



T.C.
GAZI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK
LİSANS
TEZİ

**YÜKSEK PERFORMANSLI BETONARME
KİRİŞLERİN MİNİMUM DONATI ORANININ
KIRILMA MEKANİĞİ ESASLARINA GÖRE
BELİRLENMESİ**

MUHAMMED GÜMÜŞ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MAYIS 2016



**YÜKSEK PERFORMANSLI BETONARME KİRİŞLERİN MİNİMUM
DONATI ORANININ KIRILMA MEKANİĞİ ESASLARINA GÖRE
BELİRLENMESİ**

Muhammed GÜMÜŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2016

Muhammed GÜMÜŞ tarafından hazırlanan “YÜKSEK PERFORMANSLI BETONARME KİRİŞLERİN MİNİMUM DONATI ORANININ KIRILMA MEKANİĞİ ESASLARINA GÖRE BELİRLENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof.Dr. Abdussamet ARSLAN

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan : Prof.Dr. Lütfullah TURANLI

İnşaat Mühendisliği, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç.Dr. Sabahattin AYKAÇ

İnşaat Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 26/05/2016

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Metin GÜRÜ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Muhammed GÜMÜŞ

26.05.2016

YÜKSEK PERFORMANSLI BETONARME KİRİŞLERİN MİNİMUM DONATI ORANININ KIRILMA MEKANİĞİ ESASLARINA GÖRE BELİRLENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Muhammed GÜMÜŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

May 2016

ÖZET

Geleneksel betonarme kirişlerde gevrek davranışı engellemek amacıyla, kullanılması gereken boyuna donatı oranının minimum değeri yönetmelikler tarafından belirtilmiştir. Ancak yüksek performanslı betonarme elemanlarda minimum donatı oranı üzerine yapılan çalışmalar oldukça sınırlı kalmıştır. Ayrıca yüksek performanslı betonlarda gerilme bloğu parametrelerinin normal betonlara göre farklı olması, yüksek performanslı betonarme elemanların hesabında taşıma gücü yöntemi yerine enerji esaslı bir çözüm yönteminin gerekliliğini de ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle, yüksek performanslı betonarme elemanların minimum donatı oranını belirlemek için kırılma mekaniği esaslı deneysel bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada, Eurocode 2’de kirişler için kullanılması gereken minimum donatı miktarını belirtilen ifade göz önünde bulundurularak, üç farklı donatı oranı belirlenmiştir. Yüksek dayanımlı betondan üretilen kirişlerin sünekliğini artırmak amacıyla karışıma farklı oranlarda karbon ve çelik lif ilave edilmiştir. Her bir farklı lif ve donatı içeriğine sahip betonlardan birer adet olmak üzere toplamda 18 adet betonarme kiriş üretilerek dört noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Farklı lif içeriğine sahip karışımlardan üretilen numunelere standart basınç, yarma ve direk çekme testleri uygulanarak, yüksek performanslı betonların mekanik özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca kırılma enerjisini belirlemek için her karışımdan dört adet kiriş elemanı üretilerek standart kırılma enerjisi deneyleri yapılmıştır. Deney sonunda karbon lifin betonun kırılma enerjisine etkisinin, çelik lifin etkisine göre oldukça düşük kaldığı görülmüştür. Karışımda kullanılan çelik lif içeriği ile minimum donatı oranı arasındaki değişim incelenerek gerekli bağıntılar çıkarılmıştır. Elde edilen bağıntı literatürde belirtilen eşitliklerle karşılaştırılmış ve literatürdeki ifadelerin yüksek performanslı betonlar için daha korumacı olduğu, minimum donatı oranı için daha fazla donatı alanı gerektirdiği görülmüştür.

Bilim Kodu : 91111

Anahtar Kelimeler : Kırılma mekaniği, Yüksek performanslı beton, Karbon lifli beton, Minimum donatı oranı

Sayfa Adedi : 124

Danışman : Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN

THE DETERMINATION OF MINIMUM REINFORCEMENT RATIO OF HIGH PERFORMANCE REINFORCED BEAMS BASED ON FRACTURE MECHANICS

(M. Sc. Thesis)

Muhammed GÜMÜŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2016

ABSTRACT

Minimum axial reinforcement required to prevent traditional beams from brittle behavior was defined by several specifications. However, the conducted studies on minimum reinforcement ratio of high performance concrete were very limited. Besides, a solution method based on energy principles rather than ultimate limit state design for high performance reinforced concrete has arisen because stress block parameters of high performance concrete differ from that of traditional concrete. Therefore, an experimental study based on fracture mechanic laws was conducted to determine the minimum reinforcement of high performance concrete. In the present study, considering the minimum reinforcement ratio for beams explained by Eurocode-2, three different reinforcement ratios were utilized. Different fractions of carbon and steel fibres were used in order to increase ductility of beams having high strength concrete. In total 18 identical reinforced concrete beams were produced and four point bending tests were performed on the beams. Mechanical properties of high performance concrete were determined by standard compression, Brazilian splitting and direct tension tests. Moreover, a standard fracture energy test was performed with the unreinforced beams to determine the fracture parameters. After the experiment, it could be concluded that the effect of the carbon fibre on the fracture energy was very limited to that of steel fibre. The relation between the fraction of steel fibre and minimum reinforcement ratio was investigated and the equation defining minimum reinforcement ratio was obtained. The results from the present study were compared with the results reported in the literature and it was seen that the equations from literature were more conservative than the present study and the equations overestimate the minimum reinforcement ratio for high performance concrete.

Science Code : 91111

Key Words : Fracture mechanics, High performance concrete, Characteristic length, Carbon fiber, Minimum reinforcement ratio

Page Number : 124

Supervisor : Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN

TEŞEKKÜR

Öğrenim hayatım boyunca destekleri benden esirgemeyen, bu günlere gelmemde üzerimde en büyük emeğe sahip olan haklarını asla ödeyemeyeceğim kıymetli anne ve babama, çalışmam sırasında manevi desteğini üzerimden eksik etmeyen kıymetli eşime gönülden teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim süresince beni yönlendiren, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan ve tez çalışmamın şekillenmesini sağlayan değerli hocam, kıymetli büyüğüm sayın Prof. Dr. Abdussamet ARSLAN'a teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam sırasında laboratuvarı bana yardımcı olan başta sayın hocam Uzman Faruk OGÜN'e ve Araştırma görevlisi Adem Işık, Meryem BÖCEK ve Metin Büyük'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. NORMAL VE YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLAR	3
2.1. Normal Betonlar.....	3
2.2. Yüksek Dayanımlı Betonlar (YDB).....	4
2.3. Ultra Yüksek Performanslı Betonlar (UYPB).....	4
3. LİF VE ÇEŞİTLİ KATKILARIN BETON ÜZERİNE ETKİSİ	7
3.1. Betonda Lif Kullanımı	7
3.2. Yaygın Olarak Kullanılan Çeşitli Lif Türleri.....	7
3.2.1. Cam lifi	7
3.2.2. Polipropilen lif	8
3.2.3. Çelik lifler	8
3.3. Yüksek Mukavemete Sahip Karbon Liflerin Betonda Kullanılması	9
3.4. Kimyasal Katkıların Beton Özelliklerine Etkisi	11
3.5. Silis Dumanının Betonun Özelliklerine Etkisi.....	12
4. KIRILMA MEKANİĞİ	15

