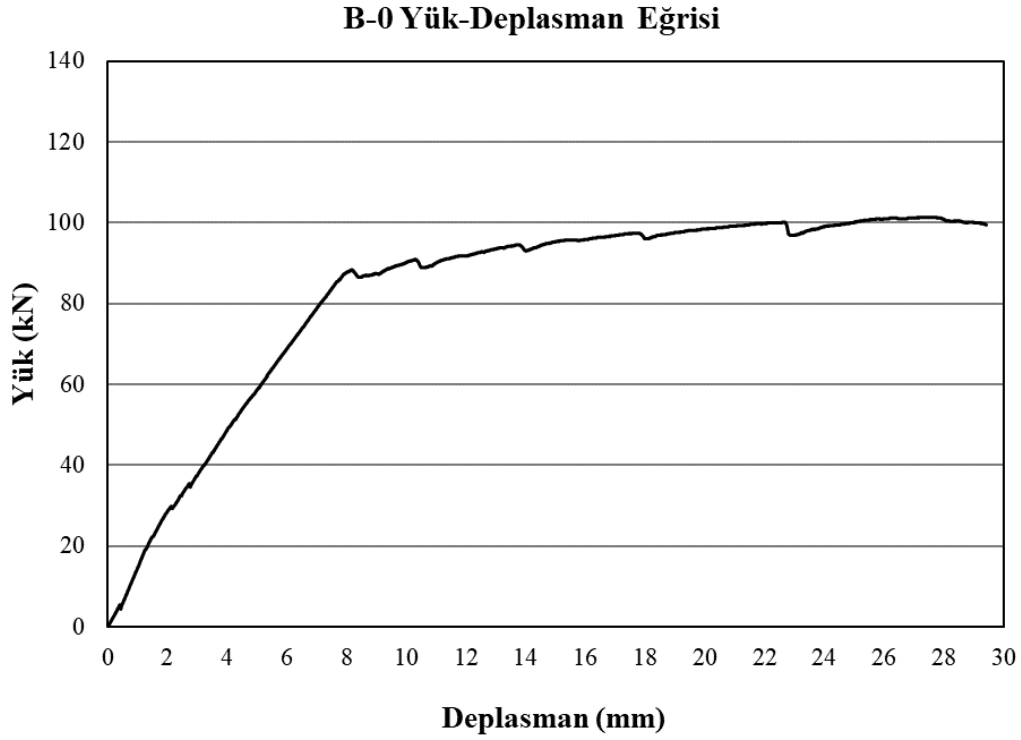
Deneyisel çalışma kapsamında test edilen kirişlere ait yük ve karşılık gelen deplasman verileri elde edilerek kiriş numunelere ait yük ve kiriş açıklık ortası deplasman eğrileri elde edilmiştir.

3.1.4.1. B-0 Numunesi

Deney düzeneği hazırlandıktan sonra sabit yükleme hızıyla B-0 numunesi dört nokta yükleme deneyine başlanmıştır (Şekil 3.18). Deney esnasında gözlemlenen tüm çatlakların, oluşumundan deney sonuna kadar gelişimleri takip edilmiştir. Deneyde gözlenen ilk çatlağın uygulanan iki yük arasında (eğilme bölgesinde), yaklaşık olarak 35 kN yük düzeyinde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Kılcal düzeyde gözlemlenen eğilme çatlağının meydana geldiği anda kiriş açıklık ortasındaki deplasman değeri 2,72 mm olarak ölçülmüştür. Eğilme çatlaklarının ilk olarak açıklık ortasında meydana geldiği, yükleme devam ettikçe mesnetlere doğru da kılcal düzeyde çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Deney yüklemede yaklaşık 50 kN yük düzeyine ulaşıldığında eğilme çatlaklarının kılcal düzeyde oluşumunun devam ettiği ve bazı çatlakların ilerlemeye devam ettiği görülmüştür. 74,4 kN yük düzeyinde açıklık ortasındaki çatlak ilerlemesinin basınç bölgesine doğru ilerlemesinin belirgin olarak devam ettiği belirlenmiştir. Bu aşamadan sonra, 77,9 kN yük düzeyinde kesme çatlaklarının meydana geldiği görülmüştür. 87,8 kN değerinde eğilme çatlaklarında çatlak genişlemesinin net bir şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir. 88,9 kN yük düzeyinde eğilme çatlaklarının farklı kollara ayrıldığı görülmüştür. 90,6 kN yük değerinde B-0 kirişinin beton basınç bölgesinde ezilmelerin başladığı görülmüştür. Yaklaşık 95 kN yük değerinde yeni çatlakların oluşmadığı fakat mevcut çatlakların genişlediği ve ilerlemeye devam ettiği gözlenmiştir. Yaklaşık 101 kN yük düzeyinde beton basınç bölgesinde ezilmeler gözlemlenmiş olup deney sonlandırılmıştır. Deney sonunda oluşan maksimum yükün 101,24 kN, kiriş açıklık ortası deplasmanın ise 27,75 mm olduğu tespit edilmiştir. Deney sonucunda kirişte 3 ana eğilme çatlağın oluştuğu belirlenmiştir. Kiriş numuneye ait yük ve karşılık gelen açıklık ortası deplasman grafiği Şekil 3.19’da sunulmuştur.



Şekil 3.18. Deney öncesi hazırlığı ve deney sonunda oluşan deformasyonlar



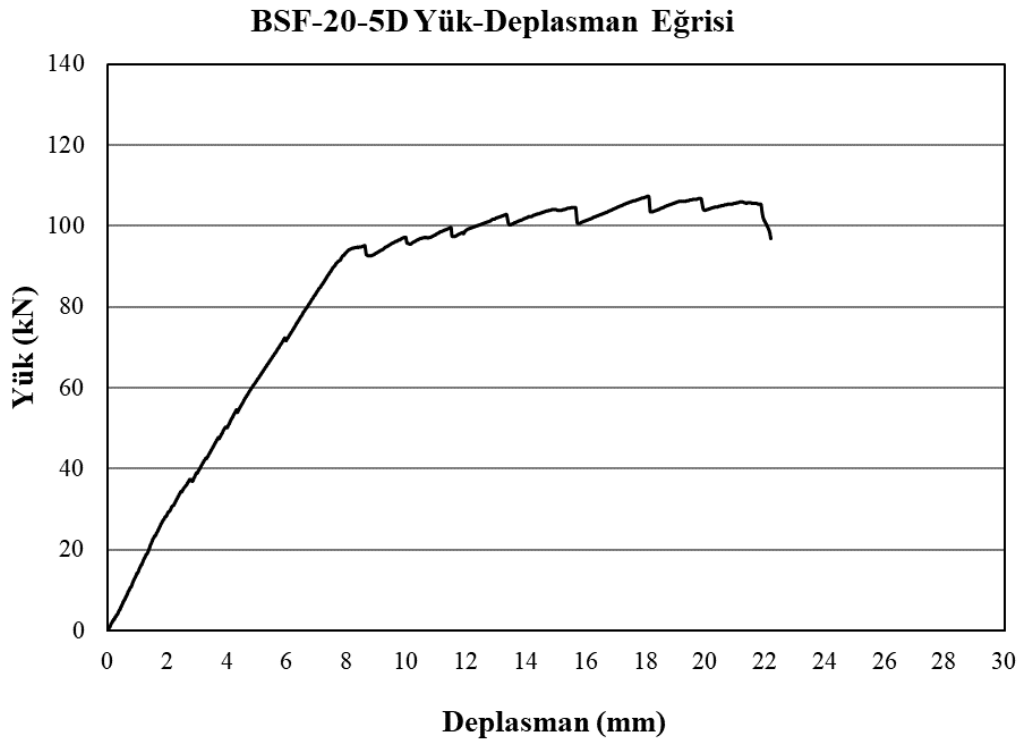
Şekil 3.19. B-0 kiriş numunesinin yük-deplasman grafiği

3.1.4.2. BSF-20-5D Numunesi

Deney düzeneği hazırlandıktan sonra sabit yükleme hızıyla BSF-20-5D numunesi dört nokta yükleme deneyine başlanmıştır. Deneyde gözlenen ilk çatlağın eğilme bölgesinde ve kılcal düzeyde olduğu, çatlağın B-0 numunesine benzer şekilde yaklaşık olarak 35 kN yük düzeyinde meydana geldiği görülmüştür. Söz konusu eğilme çatlağının olduğu anda kiriş açıklık ortasında 2,56 mm deplasman değeri ölçülmüştür. Yapılan deneyde, 59,6 kN yük düzeyine ulaşıldığında eğilme çatlaklarının kılcal düzeyde olduğu, 92,5 kN yük düzeyine ulaşıldığında bazı çatlakların ilerlemeye ve genişlemeye devam ettiği belirlenmiştir. Uygulanan yükün 94,25 kN değerinde kesme çatlaklarının meydana geldiği, 97,30 kN yük düzeyinde açıklık ortasındaki eğilme çatlaklarının basınç bölgesine doğru ilerlediği görülmüştür. Yaklaşık 102 kN yük aşamasında eğilme çatlaklarının kollara ayrıldığı görülmüş ve eğilme çatlaklarının çatlak genişliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Yaklaşık 105 kN yük düzeyinde kesme çatlaklarının kılcal düzeyde olduğu görülmüştür. Deneyde, 107,2 kN yük düzeyinde BSF-20-5D kirişinin yk almaya devam ederek kirişin beton basınç bölgesinde ezilmelerin başladığı görülmüş ve bu yük

düzeyinde liflerde kopmaların başladığı tespit edilmiştir. Yaklaşık 107 kN yük düzeyinde beton basınç bölgesinde ezilmeler gözlemlenmiş olup deney sonlandırılmıştır.

Deney sonunda oluşan maksimum yükün 107,38 kN, kiriş açıklık ortası deplasmanın ise 18,12 mm olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.20). Deney sonucunda kirişte 6 ana eğilme çatlaklarının oluştuğu ve bu çatlakların 4 tanesinin benzer genişlikte meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca çelik liflerin etkisiyle ana çatlaklardaki çatlak genişliğinin B-0 numunesine göre daha düşük düzeyde olduğu belirlenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında elde edilen veriler kullanılarak test edilen BSF-20-5D kiriş numunesi deneysel yük-deplasman eğrisi Şekil 3.20’de sunulmuştur. Kiriş numunenin maksimum yük değerinden sonra önemli düzeyde deplasman yaptığı görülmektedir (Şekil 3.21).



Şekil 3.20. BSF-20-5D kiriş numunesinin yük-deplasman grafiği



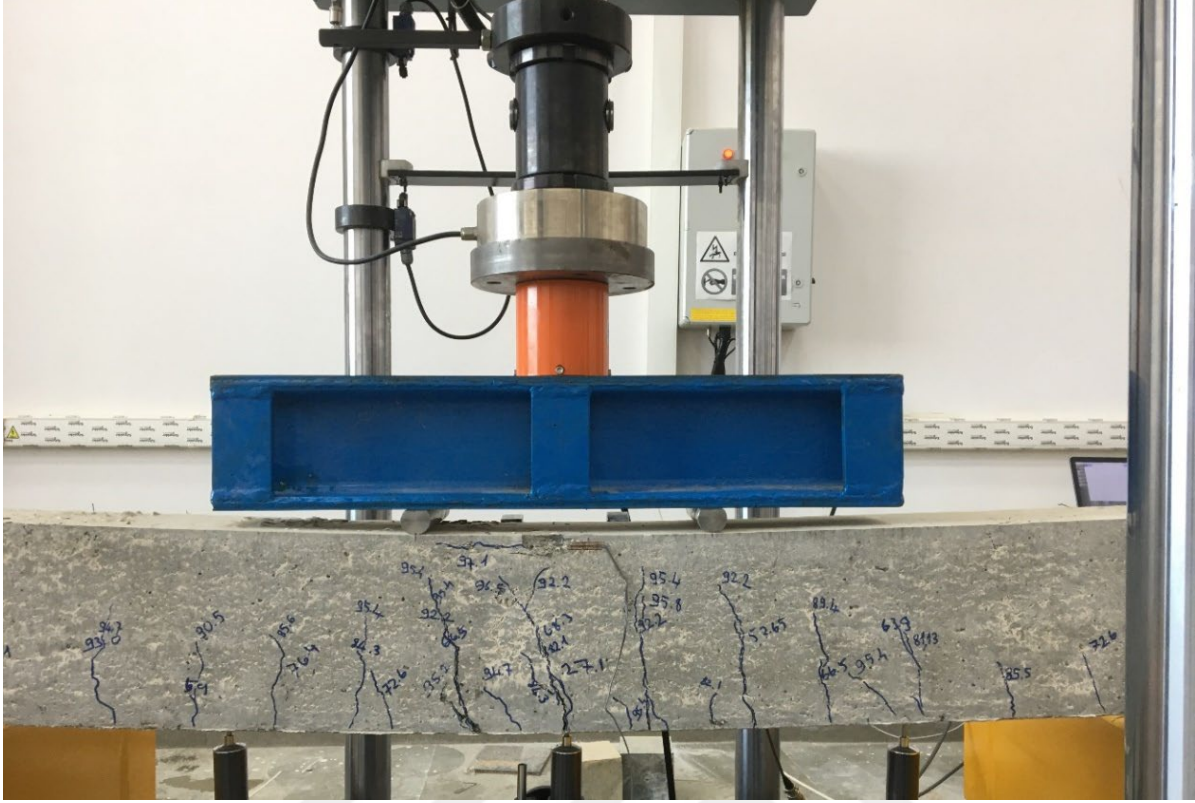
Şekil 3.21. Deney öncesi hazırlığı ve deney sonunda oluşan deformasyonlar