	Sayfa
4.1. Giriş.....	15
4.2. Kırılma Mekaniğinin Tarihsel Süreci.....	16
4.3. Griffith Teorisi	18
4.4. Irwin Teorisi.....	19
4.5. Numune Boyutlarının Kırılma Tokluğuna Etkisi.....	20
4.6. Çatlak Ucu Plastik Bölgesi.....	21
5. BETONUN KIRILMA MEKANİĞİ.....	23
5.1. Giriş.....	23
5.2. Kırılma Mekaniğinin Betona Uygulanması	24
5.3. Kırılma Parametrelerini Belirlemeye Yönelik Çalışmalar	25
5.4. Betonun Kırılma Mekaniği ile İlgili Modeller	26
5.4.1. Fiktif çatlak modeli	26
5.4.2. Boyut etkisi modeli	27
5.4.3. İki parametrelili model	28
5.5. Kırılma Enerjisi G_F	28
5.6. Kirişlerde Minimum Eğilme Donatısı.....	31
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	37
6.1. Beton Karışımı	37
6.1.1. Çimento	37
6.1.2. Agrega.....	37
6.1.3. Hiper akışkanlaştırıcı katkı	38
6.1.4. Silis dumanı.....	39
6.1.5. Karbon lif	39
6.2. Beton Karışım Oranları ve Üretimi.....	40

	Sayfa
6.3. Eleman Boyutları ve İsimlendirilmesi	41
6.4. Deneylerde Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Yükleme-Ölçüm Düzeneği	42
6.4.1. Yük hücresi	42
6.4.2. Deplasman ölçer (LVDT)	42
6.4.3. Veri toplayıcı (Data logger)	43
6.4.4. Birim deformasyon ölçer (Strain gauge).....	43
6.4.5. Yükleme ve ölçüm düzeneği.....	44
7. DENEY SONUÇLARI	47
7.1. Küp Numunelerin Basınç Dayanımları.....	47
7.2. Silindir Yarma ve Beton Çekme Deneyi.....	49
7.3. Üç Noktalı Kırılma Enerjisi Deneyleri	52
7.4. Dört Noktalı Betonarme Kiriş Deneyleri	59
7.4.1. NF A1 S2	60
7.4.2. NF A2 S2	63
7.4.3. NF A3 S2	65
7.4.4. CF A1 S1.....	67
7.4.5. CF A2 S1.....	70
7.4.6. CF A3 S1.....	72
7.4.7. CF B1 S1	74
7.4.8. CF B2 S1	77
7.4.9. CF B3 S1	79
7.4.10. SF A1 S1	82
7.4.11. SF A2 S1	84
7.4.12. SF A3 S1	86

	Sayfa
7.4.13. SF B1 S1	89
7.4.14. SF B2 S1	91
7.4.15. SF B3 S1	93
7.4.16. SF C1 S1	96
7.4.17. SF C2 S1	98
7.4.18. SF C3 S1	100
7.5. Lif Türü ve Oranının Donatılı Kirişlere Etkisi.....	103
7.5.1. Lif türü ve oranının tek donatılı kirişlere etkisi.....	103
7.5.2. Lif türü ve oranının iki donatılı kirişlere etkisi.....	105
7.5.3. Lif türü ve oranının üç donatılı kirişlere etkisi.....	107
7.6. Kiriş Yüzünde Oluşan Birim Deformasyonlar.....	108
7.7. Yüksek Performanslı Betonlarda Minimum Donatı Oranı.....	112
8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	115
8.1. Malzeme Deney Sonuçları.....	115
8.2. Betonarme Kiriş Deney Sonuçları.....	116
KAYNAKLAR.....	119
ÖZGEÇMİŞ.....	123

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Normal dayanımlı beton (NDB), Yüksek dayanımlı beton (YDB) ve Reaktif Pudra betonlarının (RPC) karşılaştırılması	5
Çizelge 3.1. Farklı malzemelerin inceliklerinin karşılaştırılması	13
Çizelge 6.1. Çimentonun a) Kimyasal, b) Fiziksel Özellikleri	37
Çizelge 6.2. Silis kumu elek analizi.....	38
Çizelge 6.3. Kimyasal katkı özellikleri.....	38
Çizelge 6.4. Silis dumanındaki SiO_2 miktarları.....	39
Çizelge 6.5. Karbon lif mekanik ve fiziksel özellikleri	39
Çizelge 6.6. Beton karışım oranları	40
Çizelge 6.7. Eleman ve numune boyutları	41
Çizelge 6.8. Betonarme kiriş elemanlarının isimleri	41
Çizelge 7.1. Ortalama küp dayanımları ve standart sapma değerleri	48
Çizelge 7.2. Beton yarma ve standart çekme deney sonuçları.....	51
Çizelge 7.3. Lif içermeyen karışımların kırılma enerjilerinin karşılaştırması	53
Çizelge 7.4. Beton karışımların kırılma enerjileri ve eğilme dayanımları.....	58

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Tek eksenli basınç altında normal ve yüksek dayanımlı betonlarda gerilme-şekil değiştirme eğrisi	1
Şekil 3.1. Karbon lif içerisindeki grafitin 3 boyutlu görünüşü	10
Şekil 4.1. Çekme etkisine maruz çentikli levhada gerilme dağılımı.....	15
Şekil 4.2. Kırılma modları ve onlara karşılık gelen gerilme durumları	20
Şekil 5.1. a) gevrek ve b) yarı gevrek malzemelerin gerilme uzama grafikleri.....	23
Şekil 5.2. Hillerborg tarafından önerilen fiktif çatlak modeli.....	27
Şekil 5.3. Betonun gerilme-şekil değiştirme ve gerilme-çatlak açılması grafikleri.....	27
Şekil 5.4. Çentikli betonun yük-deplasman grafiği şematik gösterimi	29
Şekil 5.5. Çentikli beton geometrisi.....	30
Şekil 5.6. Çentikli beton geometrisi Yük kontrollü yükleme (AB) ve deplasman kontrollü yükleme (AC)	32
Şekil 5.7. Çekme bölgesinde çatlak oluşan betonarme kiriş.....	32
Şekil 6.1. Dört noktalı yükleme ve ölçüm düzeneği	44
Şekil 6.2. Üç noktalı yükleme ve ölçüm düzeneği.....	45
Şekil 7.1. Karbon ve çelik lifin basınç dayanımına etkisi.....	48
Şekil 7.2. Karbon ve çelik lifin yarma ve eğilme dayanımına etkisi	52
Şekil 7.3. Lif içermeyen elemanların yük-deplasman grafikleri.....	53
Şekil 7.4. %0,22 karbon lif içeren elemanların yük-deplasman grafikleri	54
Şekil 7.5. %0,43 karbon lif içeren elemanların yük-deplasman grafikleri	55
Şekil 7.6. %0,65 karbon lif içeren elemanların yük-deplasman grafikleri	55
Şekil 7.7. Lifsiz ve karbon lif içeren elemanların ortalama yük-deplasman grafikleri...	56
Şekil 7.8. %0,33 çelik lif içeren elemanların yük-deplasman grafikleri.....	56
Şekil 7.9. %0,66 çelik lif içeren elemanların yük-deplasman grafikleri.....	57

Şekil	Sayfa
Şekil 7.10. %0,99 çelik lif içeren elemanların yük-deplasman grafikleri.....	57
Şekil 7.11. Lifsiz ve çelik lif içeren elemanların ortalama yük-deplasman grafikleri....	58
Şekil 7.12. NF A1 S2 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği.....	61
Şekil 7.13. NF A1 S2 elemanında yük-birim deformasyon grafiği	62
Şekil 7.14. NF A2 S2 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği.....	64
Şekil 7.15. NF A2 S2 elemanında yük-birim deformasyon grafiği	65
Şekil 7.16. NF A3 S2 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği	66
Şekil 7.17. NF A3 S2 elemanında yük-birim deformasyon grafiği	67
Şekil 7.18. CF A1 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği	68
Şekil 7.19. CF A1 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği	69
Şekil 7.20. CF A2 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği	71
Şekil 7.21. CF A2 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği	72
Şekil 7.22. CF A3 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği	73
Şekil 7.23. CF A3 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği	74
Şekil 7.24. CF B1 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği	75
Şekil 7.25. CF B1 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği.....	76
Şekil 7.26. CF B2 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği	78
Şekil 7.27. CF B2 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği.....	79
Şekil 7.28. CF B3 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği	80
Şekil 7.29. CF B3 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği.....	81
Şekil 7.30. SF A1 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği.....	82
Şekil 7.31. SF A1 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği.....	83
Şekil 7.32. SF A2 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği.....	85
Şekil 7.33. SF A2 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği.....	86

Şekil	Sayfa
Şekil 7.34. SF A3 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği.....	87
Şekil 7.35. SF A3 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği.....	88
Şekil 7.36. SF B1 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği.....	89
Şekil 7.37. SF A1 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği.....	90
Şekil 7.38. SF B2 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği.....	92
Şekil 7.39. SF B2 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği.....	93
Şekil 7.40. SF B3 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği.....	94
Şekil 7.41. SF B3 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği.....	95
Şekil 7.42. SF C1 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği.....	96
Şekil 7.43. SF C1 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği.....	97
Şekil 7.44. SF C2 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği.....	99
Şekil 7.45. SF C2 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği.....	100
Şekil 7.46. SF C3 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği.....	101
Şekil 7.47. SF C3 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği.....	102
Şekil 7.48. Farklı donatı oranlarına sahip elemanların enerji yutma kapasiteleri.....	103
Şekil 7.49. Tek donatılı betonarme kirişlerin yük-deplasman grafikleri.....	104
Şekil 7.50. Çift donatılı betonarme kirişlerin yük-deplasman grafikleri.....	106
Şekil 7.51. Üç donatılı betonarme kirişlerin yük-deplasman grafikleri.....	108
Şekil 7.52. Karbon lifli tek donatılı kirişlerde kırılma yükündeki birim deformasyonlar.....	109
Şekil 7.53. Çelik lifli tek donatılı kirişlerde kırılma yükündeki birim deformasyonlar.....	109
Şekil 7.54. Karbon lifli çift donatılı kirişlerde kırılma yükündeki birim deformasyonlar.....	110
Şekil 7.55. Çelik lifli çift donatılı kirişlerde kırılma yükündeki birim deformasyonlar.....	110

Şekil	Sayfa
Şekil 7.56. Karbon lifli üç donatılı kirişlerde kırılma yükündeki birim deformasyonlar.....	111
Şekil 7.57. Çelik lifli üç donatılı kirişlerde kırılma yükündeki birim deformasyonlar.....	111
Şekil 7.58. Minimum donatı oranlarının karşılaştırması.....	113

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Silis dumanının a) tarayan ve b) geçirgen ışıklı elektron mikroskoplarıyla çekilmiş resimleri.....	12
Resim 6.1. Yük hücresi (Load Cell)	42
Resim 6.2. Deplasman ölçer (LVDT)	42
Resim 6.3. Veri toplayıcı (Data Logger)	43
Resim 6.4. Birim deformasyon ölçer (Strain gauge)	43
Resim 7.1. a) küp numuneler, b) basınç deneyi.....	47
Resim 7.2. Silindir numunelerin Brazilian yarma testi.....	49
Resim 7.3. a) beton çekme deneyi, b) beton çekme numuneleri	50
Resim 7.4. Çentikli elemanlarda kırılma enerjisi deneyi.....	52
Resim 7.5. Betonarme kirişlerin 4 noktalı yükleme deneyi.....	60
Resim 7.6. NF A1 S2 elemanında eğilme çatlakları.....	62
Resim 7.7. NF A2 S2 elemanında eğilme çatlakları.....	63
Resim 7.8. NF A3 S2 elemanında çatlakları.....	67
Resim 7.9. CF A1 S1 elemanında eğilme çatlağı	69
Resim 7.10. CF A2 S1 elemanında eğilme çatlakları	70
Resim 7.11. CF A3 S1 elemanında eğilme çatlakları	72
Resim 7.12. CF B1 S1 elemanında eğilme çatlağı.....	76
Resim 7.13. CF B2 S1 elemanında eğilme çatlakları	77
Resim 7.14. CF B3 S1 elemanında eğilme çatlakları	79
Resim 7.15. SF A1 S1 elemanında eğilme çatlağı.....	84
Resim 7.16. SF A2 S1 elemanında eğilme çatlağı.....	84
Resim 7.17. SF A3 S1 elemanında eğilme çatlağı.....	88
Resim 7.18. SF B1 S1 elemanında eğilme çatlağı.....	91