3.1.4.3. *BSF-40-3D Numunesi*

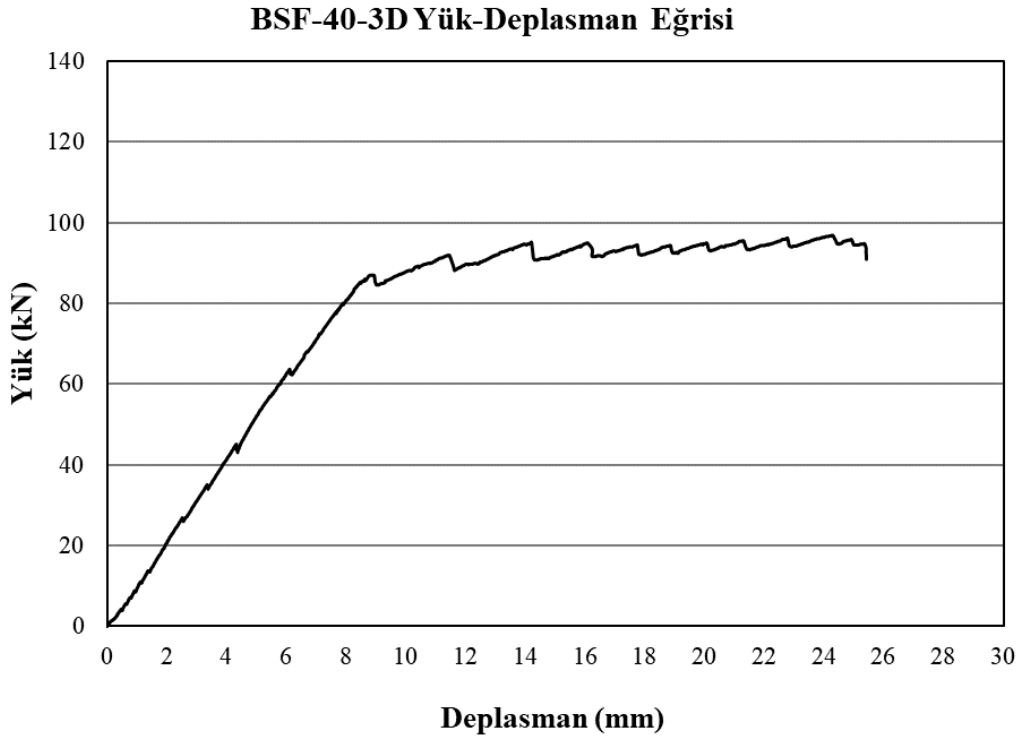
BSF-40-3D numunesi dört nokta eğilme deneyinde gözlemlenen tüm çatlakların, oluşumundan deney sonuna kadar gelişimleri takip edilmiştir. Deney esnasında ilk çatlakın yaklaşık 27 kN yük düzeyinde iki mesnet arasında (eğilme çatlak) meydana geldiği gözlenmiştir. Ancak; meydana gelen çatlakların, B-0 ve BSF-20-5D numunelerine göre daha kılcal düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Çatlak oluşumu kiriş açıklık ortasında daha belirgin düzeyde başlamış olup yükleme devam ettikçe mesnetlere doğru da kılcal düzeyde çatlak oluşumunun meydana geldiği

görülmüştür. Kiriş açıklık ortasındaki eğilme çatlaklarının yaklaşık 52 kN yük düzeyine ulaştığında bazı çatlakların kılcal düzeyde oluşumunun devam ettiği, yaklaşık 68 kN yük düzeyine ulaştığında ise çatlak ilerlemesinin devam ettiği gözlenmiştir. Yükleme devam ettikçe özellikle kiriş orta açıklıktaki çatlaklarda genişlemeler belirgin hale gelmiş olup mesnetlere yakın bölgede kesme çatlaklarının kılcal düzeyde görünür hale geldiği gözlenmiştir. Yaklaşık 95 kN yük düzeyinde kiriş orta bölgesinde ana çatlaklar meydana gelmiş ve liflerde kopmaların başladığı görülmüştür. Ayrıca kiriş açıklık bölgesindeki ana çatlakların ilerlemesi devam edip kılcal çatlak oluşumları da meydana gelmiştir. Kiriş numune yük almaya devam ettikçe beton basınç bölgesinde ezilmelerin başladığı görülmüş ve 97 kN yük düzeyinde ezilme meydana geldikten sonra deney sonlandırılmıştır (Şekil 3.22). Söz konusu kiriş numunede B-0 ve BSF-20-3D numunelerine kıyasla çelik liflerin katkısıyla çatlak genişlemesinin daha kılcal düzeyde kaldığı tespit edilmiştir. Deney sonunda oluşan maksimum yükün 97 kN, kiriş açıklık ortası deplasmanın ise 24,32 mm olduğu tespit edilmiştir. Kiriş numuneye ait yük-deplasman eğrisi Şekil 3.23'te sunulmuştur.





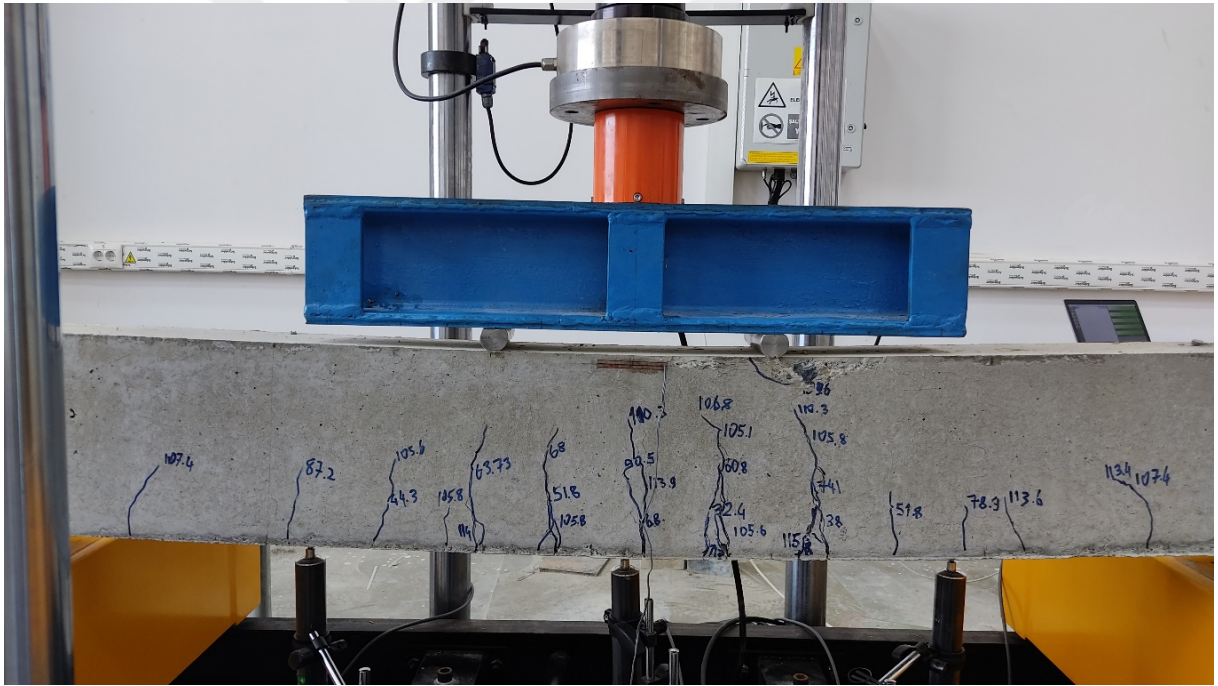
Şekil 3.22. Deney öncesi hazırlığı ve deney sonunda oluşan deformasyonlar



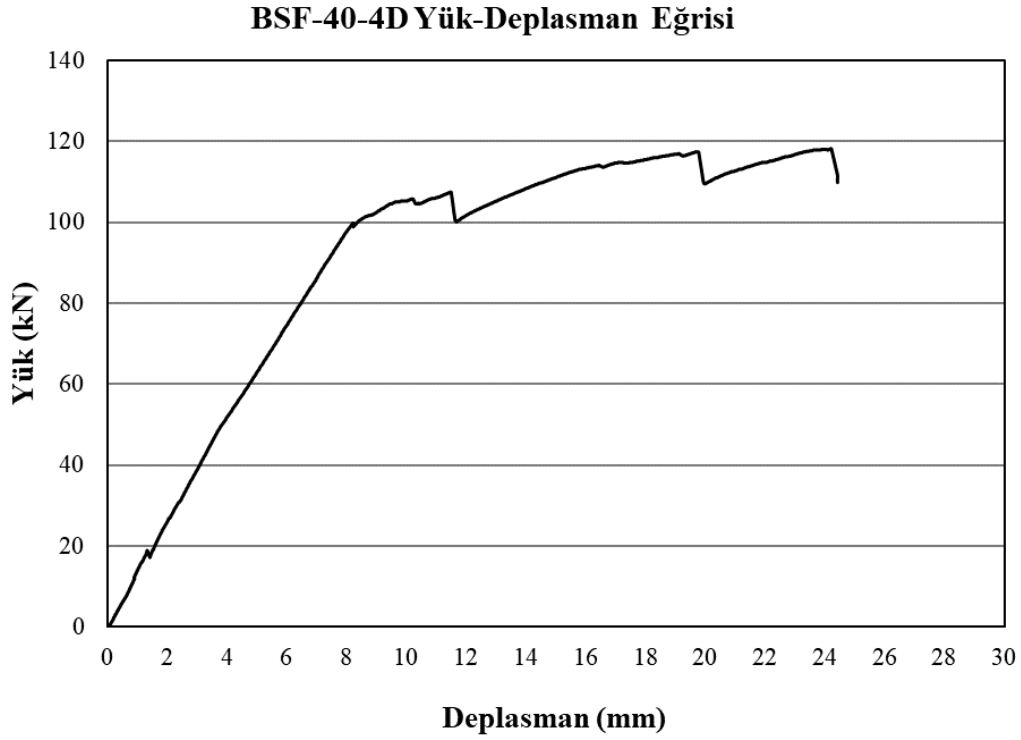
Şekil 3.23. BSF-40-3D kiriş numunesinin yük-deplasman grafiği

3.1.4.4. BSF-40-4D Numunesi

Deney düzeneği hazırlandıktan sonra deplasman ölçerler yerleştirilip BSF-40-4D numunesi dört nokta eğilme deneyine başlanmıştır. Deneyde gözlenen ilk çatlağın önceki numunelerle benzer olarak eğilme bölgesinde ve kılcıl düzeyde yaklaşık 32,40 kN yük düzeyinde meydana geldiği gözlenmiştir. Çatlak oluşumu kiriş açıklık ortasında daha belirgin düzeyde başlamış olup yükleme devam ettikçe mesnetlere doğru da kılcıl düzeyde çatlak oluşumu meydana gelmiştir. Söz konusu kiriş numunede, BSF-40-3D kiriş numunesine kıyasla çatlak oluşumu daha fazla yük düzeyinde ve daha kılcıl olarak başladığı görülmüştür. Yük düzeyi arttıkça özellikle kiriş açıklık ortasındaki çatlaklarda genişlemeler belirgin düzeye gelmiş olup mesnetlere yakın bölgede kesme çatlaklarının görünür düzeyde olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 3.24). 105 kN yük düzeyinde kiriş açıklık ortasındaki ana çatlaklarda genişlemeler devam etmiş ve kollara ayrıldığı görülmüştür. Bununla birlikte mesnetlere yakın bölgede kesme çatlaklarının kılcıl düzeyde kaldığı gözlemlenmiştir. Yaklaşık 109 kN yük düzeyinde kiriş basınç bölgesinde ezilmelerin başladığı ancak çelik liflerin mekanik özellikleri etkisiyle kirişin yük taşımaya devam ettiği gözlemlenmiştir. Yaklaşık 116 kN yük düzeyinde kirişte ana çatlakların iyice genişlediği ve 118 kN yük düzeyinde kiriş ezilmiş ve deney sonlandırılmıştır (Şekil 3.24). BSF-40-3D numunesine kıyasla ana çatlak ve kesme çatlak genişliklerinin benzer özellikte olduğu ancak çatlak ilerlemesinin bu deneyde daha az görüldüğü ve çatlak oluşumu daha yüksek yük düzeylerinde meydana gelerek kirişin daha fazla yük taşıdığı tespit edilmiştir. Kiriş numuneye yük-deplasman eğrisi Şekil 3.25'te görülmektedir.



Şekil 3.24. Deney öncesi hazırlığı ve deney sonunda oluşan deformasyonlar

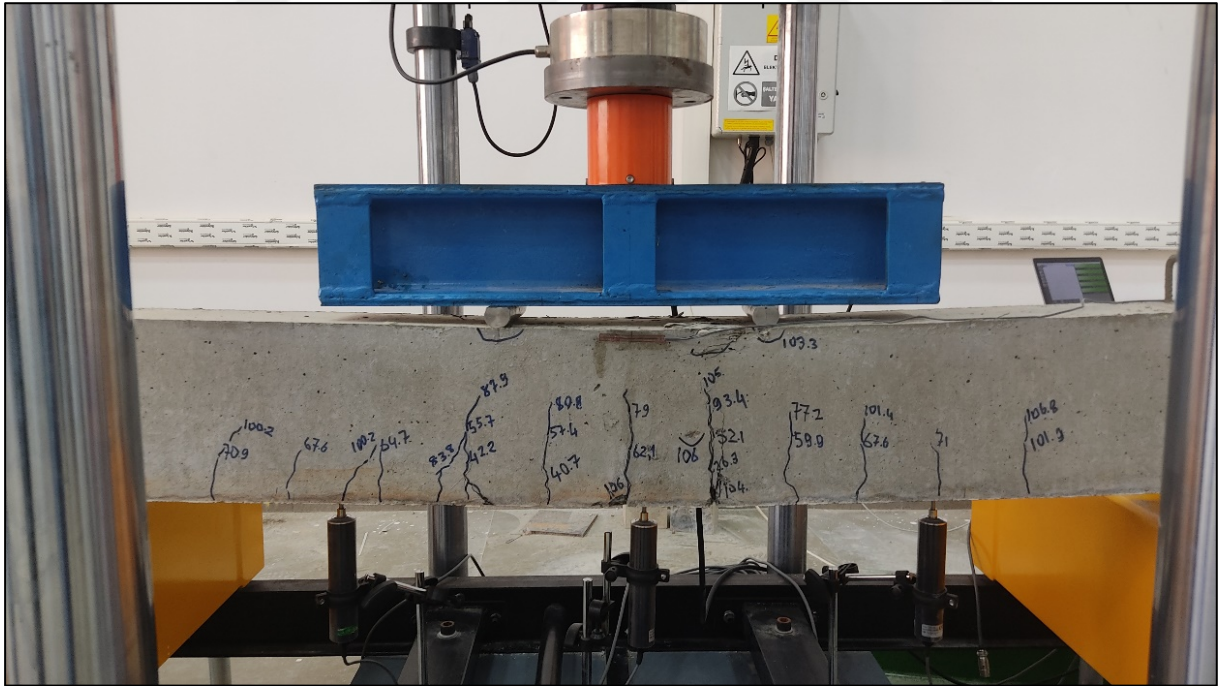
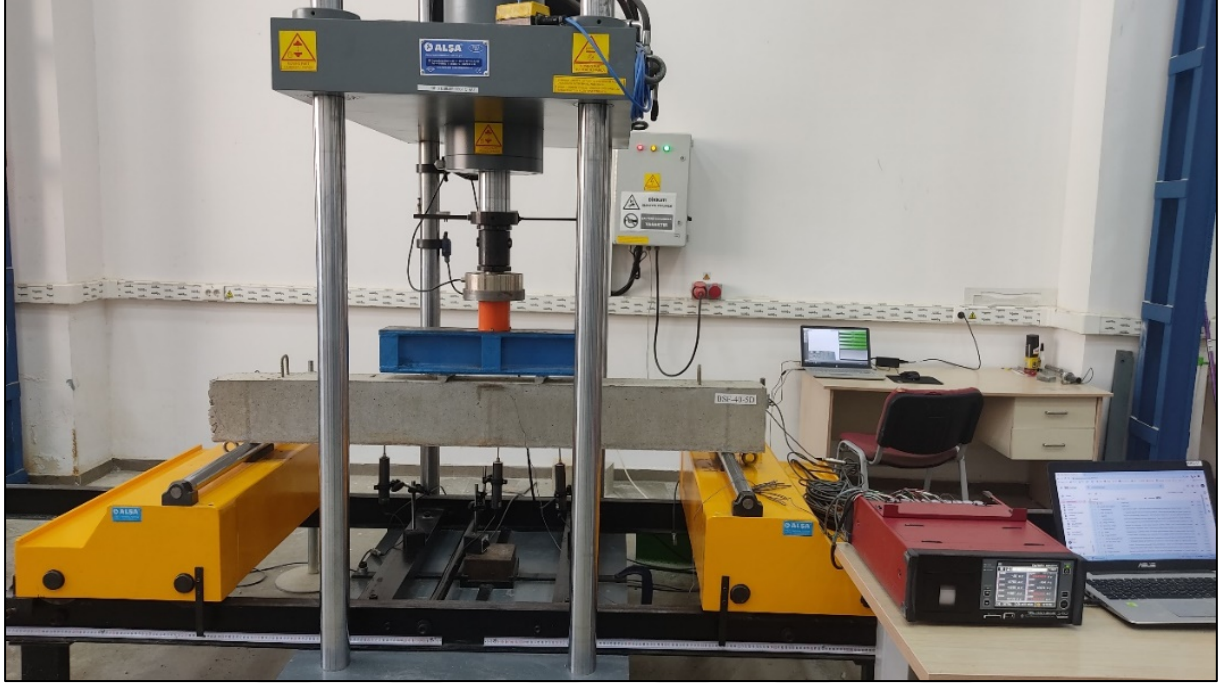


Şekil 3.25. BSF-40-4D kiriş numunesinin yük-deplasman grafiği

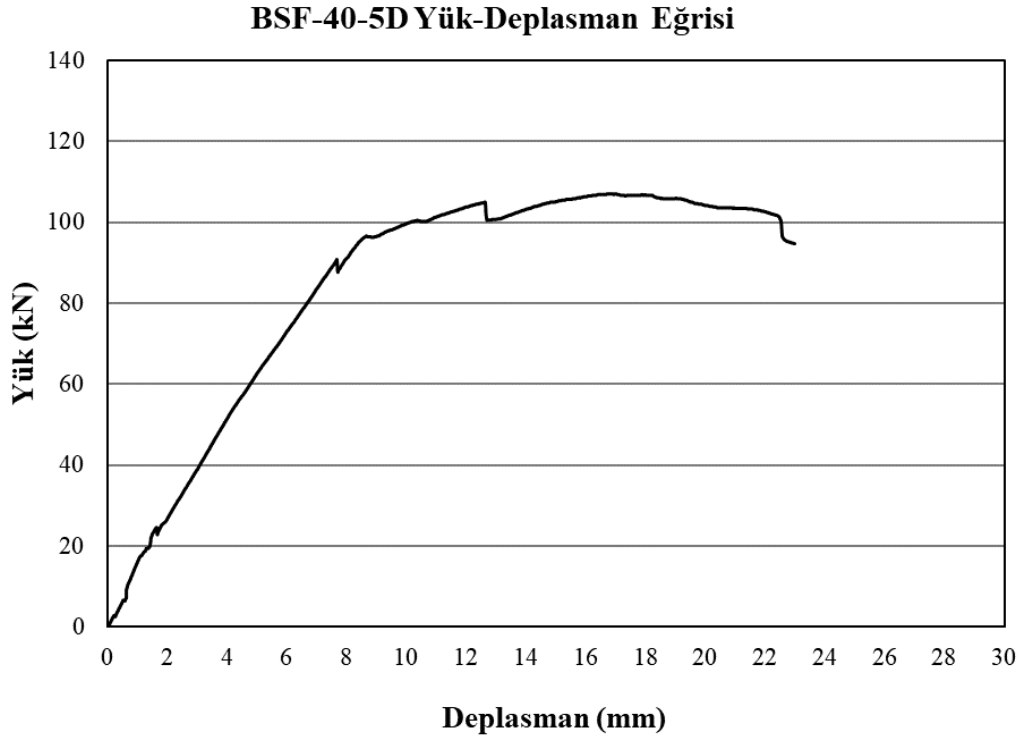
3.1.4.5. BSF-40-5D Numunesi

Dört nokta yükleme deney düzeneği hazırlanarak BSF-40-5D kiriş numunesi test edilmiştir. Yaklaşık 45 kN yükleme düzeyine kadar eğilme çatlağı oluşumunun az ve kılcal düzeyde oluştuğu gözlenmiştir. Bu aşamada, BSF-40-3D ve BSF-40-4D kiriş numunelerine kıyasla daha kılcal düzeyde başlamıştır. Söz konusu numunede çatlak oluşumu açıklık ortasında daha belirgin başlamış olup yüklemeye devam edildikçe mesnetlere yakın bölgede kılcal düzeyde çatlak oluşumu meydana geldiği gözlenmiştir. Daha sonrasında, özellikle kirişin orta bölgesinde çatlaklarda genişlemeler biraz belirgin hale geldiği ancak mesnetlere yakın bölgede kesme çatlaklarının kılcal düzeyde kaldığı tespit edilmiştir. Çatlak oluşumu önceki kiriş numunelerin aksine 90 kN yük düzeyine kadar kılcal düzeyde devam etmiş olup yükleme devam ettikçe kiriş orta bölgesinde ana çatlaklarda genişlemeler olduğu ve çatlakların kılcal olarak kollara ayrıldığı gözlenmiştir (Şekil 3.26). Yaklaşık 103 kN yük düzeyinde kiriş basınç bölgesinin ezilmeye başlamış olup devamında beton ezilmiş ve deney sonlandırılmıştır. B-0, BSF-40-3D ve BSF-40-4D numunelere kıyasla test edilen kiriş numunede çatlak genişliklerinin daha düşük düzeyde meydana geldiği, çatlak ilerlemesinin daha az görüldüğü ve mesnetlere

yakın bölgede çatlak oluşumunun daha kılcal düzeyde kaldığı tespit edilmiştir. Ancak taşıma gücü kıyaslamasında kiriş numuneler arasında belirgin bir farkın olmadığı görülmüştür (Şekil 3.27).