Resim	Sayfa
Resim 7.19. SF B2 S1 elemanında eğilme çatlağı	91
Resim 7.20. SF B3 S1 elemanında eğilme çatlağı	95
Resim 7.21. SF C1 S1 elemanında eğilme çatlağı	98
Resim 7.22. SF C2 S1 elemanında eğilme çatlağı	98
Resim 7.23. SF C3 S1 elemanında eğilme çatlağı	102

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

MPa

Megapascal

GPa

Gigapascal

μm

Mikrometre

L

Kiriş uzunluğu

h

Kiriş derinliği

d

Beton örtü kalınlığı

K_I

Gerilme yoğunluk faktörü

K_{IC}

Kritik gerilme yoğunluk faktörü

r_p

Çatlak ucu plastik bölge uzunluğu

G_f

Kırılma enerjisi

f_y

Donatı akma gerilmesi

N_p

Betonun gevreklik indeksi

a

Çatlak uzunluğu

ξ

Rölatif çatlak uzunluğu

$Y_m(\xi)$

Geometrik fonksiyon

$Y_f(\xi)$

Geometrik fonksiyon

Kısaltmalar

Açıklamalar

BET

Azot adsorpsiyon metodu

BPC-52,5

52,5 MPa dayanıma sahip beyaz portland çimentosu

CTOD

Çatlak ucu açılma uzunluğu

LEKM

Lineer elastik kırılma mekaniği

LVDT

Doğrusal değişken fark transformatörü

RPB

Reaktif pudra betonları

UYPB

Ultra yüksek performanslı betonlar

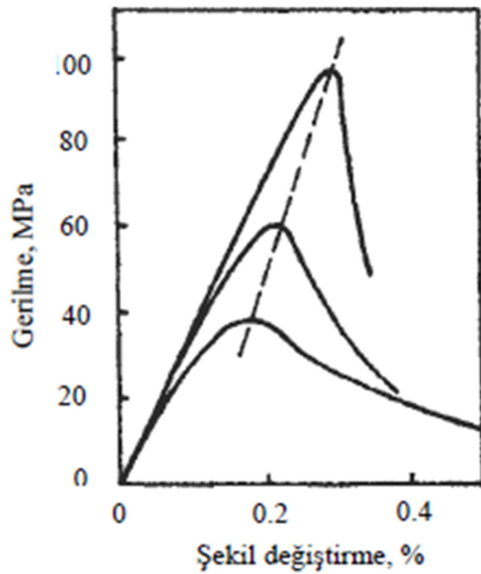
YPB

Yüksek performanslı betonlar

1. GİRİŞ

Yapısal taşıyıcı elemanlarda kullanılan bir malzeme olan beton, çimento, ince ve kaba agrega, çeşitli kimyasallar ve suyun belirli oranlarda karıştırılmasıyla üretilen heterojen bir malzemedir. Gevrek bir malzeme olan betonun yapı çeliğiyle birlikte kullanılması durumunda eğilme kapasitesi oldukça artmaktadır. Üretim kolaylığı, maliyeti ve artan talepler göz önüne alındığında betonarmenin yapısal bir malzeme anlamında vazgeçilemez olduğu söylenebilir.

Geleneksel yöntemlerle 1970'li yıllarında, mimari gereksinimlerden dolayı 50 MPa basınç mukavemetine ulaşabilen betonlar üretilmiştir. Yüksek dayanıma sahip agregaların kullanılması su/çimento oranının azaltılmasıyla birlikte elde edilen betonun dayanımı da artmıştır. Ancak yüksek dayanıma sahip betonlarda dayanımla birlikte gevreklik sorunu olduğu gözlenmiştir (Jansen, Shah ve Rossow, 1995). Elastisite modülündeki artışla basınç dayanımındaki artışın düzeyi Şekil 1.1'de görülmektedir.



Şekil 1.1. Tek eksenli basınç altında normal ve yüksek dayanımlı betonlarda gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Jansen, Shah ve Rossow, 1995)

Zararlı dış ortamlara ve sürekli yüklere maruz kalan yapı elemanları için yüksek dayanım tek başına yeterli olmamaktadır. Bu tür yapılarda dayanım yanında süneklik ve dayanıklılık özellikleri de gereklidir. Bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla yüksek performanslı betonlar geliştirilmiştir. Günümüzde yüksek dayanımlı çimento, silis dumanı

ve uçucu kül gibi mineral malzemelerin beton içerisinde kullanımı, karışımda ince agregaların kullanımı, düşük su/çimento oranı, mukavemet artırıcı çeşitli kimyasalların kullanımı, beton karışıma lif katılması ve uygun kür koşullarının sağlanmasıyla yeni nesil betonlar elde edilebilmektedir. Tokluğu artırılmış bu tür betonlar yüksek performanslı betonlar olarak isimlendirilirler ve yüksek enerji yutma kapasitelerine sahiptirler.

Basit anlamda düşük su/çimento oranına sahip yüksek performanslı betonlar, ilk yatırım maliyetleri göz önüne alındığında normal betonlara göre daha az maliyetli olmaktadır. Çünkü sistemi oluşturan çerçeve elemanlarının boyları ve buna bağlı olarak da kullanılan donatı miktarı azalmaktadır. Basınç dayanımı 60 MPa olan betonarme bir köprü yapım maliyetinin basınç dayanımı 35 MPa olana göre %8 daha az olduğu söylenebilir (Aitcin, 2000).

Betonarme yapıların tasarımında kullanılan hesap türlerinin çoğu betonun basınç dayanımını dikkate alırken çekme dayanımı göz ardı etmektedir. Bu da betonun dayanımı arttıkça süneklik için gerekli donatı miktarının, betonun çekme dayanımı dikkate alınmadan artırılmasına neden olmaktadır. Sonuçta gereğinden fazla donatı kullanılarak donatı israfı yapılırken ekonomik yönden zarar edilmektedir. Özellikle kolon kiriş birleşimleri gibi donatıların sık düzenlendiği yerlerde betonun tam yerleşmemesi sonucu aderans zayıflığı da oluşmaktadır (Karihaloo, 2014). Bu olumsuz durumdan kurtulmak için betonun basınç dayanımına değil karakteristik boya bağlı olan, kırılma mekaniği temeline dayanan bir yaklaşım geliştirilmiştir.

Bu çalışma, yüksek performanslı beton kullanılan betonarme kirişlerde minimum donatı oranını kırılma mekaniği esasları dikkate alınarak belirlemek üzere hazırlanmıştır. Çalışmada 3 farklı donatı oranı ve 2 adet lif türü ile 18 adet donatılı eğilme kirişi üretilmiştir. Beton karışımı içerisine hacimce %0,22; %0,43 ve %0,65 oranlarında karbon lif ve %0,33; %0,66 ve %0,99 oranlarında çelik lif konulmuştur. Donatı oranları Eurocode-2 de belirtilen eğilme kirişleri için gerekli minimum donatı sınırı göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Beton karışımın içerisine çimento ağırlığının %15'i kadar silis dumanı katılmıştır. Su/çimento oranı 0,20 oranında sabit tutulmuş ve mikro agregalar kullanılarak tam sıkışma sağlanmıştır. Yeterli işlenebilirliği elde etmek amacıyla %3 oranında süper akışkanlaştırıcı ilave edilmiştir. a/d oranının 2,5 olması için eğilme kirişlerinin boyutları 150x200x1300 mm olarak belirlenmiştir.

2. NORMAL VE YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLAR

2.1. Normal Betonlar

Normal betonlar üretiminin kolay olması, ucuz hammadde ve işgücü temini ile ekonomik olarak üretilebilen betonlardır. Basınç dayanımları 20 MPa ile 50 MPa arasındadır. Yol, bina, köprü ve tünel gibi bir çok yapıda kullanılırlar. Bu betonları yüksek performanslı betonlardan ayıran temel özelliklerden birisi çekme dayanımlarının çok düşük olmasıdır. Yapı sektöründe ekonominin önemi göz önünde tutulduğunda bu betonların uygulamada her zaman bir yeri olacağı kolaylıkla söylenebilir.

Bileşen malzemeler, beton dayanıklılığını olumsuz etkileyebilecek veya donatı korozyonuna sebep olabilecek miktarda zararlı madde içermemeli ve betonda kullanım amacına uygun olmalıdır. Bileşen malzemelerin genelde uygunluğunun belirlenmiş olması, bu malzemelerin her durumda ve her beton bileşimi için uygun olduğunu göstermez. Standartlara uygun betonlarda, sadece öngörülen uygulamalar için uygunluğu belirlenmiş bileşen malzemeler kullanılır

Tasarlanmış veya tarif edilmiş betonun bileşim oranları ve bileşen malzemeleri, kıvam, yoğunluk, dayanım, dayanıklılık, betona gömülü çelik donatının korozyondan korunmasına ilişkin taze ve sertleşmiş beton için belirlenmiş özellikleri sağlamak üzere, imalat işlemi ve betonarme yapının öngörülen yapım yöntemi de dikkate alınarak seçilmelidir. Beton, aksi belirtilmemişse, taze betonun ayrışması ve su kusması en az olacak şekilde tasarlanmalıdır.

Yapıda, betonun gerekli özelliklerinin sağlanması ancak taze betonun, kullanım yerinde belirli uygulama kurallarına göre işleme tâbi tutulmasıyla gerçekleştirilebilir. Bu nedenle standartlarda verilen şartlara ilâveten betonun taşınması, yerleştirilmesi, sıkıştırılması, kürü ve daha sonraki işlemler, betonun belirlenmesinde dikkate alınmalıdır. Bu özelliklerden çoğu genellikle birbirine bağlıdır. Bu şartların hepsinin sağlanması durumunda, yapıdaki beton ve standart deney numunesi betonu arasındaki herhangi kalite farkı, malzeme için kısmi güvenlik katsayısı sınırları içerisinde kalır.

2.2. Yüksek Dayanımlı Betonlar (YDB)

Yüksek dayanımlı betonlar yüksek dayanımlı çimento, silis dumanı, süper akışkanlaştırıcı ve yüksek mukavemete sahip agregaların karışımından oluşan özel bir beton türüdür. Yüksek dayanımlı betonun tasarımındaki amaç beton karışımının içerisinde oluşan mikro boşlukları en az seviyeye indirebilmektir. Kullanılan silis miktarı çimento ağırlığının %15-50'si arasında değişmektedir (Erdoğan, 2003). Su/çimento oranı 0,20 değerine kadar düştüğünden dolayı işlenebilirlik kıvamını yakalayabilmek için yüksek oranda akışkanlaştırıcı özelliğe sahip yeni nesil süper akışkanlaştırıcılar kullanılmaktadır.

Günümüz şartlarında Türkiye'de 50 MPa ve üzeri beton dayanımlarına sahip betonlar yüksek dayanımlı beton olarak isimlendirilmektedirler. Yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımlarının yanında çevresel etkilere karşı gösterdiği direnç de normal betonlara kıyasla oldukça yüksektir. Düşük su/çimento oranı hidratasyon sırasında buharlaşan su miktarını azaltmakta ve böylece betonun porozitesi düşerken durabilitesi artmaktadır.

Yüksek dayanımlı betonlar yüksek mukavemet değerlerine sahip olmakla birlikte normal betonlara göre daha gevrek davranış göstermektedirler. Bu sorunu ortadan kaldırmak, betonun tokluğunu artırmak için karışım içerisine farklı türde lifler katılmaktadır.

Yüksek performanslı betonların kullanım alanları gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Kullanımdaki bu artışın nedeni olarak mimari estetiğe bağlı olarak bina yüksekliklerinin artışı, enerji ihtiyacına bağlı olarak baraj ve nükleer santrallerin çoğalması, ulaşım gereksinimini karşılamak amacıyla büyük açıklıklı köprüler ve viyadükler yapılması gibi örnekler verilebilir.

2.3. Ultra Yüksek Performanslı Betonlar (UYPB)

Ultra yüksek performanslı betonlarda çok yüksek dayanımla birlikte yüksek süneklik özelliği de görülmektedir. Bu tür betonlara örnek olarak Reaktif pudra betonları (RPB) örnek olarak verilebilir. Reaktif pudra betonu, üstün mekanik özelliğe, mükemmel sünekliğe ve çok düşük geçirimsiliğe sahip olan ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozit bir malzemedir (Matte ve Moranville, 1999).

Bu malzemeler ilk kez 1990 yıllarında Paris'te Bouygues laboratuvarındaki araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Yeni bir tür olan reaktif pudra betonları, 200 ile 800 MPa arasında değişen basınç mukavemeti, 25 ile 150 MPa arasında değişen çekme mukavemeti ve 2500 ile 3000 kg/m³ aralığında değişen birim ağırlığa sahiptirler (Richard ve Cheyrezy, 1994).