Şekil 3.26. Deney öncesi hazırlığı ve deney sonunda oluşan deformasyonlar

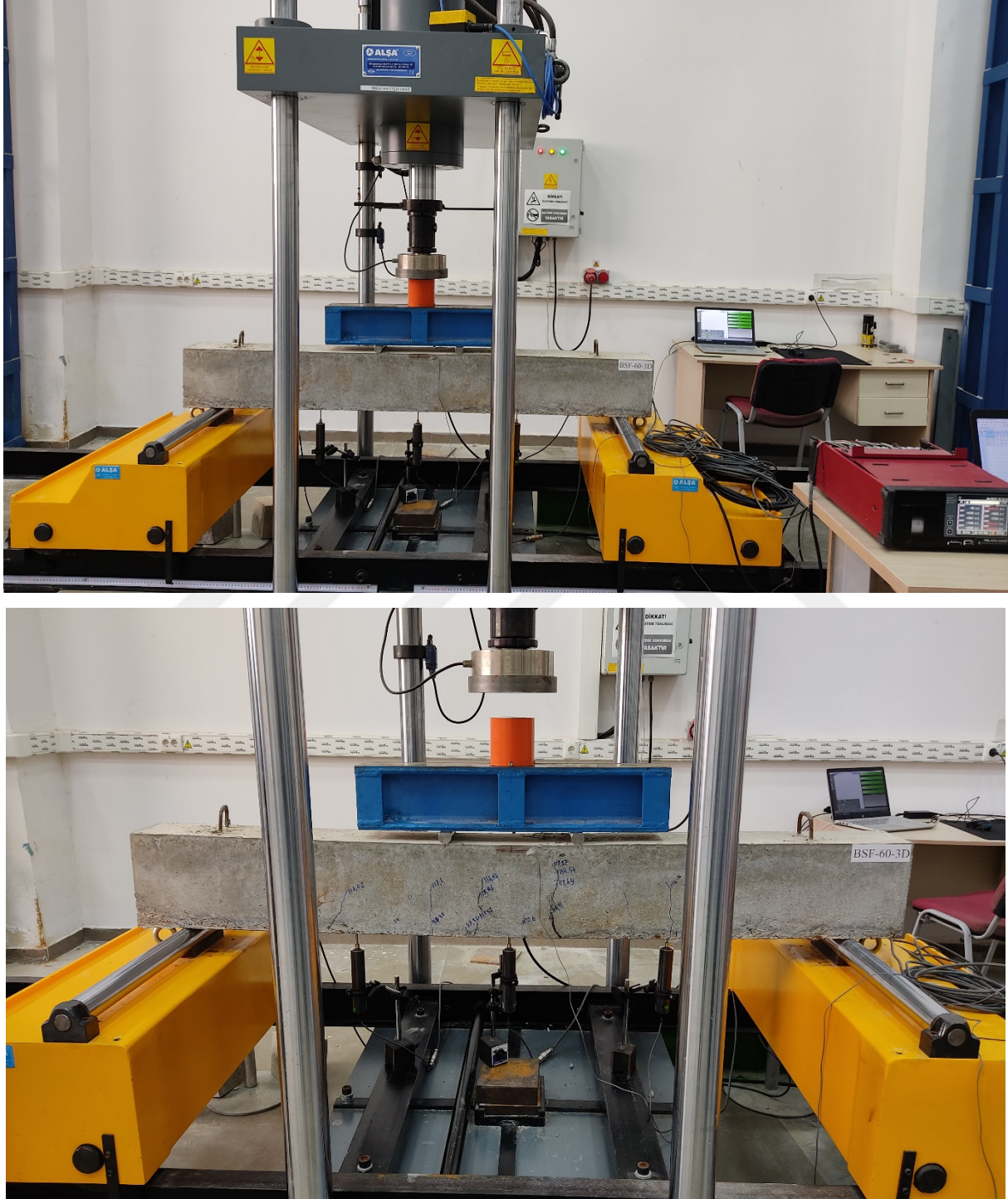


Şekil 3.27. BSF-40-5D kiriş numunesinin yük-deplasman grafiği

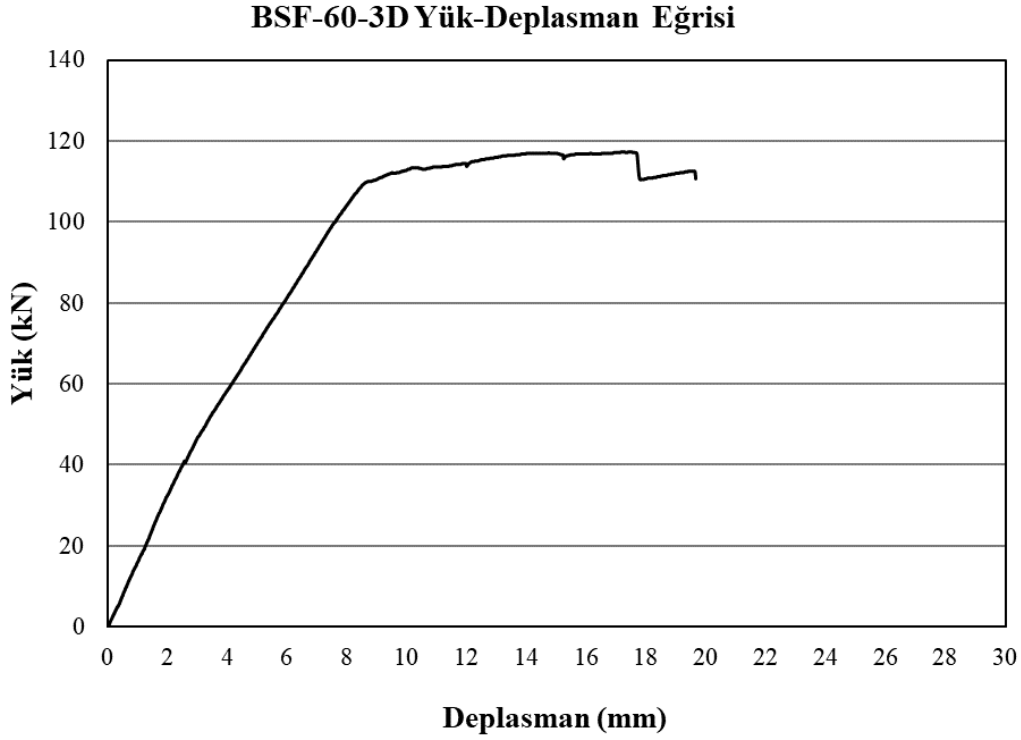
3.1.4.6. BSF-60-3D Numunesi

Deney düzeneği hazırlandıktan sonra BSF-60-3D numunesi dört nokta yükleme altında test edilmiştir. Deney esnasında gözlenen tüm çatlakların, oluşumundan deney sonuna kadar gelişimleri takip edilmiştir. Deneyde 97.3 kN yük düzeyinde meydana gelen çatlakların kılcal düzeyde ve eğilme şatlağı olduğu, bu aşamada kiriş aşıklık ortası deplasman değerinin yaklaşık olarak 7.35 mm olduğu tespit edilmiştir. Yaklaşık 111 kN yük düzeyinde çatlak oluşumu kiriş aşıklık ortasında belirgin düzeyde meydana geldiği grlmştir. Uygulanan yükün 114,54 kN değerinde eğilme çatlak oluşumunun belirgin düzeyde devam ettiği ve bazı eğilme çatlakların basınç bölgesine doğru ilerlediği grlmştir. Yaklaşık 117,1 kN yük aşamasında mesnetlere yakın bölgede kesme çatlaklarının kılcal olarak meydana geldiği ve aynı zamanda beton basınç bölgesinde ezilmenin başladığı gözlenmiştir. Ayrıca aynı yük düzeyinde liflerde kopmaların başladığı görülmüş olup devamında basınç ezilmesinin meydana gelmesiyle deney sonlandırılmıştır. Söz konusu kiriş numunesinde önceki test edilen kirişlerin aksine eğilme çatlaklarının kollara ayrılma durumunun çok az görüldüğü ve çatlakların daha kılcal düzeyde oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 3.28). Deney sonunda oluşan maksimum yükün 117,27 kN,

kiriş orta deplasmanın ise 17,68 mm olduğu tespit edilmiştir. Deney sonucunda kirişte 2 ana çatlak, 6 kılcal çatlağın olduğu tespit edilmiştir (şekil 3.29). Kiriş numuneye ait yük-deplasman eğrisi şekil 3.29’da verilmiştir.



şekil 3.28. Deney ncesi hazırlığı ve deney sonunda oluşan deformasyonlar

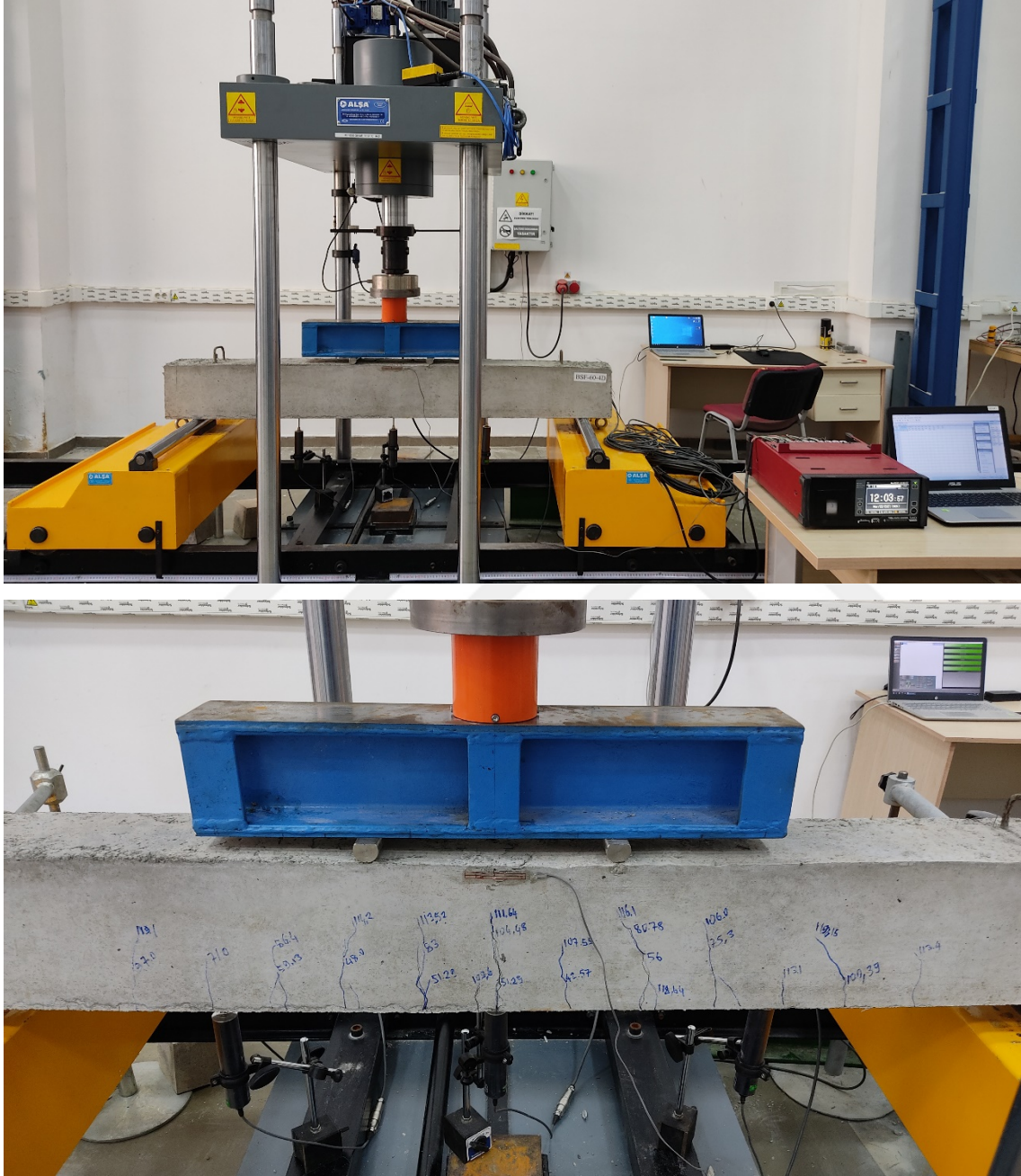


Şekil 3.29. BSF-60-3D kiriş numunesinin yük-deplasman grafiği

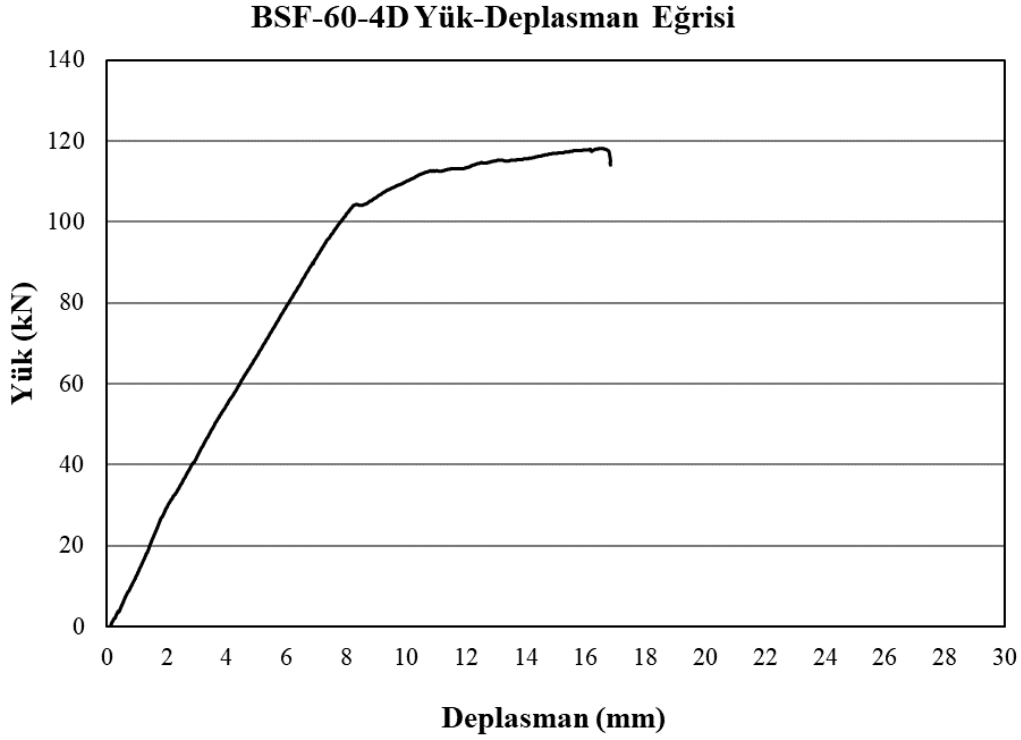
3.1.4.7. BSF-60-4D Numunesi

BSF-60-4D numunesi dört nokta yükleme altında test edilmiştir. Deneyde oluşan ilk çatlağın eğilme bölgesinde oluştuğu ve BSF-60-3D kiriş numunesine benzer olarak yaklaşık 42,57 kN yük düzeyinde meydana geldiği gözlenmiştir. Söz konusu çatlağın klcl düzeyde meydana geldiği görülmüş olup bu yük düzeyinde kiriş açıklık ortası deplasman değerı 2,97 mm olduğu belirlenmiştir. Yapılan deneyde, 59 kN yük düzeyine ulaşıldığında çatlak oluşumu kiriş açıklık ortasında klcl düzeyde meydana geldiği ve 92,90 kN yük düzeyine ulaştığında ise bazı çatlakların ilerlemeye başladığı gözlenmiştir. Daha sonrasında, 99,80 kN yük düzeyine ulaştığında mesnet bölgesinde kesme çatlaklarının oluşmaya başladığı grlmştir (Şekil 3.30). Yaklaşık 116 kN yük düzeyinde yeni çatlak oluşumunun görülmediği fakat mevcut çatlaklarda çatlak genişlemesinin ve ilerlemesinin devam ettiği aynı yükleme aşamasında numunenin basınç bölgesinde ezilmelerin başladığı grlmştir. Ayrıca söz konusu yk düzeyinde elik liflerde kopmaların başladığı gözlenmiştir. Son aşamada ise yaklaşık 117 kN yükleme durumunda beton basınç bölgesinde ezilme meydana gelip deney sonlandırılmıştır. Deney sonucunda oluşan maksimum yükün 117,61 kN, kiriş açıklık orta deplasman değerinin

ise 16,57 mm olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.31). Ana çatlaklardaki çatlak genişliğinin BSF-60-3D ve BSF-60-4D katkılı kiriş numunelere kıyasla daha az olduğu gözlenmiştir. Test edilen kiriş numuneye ait yük-deplasman eğrisi Şekil 3.31’de sunulmuştur.



Şekil 3.30. Deney öncesi hazırlığı ve deney sonunda oluşan deformasyonlar

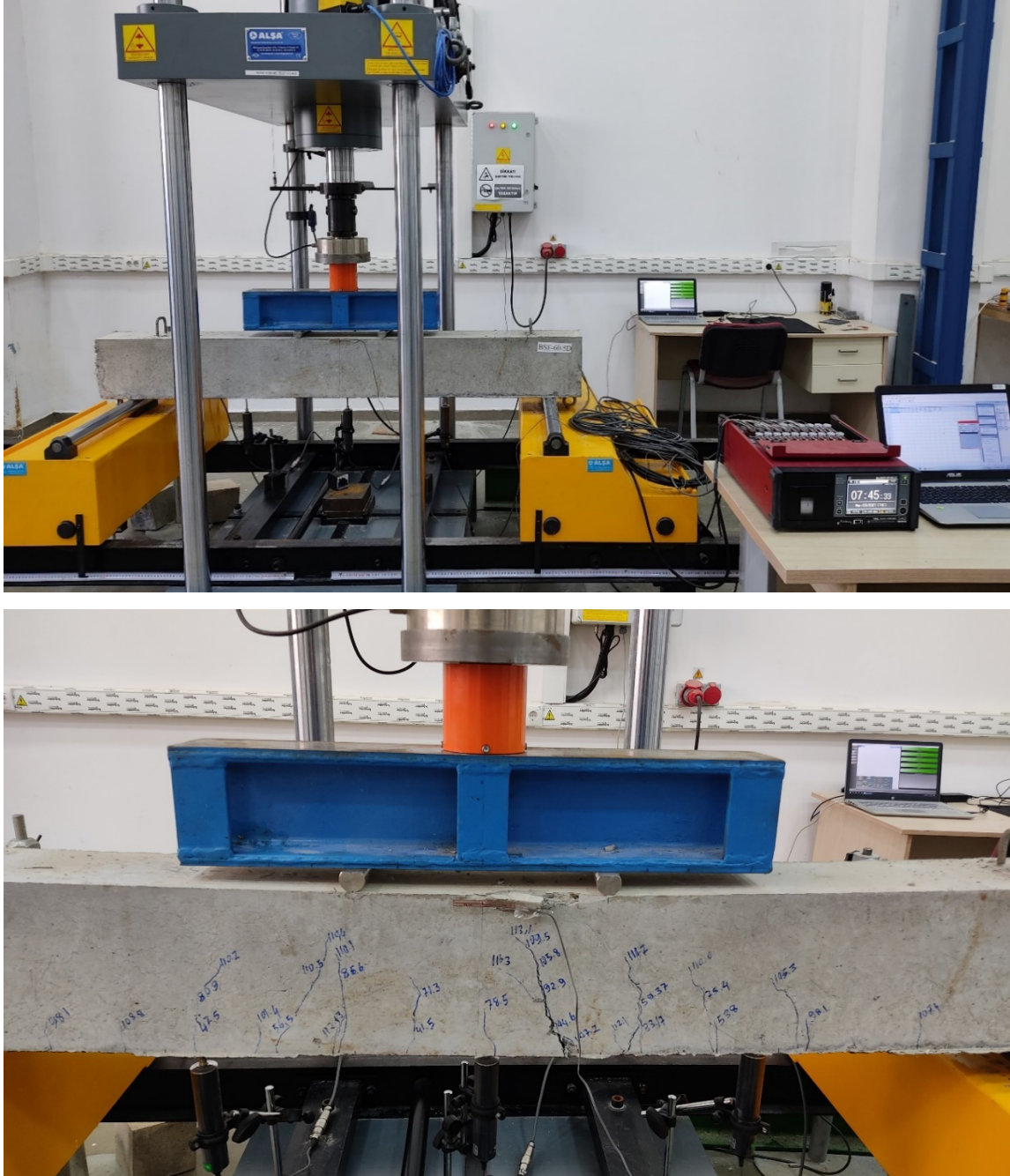


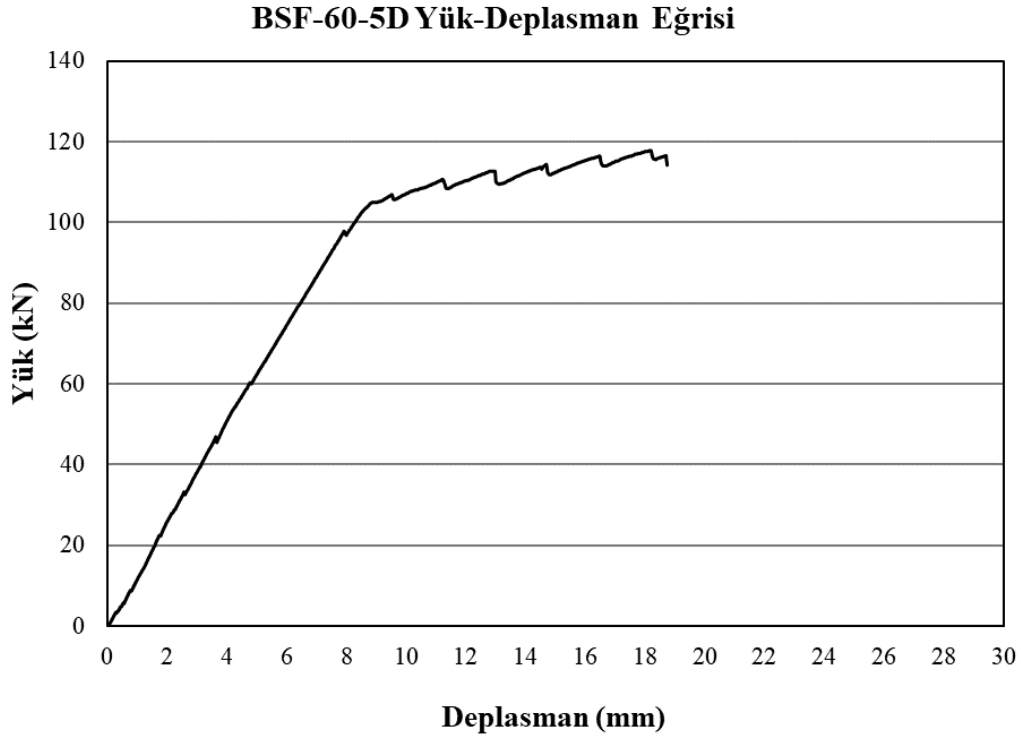
Şekil 3.31. BSF-60-4D kiriş numunesinin yük-deplasman grafiği

3.1.4.8. BSF-60-5D Numunesi

Deneysel alışma kapsamında BSF-60-5D kiriş numunesi dört nokta yükleme altında test edilmiştir. Deneyin başlangıcından yüklemenin son aşamasına kadar kirişte oluşan çatlak gelişimi izlenmiştir. Kiriş numunede oluşan ilk atlağın BSF-60-3D ve BSF-60-4D numunelerinden düşük olarak 33,9 kN yük değerinde meydana geldiği gözlenmiştir. Söz konusu eğilme çatlağının oluştuğu anda kiriş açıklık ortasında 4,56 mm deplasman değerı llmştir. Yaklaşık 83 kN yük düzeyinde çatlak oluşumu kiriş açıklık ortasında kılcal düzeyde meydana geldiği ve sonrasında 91,53 kN yük düzeyinde bazı çatlakların ilerlemeye başladığı grlmştir. Yapılan deneyde, 100,39 kN yük düzeyine ulaşıldığında mesnete yakın bölgelerde kesme çatlaklarının oluşmaya başladığı gözlenmiştir. Deneyde, 116,42 kN yük düzeyinde eğilme çatlaklarının kollara ayrılarak ilerlediği ve aynı yük düzeyinde beton basınç bölgesinde ezilmelerin başladığı grlmştir (Şekil 3.32). Yaklaşık 118 kN yük düzeyinde yeni çatlak oluşumunun görülmediği fakat mevcut çatlaklarda çatlak genişlemesinin devam ettiği gözlenmiş olup söz konusu yk düzeyinde liflerde kopmaların başladığı tespit edilmiştir. Son aşamada ise 119 kN yük düzeyine ulaşıldığında beton basınç bölgesinde ezilme meydana gelip

deney sonlandırılmıştır (Şekil 3.32). Deney sonunda oluşan maksimum yükün 119,15 kN, kiriş açıklık ortası deplasmanının ise 18,2 mm olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.33). Deney sonucunda kirişte 5 ana çatlakın olduğu görülmüştür. Ayrıca ana çatlaklardaki çatlak genişliğinin daha önce test edilen kiriş numunelerden farklı olarak daha kılcal düzeyde olduğu gözlenmiştir. Kiriş numune yük-deplasman eğrisi Şekil 3.33'te görülmektedir.

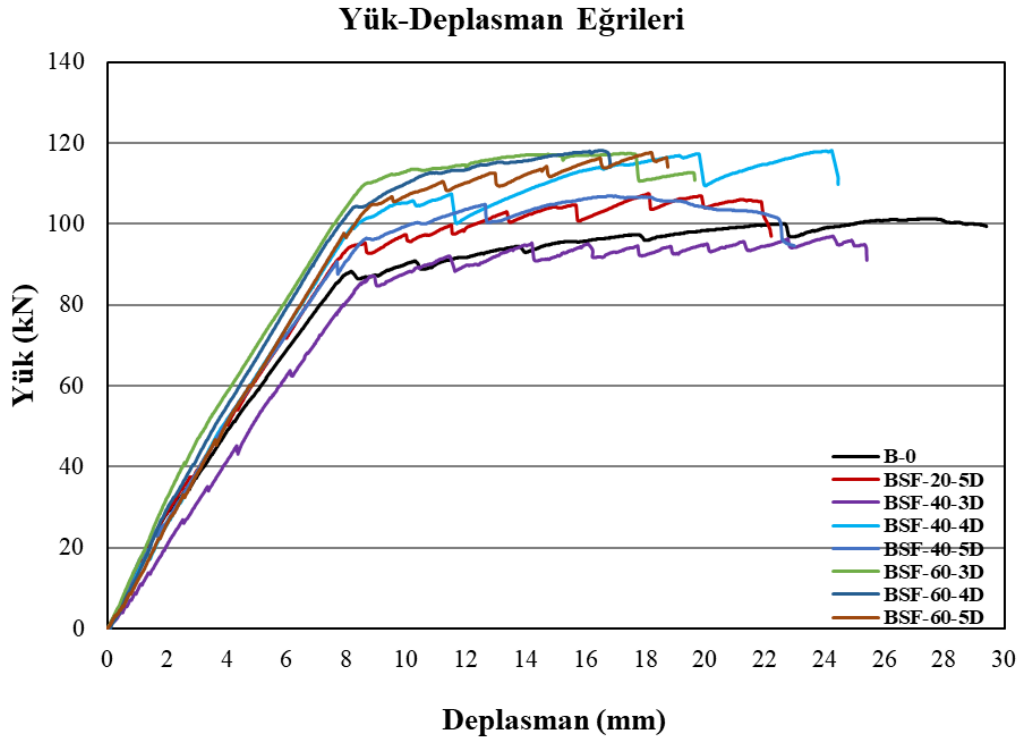




Şekil 3.33. BSF-60-5D kiriş numunesinin yük-deplasman grafiği

Genel olarak, düşük elik lif hacimsel oranına sahip karışım lar ile üretilen kiriş numunelerde elik liflerin kiriş yapısal davranış ı üzerine çok belirgin etkisinin olmadığı görülmüştür. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, farklı hacimsel oranlar içeren beton ile üretilen kirişlerde elik lif katkısının kirişlerin beton basınç dayanımı üzerine önemli bir etki göstermediği ancak deformasyon değerinde belirgin bir artış sağladığı tespit edilmiştir. Aynı hacimsel oranda farklı uç kancalı elik liflerle (3D, 4D, 5D) retilen kirişler üzerinde yapılan deneylerde genel olarak çatlak yayılımının ve çatlak oluşumunun benzer olduğu görülmüş, ancak 5D elik lifle üretilen kirişlerde diğer kirişlere kıyasla çatlak genişliğinin daha kılcal düzeyde kaldığı ve çatlak ilerlemesinin daha düşük düzeyde oluştuğu belirlenmiştir. Farklı hacimsel karışım oranında elik lif içeren kirişlerde, elik lif hacimsel değerinin artması ile kirişin yük taşıma kapasitesinde bir miktar artış oluştuğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak, elik lif katkısının optimum hacim oranlarında (40-60 kg/m³) betonun basınç dayanımına göreceli olarak az etkisinin olduğu, fakat betonun deformasyon kapasitesinde ve taşıma gücünde önemli

ölçüde katkısının olduğu sonucuna varılmıştır. Kiriş numunelerin testinden elde edilen yük ve karşılık gelen açıklık ortası deplasman değerleri ile oluşturulan kiriş yük-deplasman eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 3.34’te verilmiştir.



Şekil 3.34. Kiriş numunelerin yük-deplasman karşılaştırmalı grafiği

3.2. Analiz Yöntemi

Yapılan tez çalışmasında, çelik lifsiz ve çelik lifli betonarme kirişlerin taşıma gücü ve yük-deplasman analizi için bir yöntem önerilmiştir. Yöntemde malzemeler için doğrusal olmayan gerilme-birim deformasyon özellikleri dikkate alınmıştır. Yöntemde yapılan varsayımlar aşağıda sunulmuştur (ACI-318, TS 500).