Reaktif pudra betonlarında kullanılan agregaların boyutları çimento boyutlarıyla aynı seviyededir. Böylece hidrate olmayan çimento tanelerinin agrega görevi görerek dayanıma katılması amaçlanır. Bu tür betonlarda su/çimento oranı 0,15 seviyelerine kadar indirilmektedir. İşlenebilirlik ise hiper akışkanlaştırıcılar sayesinde kazanılmaktadır.

Normal dayanımlı, yüksek dayanımlı ve reaktif pudra betonlarının mekanik özelliklerine ait bir karşılaştırma Çizelge 2.1'de gösterilmiştir. Çelik liflerin eklenmesiyle birlikte eğilme dayanımları 50-140 MPa değerlerine kadar artmıştır. Kırılma enerjileri ise 10000J/m² değerinden 40000J/m² değerine kadar değişmektedir. Eğilme dayanımları ve kırılma enerjilerindeki bu değişim karışımdaki çelik liflerin oranı ile ilgilidir (Richard ve Cheyrezy, 1994).

Çizelge 2.1. Normal dayanımlı beton (NDB), Yüksek dayanımlı beton (YDB) ve Reaktif Pudra betonlarının (RPC) karşılaştırılması (Richard ve Cheyrezy, 1994)

Mekanik Özellikler	NDB	YDB	RPC
Basınç Dayanımı (Mpa)	20-60	60-115	200-800
Eğilme Dayanımı (Mpa)	4-8	6-10	50-140
Kırılma Enerjisi (J/m ²)	100-120	100-130	10000-40000
Elastisite Modülü (Gpa)	20-30	35-40	60-75

3. LİF VE ÇEŞİTLİ KATKILARIN BETON ÜZERİNE ETKİSİ

3.1. Betonda Lif Kullanımı

Lifli beton tanım olarak çimento, agrega ve çoğunlukla rastgele dağılı liflerin su ile karıştırılması sonucu meydana gelen beton olarak tanımlanmaktadır. Lifli betonların inşaat mühendisliğine sağladığı avantajlar bakımından önemi ve kullanımı her geçen gün hızla artmaktadır.

Beton içerisinde yaygın olarak kullanılan lifler; çelik, polipropilen, karbon ve cam lifleridir. Lifli betonlarda sağlanması gereken en önemli özellik, liflerin beton içerisine mümkün olduğunca homojen bir biçimde dağılması ve beton dökümü sırasında homojenliğin bozulmamasıdır. Üniform şekilde dağılmış lifler, beton içerisinde oluşan çatlakların ilerlemesini köprüleme yaparak önlemekte ve betonu daha dayanıklı ve sünek hale getirmektedir.

Lifli betonların uygulama alanları içerisinde; park ve kaldırım sahaları, endüstriyel zeminler, asitlere maruz betonlar, püskürtme betonlar, benzin istasyonları ve bahçe duvarları gibi ve benzeri daha çok alanlardan bahsetmek mümkündür. Lifli betonların avantajları arasında büzülme çatlağı oluşma riskini azaltma, yüzey aşınma direncini artırma, betonda oluşabilecek kılcal çatlakları önleme, su geçirimsizliğini artırma, ufalanma ve pullanmaya bağlı dökülmeleri azaltma, donma ve çözünmeye karşı direnç sağlama, standart betona oranla daha sünek davranış sergileme gibi özellikler söylenebilir.

3.2. Yaygın Olarak Kullanılan Çeşitli Lif Türleri

3.2.1. Cam lifi

Cam lifi içeren beton karışımların mekanik özellikleri; içerdiği lif miktarına, su/çimento oranına, karışımdaki boşluk miktarına, kum içeriğine, lif dağılımına, kullanılan lifin boyuna ve uygulanan kür içeriğine bağlıdır. Cam lifler betonda rötre çatlaklarının azaltılmasında kullanılmaktadır.

Cam liflerin beton karışımı içerisinde 1 kg/m^3 gibi düşük miktarlarda kullanılması durumunda taze betonun içerisinde çatlak oluşumunu engellemekte ve betonun

geçirgenliğini azaltmaktadır. Ayrıca betonun bünyesinden su atma ve ayrışma özelliklerinde iyileşme sağlanmaktadır. Cam lifin beton içerisinde $1-20 \text{ kg/m}^3$ gibi yüksek oranda katılması durumunda ise betonda karıştırma ve pompalama sırasında oluşan hasarlara karşı direnç sağlamaktadır. Ayrıca cam lifinin yüksek oranda kullanılması betonun eğilme dayanımını ve darbelere karşı direncini artırmaktadır. (Yaprak, 2002).

3.2.2. Polipropilen lif

Polipropilen lifler beton içerisinde sıklıkla kullanılmakta olan maliyeti diğer sentetik liflere oranla oldukça ekonomik olan bir lif türüdür. Bu yapı polipropilen liflerin çekilerek gerilmesi ve ardından buruşarak ip haline getirilmesiyle oluşturulur. Çimento ile karıştırılınca lifler açılır, çimento taneleri ağ şeklindeki yapının içerisine girer ve liflerin sıkıca sarıldığı sıkı bir faz oluşturur (Gani,1997).

Gani'ye (1997) göre polipropilen lifler beton karışım içerisinde iki farklı şekilde kullanılmaktadır. Bunlardan birisi çimento içerikli ince plakların üretiminde asbeste alternatif olması yönüyle beton karışımında kullanılmasıdır. Bu durumda polipropilen lif içeriği %5'den büyük olmalıdır. Polipropilen lifin beton içerisinde kullanılmasının diğer nedeni ise çimento ve betonun çatlak yapısının kontrolünde etkin rol almasıdır. Bu amaçla kullanılması durumunda lif içeriği en az %3 oranında olmalıdır.

Polipropilen liflerin temel avantajları arasında alkali direncinin oldukça yüksek olmasıyla birlikte erime noktası ve hammadde fiyatının düşük olmasıdır. Dezavantajları ise gün ışığı ve oksijene karşı reaksiyon aktivitesinin yüksek olması, elastisite modülünün düşük olması ve matrisle oluşturduğu zayıf bağ yapısıdır (Bentur and Mindess, 1990).

3.2.3. Çelik lifler

Çelik lifler şekillerine göre, düz, şekillendirilmiş, dalgalandırılmış, özel uçlu ve düzensiz en kesitli gibi guruplara ayrılırlar. Kesitleri daire, kare veya düzensiz bir şekildedir. Çelik lifli beton, içerisinde belirli aralıklarla dağılmış küçük teller bulunan ince veya ince ve iri agregalar kullanılarak hazırlanan çimento esaslı kompozit malzeme olarak tanımlanmaktadır (Arslan ve Aydın, 1999).