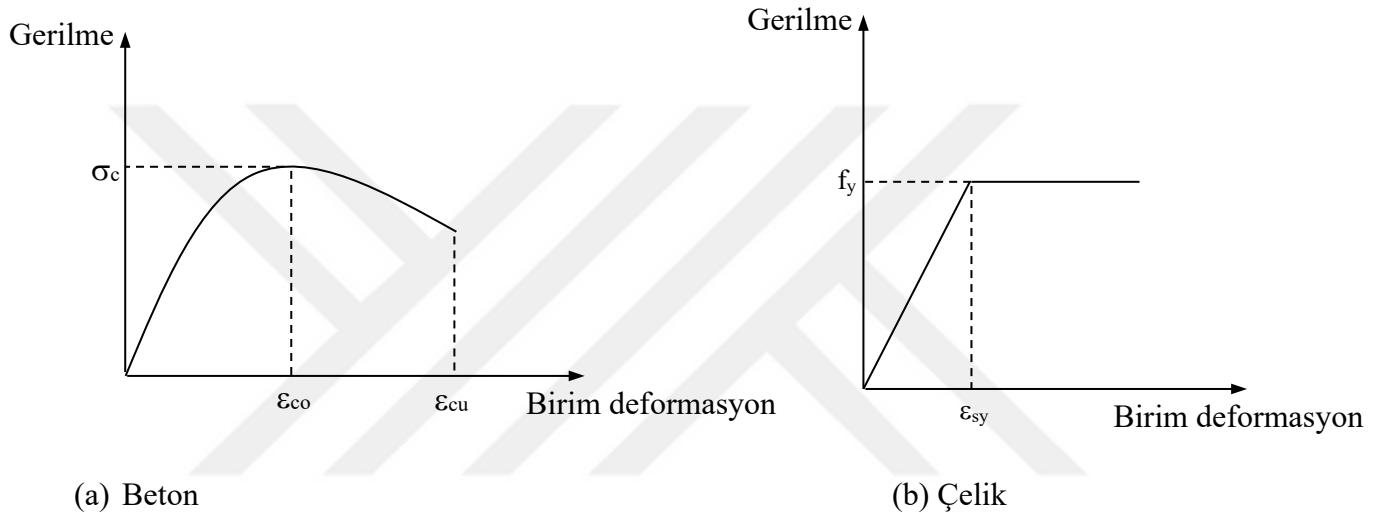
3.2.1. Yöntemde kabul edilen varsayımlar

- 1) Deneysel Eğilmeden önce düzlem olan kesitler eğilmeden sonra da düzlem kalır (Bernoulli-Navier hipotezi).
- 2) Beton için gerçek gerilme-birim deformasyon eğrileri kullanılmaktadır.
- 3) Betonarme çeliği için elasto-plastik davranış kabul edilmiştir.

- 4) Betonun çekme dayanımına katkısı ihmal edilmiştir.
- 5) Beton ile donatı arasında tam aderans olduğu kabul edilmiştir.

3.2.2. Beton ve çelik için kabul edilen gerilme-birim deformasyon modeli

Analizde, kirişlerin basınç bölgesi için betonun doğrusal olmayan davranışı dikkate alınmaktadır. Betonarme çeliği için ise elasto-plastik davranış kabul edilmiştir. Beton için doğrusal olmayan davranışı temsil eden gerilme-birim deformasyon eğrisi ile çelik elasto-plastik davranışı gösteren gerilme-birim deformasyon grafiği Şekil 3.35'te sunulmuştur.



Şekil 3.35. Beton ve çelik gerilme-birim deformasyon grafikleri

Burada ϵ_{co} maksimum gerilmeye karşılık gelen birim deformasyon, ϵ_{cu} ise betonun en dış lifinin maksimum birim kısalmasını göstermektedir. Kirişlerin analizinde, betonun gerilme-birim deformasyon modeli kiriş beton basınç bölgesine yansıtılmaktadır. Böylece kiriş numune basınç bölgesi beton bileşke kuvveti gerçek gerilme-birim deformasyon modeli kullanılarak elde edilmektedir.

Çelik için gerilme birim deformasyon modelini tanımlayan ifade Denklem (3.3)'te gösterilmiştir.

$$\sigma_s = E_s \epsilon_s \leq f_y \quad (3.3)$$

σ_s : Çelik gerilmesi

E_s : Çeliğin elastisite modülü

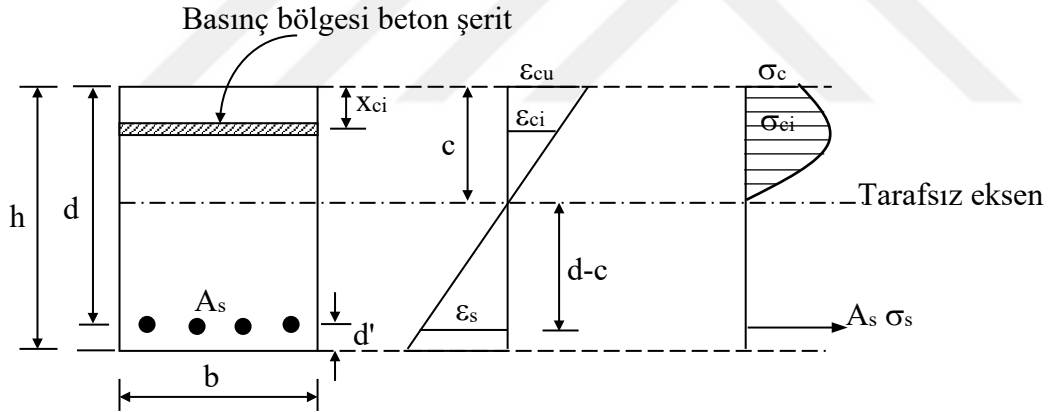
ϵ_s : Çelik birim deformasyonu

ϵ_{sy} : Çelik akma birim deformasyonu

f_y : Çelik akma dayanımı

3.2.3. Yöntemin formülasyonu

Dikdörtgen geometriye sahip kiriş kesiti Şekil 3.36’da sunulmuştur. Analitik çalışmada malzemelerin doğrusal olmayan davranışı esas alındığından kiriş beton basınç bölgesi şeritlere ayrılmaktadır. Söz konusu şeritler tarafsız eksen tanımlayan parametrenin (c) kabul edilen şerit sayısına bölünmesi ile oluşturulmaktadır. Her bir beton şeridin alanı ve ağırlık merkezi hesaplanmaktadır. Eğilmeden önce düzlem kesitler eğilmeden sonra da düzlem kalır kabulü dikkate alınarak, kesit içinde birim deformasyon dağılımı Şekil 3.36’da gösterilmiştir.



Şekil 3.36. Kiriş birim deformasyon ve gerilme dağılımı

Söz konusu varsayıma bağlı olarak beton şerit ve donatı için birim deformasyonlar tarafsız eksen konumuna (c) bağlı olarak Denklem (3.4) ile ifade edilmiştir.

$$\epsilon_{ci} = \epsilon_{cu} \frac{c-x_{ci}}{c}, \quad \epsilon_s = \epsilon_{cu} \frac{d-c}{c} \quad (3.4)$$

Burada, ϵ_{cu} betonun en dış lifi için kabul edilen birim deformasyonu, σ_c ise beton en dış lifin gerilmesini temsil etmektedir. Şekil 3.36'da b kiriş genişliğini, h kiriş yüksekliğini, d kiriş etkili derinliğini, d' ise paspayını göstermektedir. Denklem (3.4) yardımıyla her bir şeritin ağırlık merkezinde beton birim deformasyon değeri (ϵ_{ci}) belirlenmektedir. Böylece beton için seçilen gerilme-birim deformasyon modelinden her bir beton şeritin ağırlık merkezinde gerilme değeri (σ_{ci}) hesaplanmaktadır. Betonarme çeliği için de Denklem (3.4) ile çelik birim deformasyon değeri (ϵ_s) bulunarak çelik gerilme-birim deformasyon modelinden çelik gerilmesi (σ_s) belirlenmektedir.

3.2.4. Analiz denge denklemleri

Kiriş analizinde ilk olarak tarafsız eksen tanımlayan parametre (c) için bir varsayım yapılır. Betonun doğrusal olmayan davranışını hesaplara yansıtmak üzere kiriş beton basınç bölgesi istenilen sayıda (n) şeride bölünmektedir. Her bir şeritin alanı (A_{ci}) ve ağırlık merkezi (x_{ci}) değerleri hesaplanmaktadır. Daha sonra beton şerit ve donatı birim deformasyonları belirlenerek ilgili malzeme modelinden her bir şeritin ve donatının gerilme değerleri bulunmaktadır. Elde edilen değerler ile kiriş için kuvvet denge denklemi oluşturulmaktadır Denklem (3.5). Kuvvet denge denkleminin belirli bir yakınsama değerini ($\chi < 0.01$) sağlaması beklenir. Kuvvet denge denkleminin (N) sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Söz konusu denklem sağlanmıyorsa sağlanana kadar tarafsız eksen konumu (c) değiştirilir ve işlemler tekrarlanır. Yakınsama kriteri sağlanana kadar iterasyon tekrarlanır.

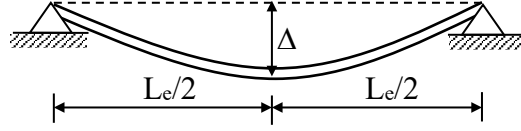
$$N = \sum_{i=1}^n A_{ci}\sigma_{ci} - A_s\sigma_s = 0 \quad (3.5 \text{ a})$$

Tarafsız eksen konumu iterasyon sonucunda belirlendikten sonra kesit ağırlık merkezine göre moment alınarak kesit taşıma gücü momenti elde edilmektedir Denklem 3.5 b).

$$M = \sum_{i=1}^n A_{ci}\sigma_{ci} \left(\frac{h}{2} - x_{ci} \right) + A_s\sigma_s \left(\frac{h}{2} - d' \right) \quad (3.5 \text{ b})$$

3.2.5. Kiriş deplasman analizi

Dört nokta yüklemesi etkisine maruz kirişin eğilmiş halinin Sinüs eğrisine benzediği kabul edilerek kirişe ait deplasmanı veren formülasyon aşağıda sunulmuştur (Rangan, 1990). Yük etkisi altında eğilmiş kiriş Şekil 3.37’de görülmektedir.



Şekil 3.37. Dört nokta yüklemesi altında kiriş eğilmiş hali görünümü

Sinüs Eğrisi Yöntemi’nde kirişte oluşan deplasman Denklem (3.6) ile ifade edilmektedir.

$$u(x) = \Delta \sin\left(\frac{\pi x}{L_e}\right) \quad (3.6)$$

Denklemde yer alan Δ kirişin orta noktası deplasmanını, L_e kirişin etkili boyunu temsil etmektedir. Denklem (3.6)’ın iki kez türevi alınarak eğrilik (ϕ) ifadesi elde edilir.

$$\phi = \frac{d^2 u}{dx^2} = \frac{\pi^2}{L_e^2} \Delta \sin\left(\frac{\pi x}{L_e}\right) \quad (3.7)$$

Kirişte meydana gelen eğrilik birim deformasyon dağılımından (Şekil 3.37) ve Denklem (3.7) yardımıyla bulunur.

$$\phi = \frac{\epsilon_c}{c} \quad (3.8)$$

Denklem (3.8)’de yer alan ϵ_c betonun basınç bölgesinde en dış lif için seçilen birim deformasyon değerini ifade etmektedir.

Denklem 3.7’de $x=L_e/2$ alınarak kiriş orta noktasında oluşan deplasman;

$$\Delta = \phi \frac{L_e^2}{\pi^2} \quad (3.9)$$

ifadesi ile belirlenir.

Kesitte seçilen birim deformasyon sıfır ile ϵ_{cu} değeri arasında alınarak her bir seçilen birim deformasyon değeri için analiz denge denkleminden kesit taşıma gücü momenti (M) hesaplanır. Buradan kirişe uygulanan yük;

$$P = \frac{2M}{L_1} \quad (3.10)$$

ile bulunur. Denklem (3.10)'da yer alan L_1 , yük uygulama noktası ile mesnet arasında ölçülen uzunluktur. Söz konusu yüke (P) karşılık gelen deplasman değeri Denklem (3.9) ile belirlenir. Böylece istenilen sayıda yük ve deplasman değeri hesaplanarak teorik kiriş yük-deplasman eğrisi elde edilir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında dört nokta yüklemesi altında test edilen kirişlerin yapısal davranışları ele alınmaktadır. Ayrıca kirişler önerilen yöntem ile analiz edilerek kirişlerin taşıma gücü ve yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Test edilen kirişlerin teorik yük-deplasman eğrileri deneysel eğrilerle karşılaştırılmıştır.