Çelik lifli betonların normal betonlardan ayıran en belirgin özelliği süneklik ve enerji yutma kapasitesindeki üstünlüktür. Betonda ilk çatlak oluşmaya başladıktan sonra çelik teller köprüleme görevi üstlenerek çatlağın ilerlemesi önlerler. Bu sayede beton elemanda çok sayıda küçük çatlaklar oluşur. Bu da elemanın sahip olduğu tokluğu artırmaktadır. Ayrıca çelik tellerin çekme kapasiteleri yüksek olduğundan daha fazla yük taşınmasına da katkı sağlarlar.

Çelik liflerin beton harcına katılmasıyla birlikte betonun çarpma dayanımı, eğilme ve yorulma dayanımı, çatlama ve parçalanma direnci gibi mühendislik özelliklerinin çoğunda fark edilir bir iyileşme gözlenmektedir. Ancak çelik lifler, betonun basınç mukavemeti üzerinde oldukça az bir etkiye sahiptirler. Beton karışımı içerisindeki çelik liflerin %1-2 gibi yüksek miktarda olması bile beton basınç dayanımını %25'den fazla artırmamaktadır.

Craig (1984) yaptığı çalışmasında, çelik tellerin beton karışımı içerisinde kullanılması durumunda, betonun eğilme momenti kapasitesinin arttığı, betonun sünmesinin arttığı, betonun çekme mukavemetinin arttığı, çatlakların kontrol altına alınabildiği, betonun rijitliğinin arttığını belirtmiştir.

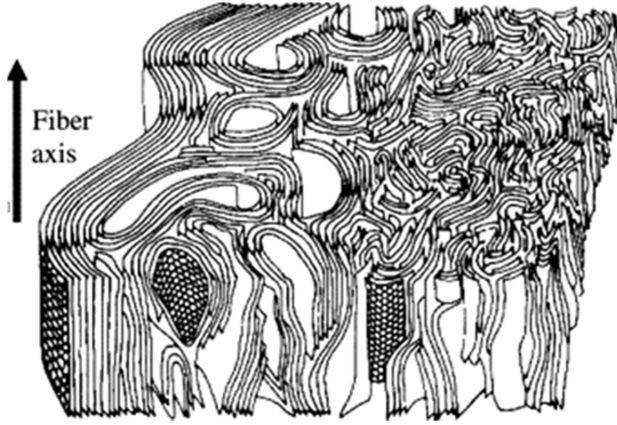
3.3. Yüksek Mukavemete Sahip Karbon Liflerin Betonda Kullanılması

Yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımları oldukça yüksek olmasına rağmen gevrek olması yönüyle düktilitesi çok azdır. Yüksek dayanımlı betonda lif kullanımı betonun iç yapısını izotropik hale getirirken düktilitesini de artırmaktadır. Çelik liflerin zamanla korozyona uğraması, cam liflerin ise yüksek alkali içeren ortamlarda kimyasal yapılarının bozulması yeni bir lif türünün ihtiyacını ortaya çıkarmıştır.

Karbon lifler, performans ve fiyat oranın değişimiyle birlikte günümüzde metal ve diğer kompozit malzemelerin yerine alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. Çok daha hafif olmasına rağmen çok yüksek mukavemet değerlerine sahip olan karbon lifler artık sadece havacılık ve uzay araçlarında değil inşaat ve otomotiv alanlarında da kullanılmaya başlanmıştır.

Karbon lifler karbon atomlarından oluşan, 5-10 µm boyutları arasında değişen çapa sahip uzun ince liflerdir. Karbon atomları lifin uzun doğrultusunda bağlanarak bir mikroskobik

kristal görünümü oluştururlar (Şekil 3.1). Karbon lifler bu kristal bağ doğrultusunda oldukça yüksek bir dayanım kazanırlar. Karbon lifler sahip oldukları çekme dayanımına göre sınıflandırılırlar. Karbon lifler düşük, standart, ortalama, yüksek ve çok yüksek çekme dayanımına sahip olmak üzere 5 sınıfa ayrılabilirler. Bunlardan düşük çekme dayanımına sahip karbon lifler 240 GPa ve altı dayanıma sahipken yüksek dayanımlı karbon lifler 500-1000 GPa arası dayanıma sahiptir. Karbon liflerin yorulma dayanımları ve korozyona karşı dirençleri bilinen metalik yapılar arasında en iyi olanıdır.



Şekil 3.1. Karbon lif içerisindeki grafitin 3boyutlu görünüşü (H.G. Lee, S.S. Kim ve D.G. Lee, 2006)

Karbon liflerin çelik liflere oranla yoğunluğu ve dolayısıyla ağırlığı oldukça azdır. Karbon lifler yoğunluk ve dayanım açısından kıyaslandığında diğer liflere göre en iyi performansı vermektedir (Zheng ve Chung, 1989). Karbon lifler metal liflere oranla daha yüksek özgül dayanım ve dayanıklılığa sahiptirler. Bu nedenle beton yapıların güçlendirilmesi ve rehabilitasyonunda karbon liflerinin kullanımı önem kazanmıştır (Raouf, 1975).

Chen ve Chung'ın (1995) yaptığı bir çalışma sonuçlarına göre, 3 mm'den 12,7 mm'ye kadar değişen uzunluklara sahip karbon liflerin beton içerisinde %0,189 oranında kullanılmasıyla, kimyasal ve silis dumanı içeren normal dayanımlı bir betonun mekanik davranışındaki iyileşmeyi belirtmişlerdir. Bu durumda betonun eğilme dayanımı %85 artmış, eğilme tokluğu %205 artmış, basınç dayanımı %22 artmış ve betonun çökme değeri 152 mm'den 102 mm'ye düşmüştür.

Chung (2000) yaptığı çalışmada kısa olarak kesilmiş karbon liflerin betonun basınç ve eğilme özelliklerini artırdığını belirtmiştir. Ayrıca kısa karbon liflerin betonun kuruma

r tresini, ısı iletkenliğini ve termoelektrik davranışı gibi özelliklerini azaltırken yüksek elektrik iletkenliği ve donatı korozyonuna karşı iyi derecede koruma sağladığını ifade etmiştir.

3.4. Kimyasal Katkıların Beton  zelliklerine Etkisi

Taze ve sertleşmiş haldeki betonların fiziksel ve mekanik performanslarına önemli derecede etki eden kimyasal katkılar, günümüzde beton karışımlar için vazgeçilmez bir hale gelmiştir. Kullanım amacı oldukça geniş olan katkı maddelerinin beton üzerine etkileri yakın zamandaki çalışmalarda daha açık hale gelmiştir. Günümüzde yüksek dayanımlı beton üretiminde,  imento ve mineral katkılardaki gelişmelerle birlikte kimyasal katkıların kullanımında etkisi olduğu bilinen bir gerçektir.