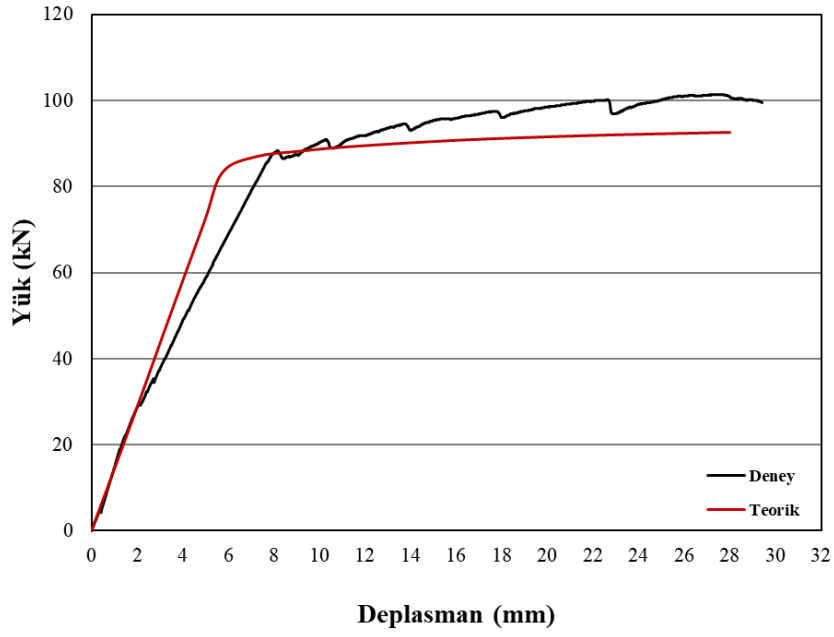
4.1. Test edilen kirişlerin analizi

Sunulan çalışmada, test edilen çelik lifsiz ve çelik lifli betonarme kirişler Bölüm 3'te önerilen yöntemle dayalı olarak yük ve deplasman değerlerinin elde edilmesi üzerine analiz edilmiştir. Analizde, beton basınç bölgesi için silindir numunelerden elde edilen deneysel gerilme-birim deformasyon eğrileri kullanılmıştır. Kirişlerin deneysel taşıma gücü değerleri (P_{test}), analiz sonucu elde edilen teorik taşıma gücü değerleri (P_u) ve analiz değerlerinin deneysel taşıma gücü değerlerine oranı (P_u/P_{test}) Tablo 4.1'de sunulmuştur.

Tablo 4.1. Test edilen kirişlerin teorik ve deneysel değerlerinin kıyaslaması

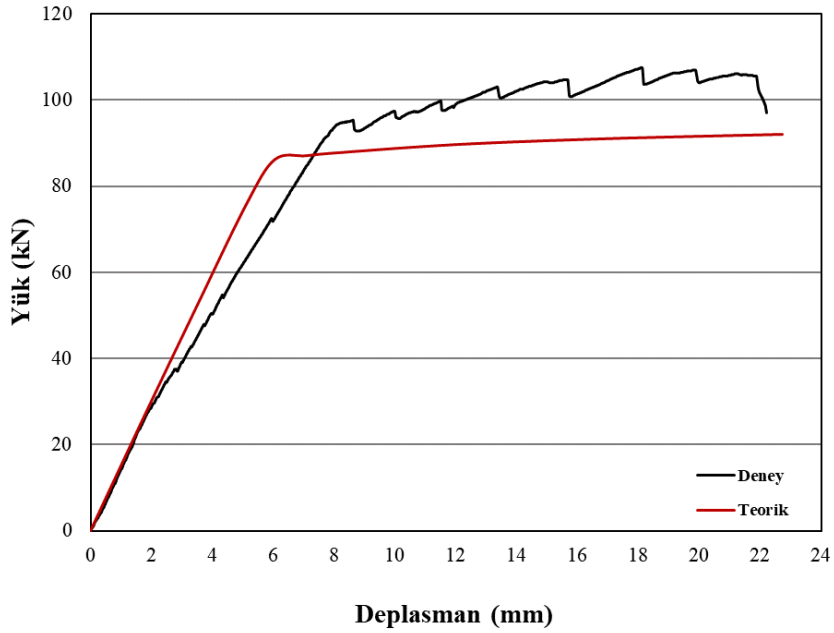
Numune Adı	P_{test} (kN)	P_u (kN)	P_u/P_{test}
B-0	101,28	91,80	0,91
BSF-20-5D	107,41	92,32	0,86
BSF-40-3D	97,01	92	0,95
BSF-40-4D	117,30	93,76	0,80
BSF-40-5D	106,90	93,05	0,87
BSF-60-3D	117,42	93,22	0,79
BSF-60-4D	118,16	94,14	0,80
BSF-60-5D	117,65	93,13	0,79

Test edilen kirişlerin analiz sonucunda elde edilen teorik yük-deplasman eğrileri, deneysel yük-deplasman eğrileri ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.1–Şekil 4.8'de sunulmuştur.



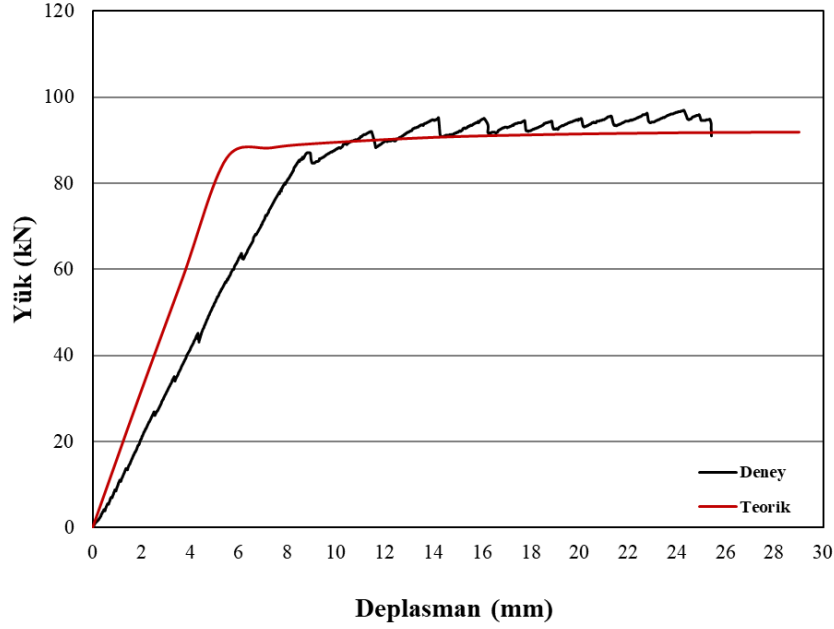
Şekil 4.1. B-0 kiriş numunenin deneysel ve teorik olarak Yük-Deplasman eğrileri

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere, çelik lifsiz numuneden elde edilen teorik yük-deplasman eğrisinin deneysel eğri ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Grafik incelendiğinde, kiriş analizinde deplasman değeri hesabı için kullanılan Sinüs Eğrisi Yönteminin iyi sonuç verdiği sonucuna varılmıştır.

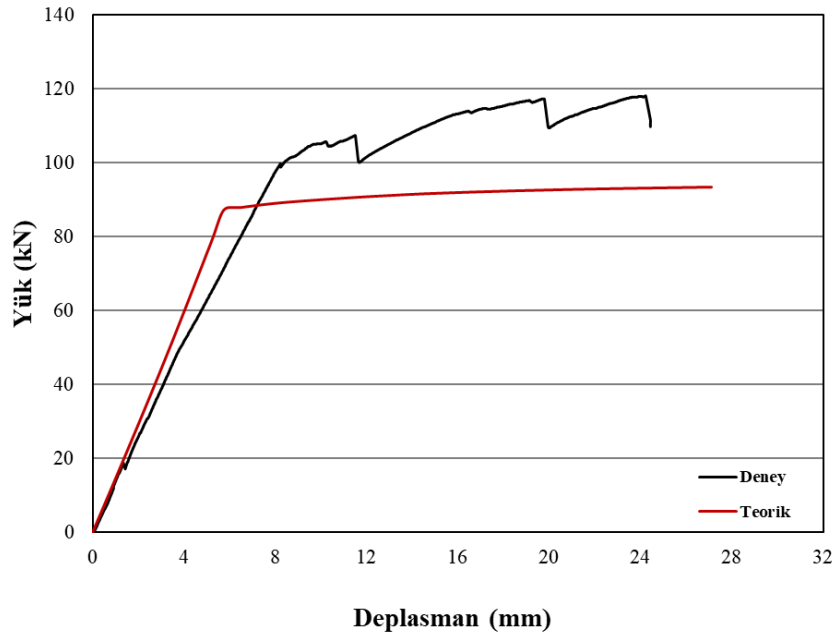


Şekil 4.2. BSF-20-5D kiriş numunenin deneysel ve teorik olarak Yük-Deplasman eğrileri

BSF-20-5D numunesinin teorik yük-deplasman eğrisinin büyük oranda deneysel yük-deplasman eğrisi ile uyumlu olduğu, yaklaşık 85 kN yük değerinden sonra deneysel taşıma gücünün bir miktar daha fazla elde edildiği görülmektedir (Şekil 4.2).



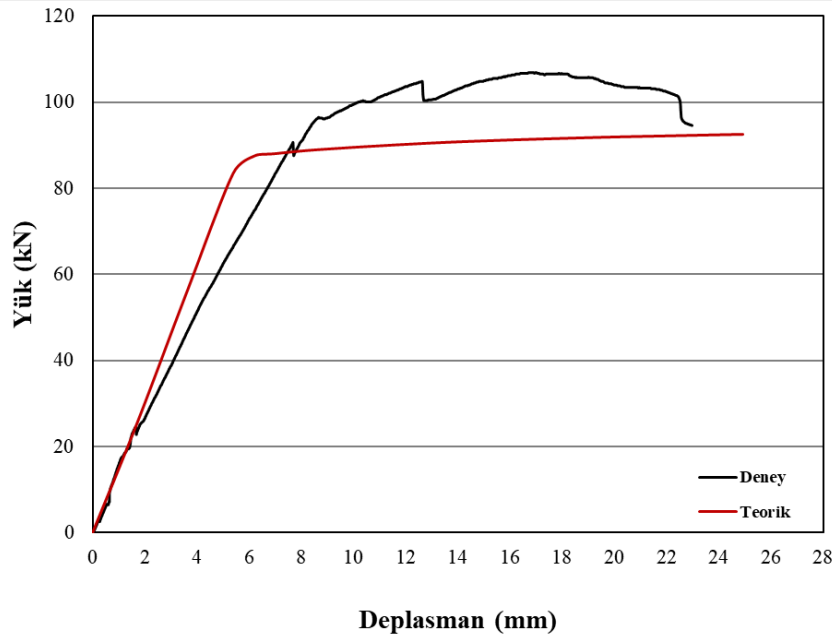
Şekil 4.3. BSF-40-3D kiriş numunenin deneysel ve teorik olarak Yük-Deplasman eğrileri



Şekil 4.4. BSF-40-4D kiriş numunenin deneysel ve teorik olarak Yük-Deplasman eğrileri

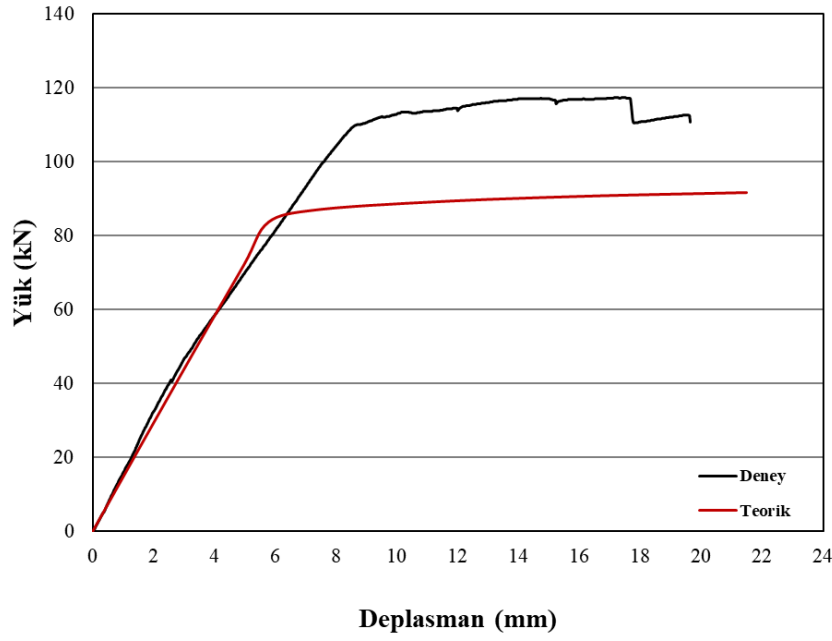
Şekil 4.3 değerlendirildiğinde, BSF-40-3D kiriş numunesinde yaklaşık olarak 90 kN yük değerine ulaşıldığı ana kadar kiriş teorik yük-deplasman eğrisinin deneysel eğriden az miktarda uzak kaldığı, bu aşamadan sonra kirişlerin iyi derecede deplasman sergilediği ve eğrilerin uyum içerisinde olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.4 incelendiğinde, BSF-40-4D numunesinde yaklaşık olarak 90 kN yük değerine ulaşılan kadar teorik ve deneysel yük-deplasman eğrilerinin çok iyi derecede uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Bu aşamadan sonra çelik liflerin katkısına bağlı olarak kiriş numunenin deneysel taşıma gücü kapasitesinin teorik yük değerinden fazla elde edildiği görülmektedir (Şekil 4.4).



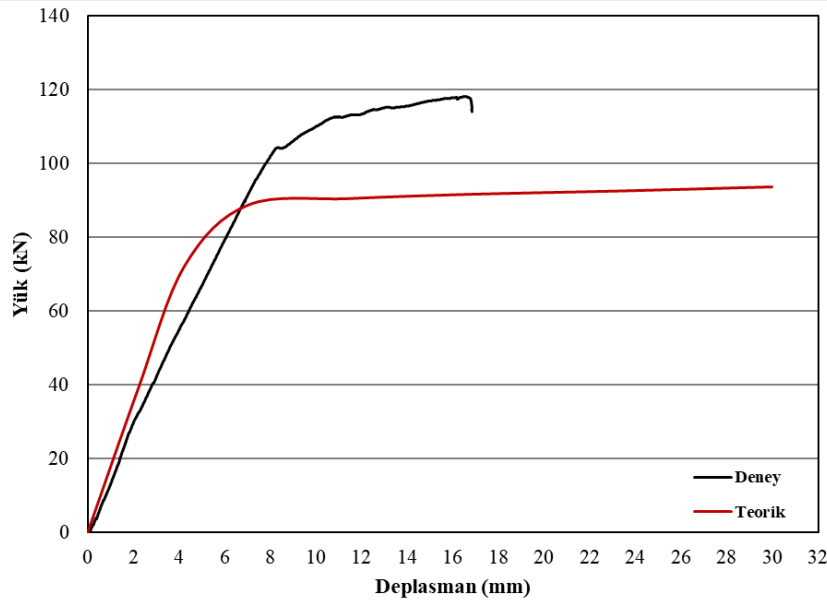
Şekil 4.5. BSF-40-5D kiriş numunesinin deneysel ve teorik olarak Yük-Deplasman eğrileri

BSF-40-5D numunesinin teorik yük-deplasman eğrisinin büyük oranda deneysel yük-deplasman eğrisi ile uyumlu olduğu, yaklaşık 85 kN yük değerinden sonra çelik lifleri katkısıyla deneysel taşıma gücünün bir miktar daha fazla elde edildiği görülmektedir (Şekil 4.5).



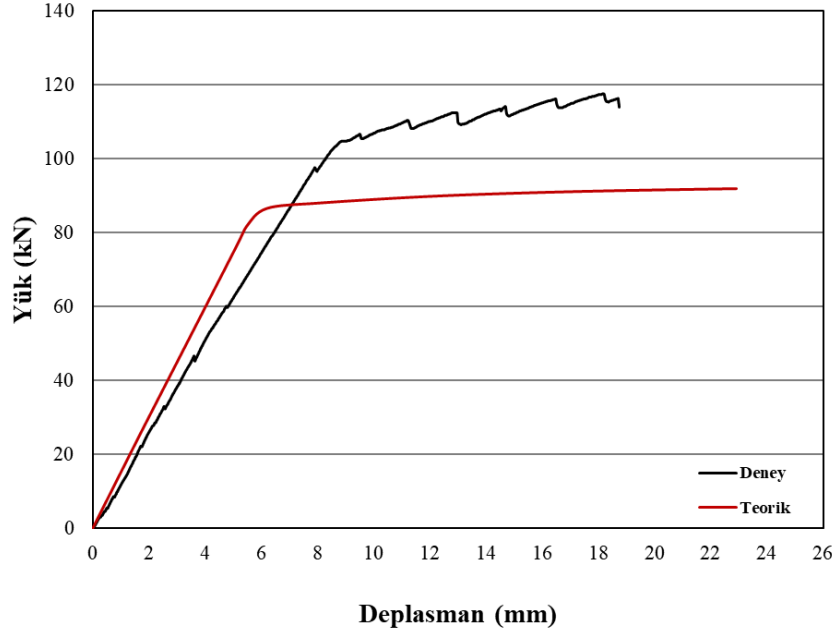
Şekil 4.6. BSF-60-3D kiriş numunenin deneysel ve teorik olarak Yük-Deplasman eğrileri

BSF-60-3D numunesinin teorik yük-deplasman eğrisinin deneysel yük-deplasman eğrisi ile genel olarak uyumlu olduğu, yaklaşık 85 kN yük değerinden sonra deneysel taşıma gücünün teorik değere göre daha büyük değerlere ulaştığı görülmektedir (Şekil 4.6). Elde edilen sonuçlara göre, çelik liflerin kiriş taşıma gücü kapasitesi üzerinde önemli ölçüde etkisinin olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 4.6).



Şekil 4.7. BSF-60-4D kiriş numunenin deneysel ve teorik olarak Yük-Deplasman eğrileri

BSF-60-4D numunesinde yaklaşık olarak 80 kN yük değerine ulaşılan kadar teorik ve deneysel yük-deplasman eğrilerinin çok iyi derecede uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 4.7). Bu aşamadan sonra çelik liflerin katkısına bağlı olarak kiriş numunenin deneysel taşıma gücü kapasitesini önemli ölçüde arttırdığı açıkça görülmektedir (Şekil 4.7).



Şekil 4.8. BSF-60-5D kiriş numunesinin deneysel ve teorik olarak Yük-Deplasman eğrileri

BSF-60-5D numunesinde yaklaşık olarak 85 kN yük değerine ulaşılan kadar teorik ve deneysel yük-deplasman eğrilerinin çok iyi derecede uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 4.8). Bu aşamadan sonra çelik liflerin katkısıyla kiriş numunenin deneysel taşıma gücü kapasitesinin teorik yük değerinden fazla elde edildiği görülmektedir (Şekil 4.8).

Şekiller incelendiğinde, test edilen kirişlerin dört nokta yüklemesi altında sünek davranış gösterdikleri görülmektedir. Kirişlerin teorik yük-deplasman eğrilerinin deneysel eğrilerle büyük oranda uyumlu olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, kiriş deplasmanlarının hesaplanmasında Sinüs Eğrisi Yönteminin uygun sonuç sağladığı görülmüştür. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre, çelik liflerin kiriş yük taşıma kapasitesi üzerine olumlu etkisinin olduğu belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Sunulan çalışmada, çelik lifsiz ve çelik lifli betonarme kirişler üretilerek dört nokta yüklemesi altında test edilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında test edilen kirişlerin yapısal davranışı ve kirişlerde oluşan çatlak gelişimi incelenmiştir. Kirişlerin dört nokta yüklemesi altında deneysel yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir. Ayrıca çalışmada kirişlerin analizi için teorik bir yöntem geliştirilmiş. Test edilen kirişler taşıma gücü kapasitesi ve teorik yük-deplasman eğrilerinin elde edilmesi amacıyla önerilen yöntemle dayalı olarak analiz edilmiş ve bulunan teorik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur

- (1) Test edilen kirişlerin sünek davranış sergiledikleri belirlenmiştir. Çelik lifsiz kiriş numuneye kıyasla çelik lif oranı arttıkça kirişin taşıma gücünde en az %10 oranında artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Çelik lif hacimsel oranının artmasına bağlı olarak kirişin deplasman yapabilme özelliğini kaybetmeden daha yüksek taşıma gücü performansı sergilediği tespit edilmiştir.
- (2) Düşük çelik lif hacimsel oranına sahip karışımlar ile üretilen kiriş numunelerde çelik liflerin kiriş yapısal davranışı üzerine çok belirgin etkisinin olmadığı görülmüş, hacimsel oranın artırılmasıyla yapısal davranışa etkisinin daha önemli ölçüde olduğu saptanmıştır.
- (3) Farklı hacimsel oranlar içeren beton ile üretilen kirişlerde çelik lif katkısının kirişlerin beton basınç dayanımı üzerinde önemli bir etki göstermediği ancak taşıma kapasitesinde artış sağladığı tespit edilmiştir.
- (4) Aynı hacimsel oranda farklı uç kancalı çelik liflerle (3D, 4D, 5D) üretilen kirişler üzerinde yapılan deneylerde genel olarak çatlak yayılımının ve çatlak oluşumunun benzer olduğu görülmüş, ancak 5D çelik lifle üretilen kirişlerde diğer kirişlere kıyasla çatlak genişliğinin daha kılcal düzeyde kaldığı ve çatlak ilerlemesinin daha düşük düzeyde olduğu belirlenmiştir.
- (5) Sonuç olarak yapılan deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, çelik lif katkısının optimum hacimsel değerinin 40 kg/m^3 ile 60 kg/m^3 arasında seçilmesinin uygun olduğu saptanmış olup, 60 kg/m^3 üzerinde çelik lif içeren karışıma sahip betonun işlenebilirliğinin düşük düzeyde olacağı öngörülmektedir.

6. ÖNERİLER

Sunulan çalışmada, test edilen çelik lifli kirişlerin içerisinde 20, 40, 60 kg/m³ hacimsel oranlar esas alınmıştır. Çelik liflerin kiriş numunelerin davranışı üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır. Söz konusu parametrelerin kiriş davranışına etkisinin daha kapsamlı şekilde ortaya konulması bakımından beton içerisinde farklı hacimsel oranlarda çelik lif kullanarak üretilen kiriş numunelerin test edilmesi faydalı olacaktır. Özellikle 40-60 kg/m³ hacimsel değer aralığında çelik lif içeren karışımda yapılacak çalışmaların iyi sonuçlar vereceği önerilmektedir. Ayrıca kirişte standart çelik donatı yerine FRP donatı kullanılarak kirişin deneysel ve teorik davranışının belirlenmesinin faydalı olacağı değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda yapılacak olan çalışmalar ile çelik lifli betonarme kirişlerin deneysel sonuçlarının literatüre önemli katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

KAYNAKÇA

ACI Committee 318, 2019. Building code requirements for structural concrete. ACI 318-19, American Concrete Institute, Farmington Hills., MI, 628 pp.

Altun, F., & Aktaş, B. (2011). Çelik Tel Katkılı Hafif Betonun Eğilme Tokluğunun İncelenmesi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 14(2), 27-33.

Altun, F., Yılmaz, C., Durmuş, A., & Kamuran, A. R. I. (2006). Çelik lif katkılı ve katkısız betonarme kirişlerin basit eğilme ve patlama yüklemesi ile davranışlarının incelenmesi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi, 22(1), 112-120.

American Society for Testing and Materials. Committee C-09 on Concrete and Concrete Aggregates. (2013). Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading). ASTM International.

Blaszczynski, T. & Przybylska-Falek, M. (2015). Operational Research in Sustainable Development and Civil Engineering - meeting of EURO working group and 15th German-Lithuanian-Polish colloquium (ORSDC 2015). Procedia Engineering 122 (2015) 282 – 289.

Çivici, F., & Güngör, E. (2016). Karma lifli betonların tokluk açısından değerlendirilmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, 7(3), 365-376.

Gao, D., Ding, C., Pang, Y., Yang, L., Huang, Y., & Tang, J. (2021). Diverse angle-length-width model for 3d/4d/5d steel fiber reinforced concrete under tension. Construction and Building Materials, 266, 121149.

Gülşan, M. E. (2019). Yüksek mukavemetli çelik lif katkılı betonarme değişken kesitli kirişlerin mekanik davranışı. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(1), 206-214.

Güngör, E. (2013). Karma lifli betonların özelliklerinin deneysel irdelenmesi (Master's Thesis, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Kim, D. J., Park, S. H., Ryu, G. S., & Koh, K. T. (2011). Comparative flexural behavior of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers. Construction and Building Materials, 25(11), 4144-4155

Kozak, M. (2013). Çelik lifli betonlar ve kullanım alanlarının araştırılması. Teknik Bilimler Dergisi, 3(1), 26-35.

Köksal, F., Altun, F., Yiğit, İ., & Şahin, Y. (2008). Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes. Construction and Building Materials, 22(8), 1874-1880.

Okay, F., & Engin, S. (2009). Çelik Lif Katkılı Betonarme Kirişlerde Basit Burulma Etkisinde Oluşan Çatlakların ve Kesit Taşıma Gücünde Oluşan Değişimlerin İncelenmesi. Uluslararası Sakarya Deprem Sempozyumunu, 1(3).

Rangan, B. V. (1990). Strength of reinforced concrete slender columns. *Structural Journal*, 87(1), 32-38.

Lee, J. Y., Shin, H. O., Yoo, D. Y., & Yoon, Y. S. (2018). Structural response of steel-fiber-reinforced concrete beams under various loading rates. *Engineering Structures*, 156, 271-283.

Le Hoang, A., & Fehling, E. (2017). Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 153, 790-806.

Qi, J., Wang, J., & Ma, Z. J. (2018). Flexural response of high-strength steel-ultra-high-performance fiber reinforced concrete beams based on a mesoscale constitutive model: Experiment and theory. *Structural Concrete*, 19(3), 719-734.

Rangan, B. V. (1990). Strength of reinforced concrete slender columns. *Structural Journal*, 87(1), 32-38.

Song, P. S., & Hwang, S. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 18(9), 669-673.

Standard, B. (2009). Testing hardened concrete. Compressive Strength of Test Specimens, BS EN, 12390-3.

Tadepalli, P. R., Mo, Y. L., Hsu, T. T., & Vogel, J. (2009). Mechanical properties of steel fiber reinforced concrete beams. In *Structures Congress 2009: Don't Mess with Structural Engineers: Expanding Our Role* (Pp. 1-10).

Tahenni, T., Chemrouk, M., & Lecompte, T. (2016). Effect of steel fibers on the shear behavior of high strength concrete beams. *Construction and Building Materials*, 105, 14-28.

Tokgoz, S., & Dundar, C. (2010). Experimental study on steel tubular columns in-filled with plain and steel fiber reinforced concrete. *Thin-Walled Structures*, 48(6), 414-422.

Tokgoz, S., Dundar, C., & Tanrikulu, A. K. (2012). Experimental behaviour of steel fiber high strength reinforced concrete and composite columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 74, 98-107.

TS500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 75 pp.

Venkateshwaran, A., Tan, K. H., & Li, Y. (2018). Residual flexural strengths of steel fiber reinforced concrete with multiple hooked-end fibers. *Structural Concrete*, 19(2), 352-365.

Yalçın, M. (2009). Çelik lif donatılı betonların performansa dayalı tasarımı ve optimizasyonu (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Yoo, D. Y., Banthia, N., & Yoon, Y. S. (2016). Predicting the flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 74, 71-87.