Kimyasal katkılar, hedeflenen betonun elde edilebilmesi amacıyla tek başlarına veya farklı katkılarla birlikte beton karışımına eklenebilir veya betona uygulanabilirler. Betondan istenilen performansın elde edilebilmesi kimyasal katkıların beton veya harç ile uyumlu olmasına bağlıdır. Dolayısıyla kimyasallar beton veya karışımda kullanılmadan önce uyumun sağlandığı yapılacak olan laboratuvar deneyleriyle kanıtlanmalıdır.

Kimyasal katkı malzemeleri hava sürükleyici, priz hızlandırıcı, su azaltıcı, priz geciktirici, akışkanlaştırıcı, soğuk hava beton katkıları, rötre azaltıcı, korozyon önleyici,geçirimsizlik azaltıcı ve diğer katkı malzemeleri olarak sınıflandırılabilirler. Bunlar arasında en yaygın kullanıma sahip olan katkı maddesi akışkanlaştırıcılardır. Akışkanlaştırıcı katkılarla taze betonun işlenebilirliği ayarlanırken, sertleşmiş betonun mekanik özellikleri de bu katkıdan etkilenebilmektedir.

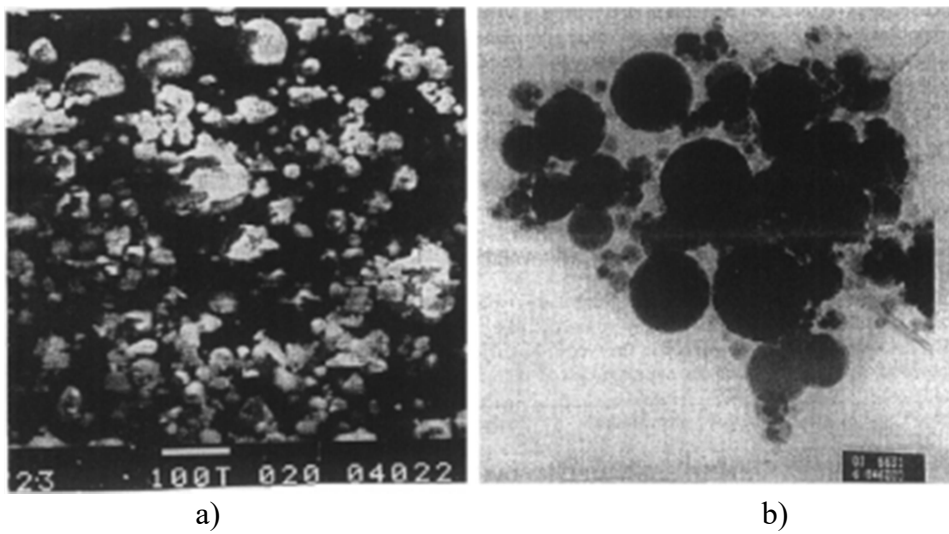
Yüksek dayanımlı betonların üretimindeki en etkili parametrelerden birisi de düşük su/ imento oranıdır. Ancak bu oranın azalması ölçüsünde taze betonun kıvamı artmakta ve işlenebilirliği azalmaktadır. Akışkanlaştırıcı katkılar sayesinde çok düşük su/ imento oranında bile yüksek işlenebilirlik sağlanmaktadır. Ayrıca kimyasal katkılar  imento ve silis dumanı gibi ince daneli malzemelerin beton içerisinde topaklanmadan dağılmasını sağlamaktadır.

Akışkanlaştırıcı katkı maddeleri ilk defa 1930’larda lignosülfonat esaslı olarak üretilmeye başlanmıştır. 1960’lı yıllara gelindiğinde ise sülfonatlı naftalin polimer esaslı süper akışkanlaştırıcı katkıları ortaya çıkmıştır. 1990 yılına gelindiğinde ise önce vinil kopolimer ve daha sonra modifiye polikarboksilatların ortaya çıkmasıyla katkı teknolojisinde yeni gelişmeler yaşanmıştır (Topçu, Canbaz ve Karakurt, 2006).

Melamin ve sülfonatlı naftalin esaslı süper akışkanlaştırıcılar, çimento tanelerinin etrafını sararak, tanecikleri negatif yükle yüklerler. Aynı yükle yüklenmiş olan çimento tanecikleri birbirlerine itme kuvveti uygulayarak ayrışır. Ancak yeni nesil hiper akışkanlaştırıcı katkılar bu negatif itme etkisinin yanında akışkanlaştırıcı moleküllerin özel yapısı sayesinde çimento taneleri arasındaki bağ belirli bir mesafeden fazla uzamaz. Bu özelliğe sterik etki denmektedir (Özyurt, 2000).

3.5. Silis Dumanının Betonun Özelliklerine Etkisi

Silis dumanı silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında, yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ile indirgenmesi sonucu oluşan çok ince taneli puzolanik aktivite gösteren bir malzemedir. Tanelerinin büyük çoğunluğu 0,1-0,2 μm arasında değişen çaplara sahiptir. Silis dumanı çoğunlukla camsı ve küresel daneli bir yapıya sahiptir (Resim 3.1).



Resim 3.1. Silis dumanının a) tarayan ve b) geçirgen ışıklı elektron mikroskoplarıyla çekilmiş resimleri (Yeğinobalı, 2009)

Çimento boyutlarıyla kıyaslandığında, silis dumanının yaklaşık 100 kat daha küçük olduğu görülmektedir. Çok ince taneli yapısından dolayı, inceliği çimentoda olduğu gibi Blain incelik testiyle ölçülememektedir. Bu gibi ince yapı malzemeler için geliştirilen Azot Adsorpsiyon (BET) metodu, özgül yüzey ölçümleri için kullanılmaktadır. Bu yöntem taneler arasından hava geçiş hızını ölçen Blain testinden farklı olduğundan, sonuçların doğrudan karşılaştırılması doğru bir yaklaşım değildir. Ancak aşağıdaki değerler boyutların karşılaştırılması ve silis dumanının inceliği hakkında bir ön fikir oluşturmaktadır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1. Farklı malzemelerin inceliklerinin karşılaştırılması (ACI Comitte 234, 1996)

Malzeme	Metod	Özgül Yüzey (m ² /kg)
Portland Çimentosu	Blaine	300-400
Uçucu Kül	Blaine	400-700
Granüle Yüksek Fırın Cürufu	Blaine	350-600
Silis Dumanı	BET	13000-20000

Silis dumanının özgül ağırlığı 2,2-2,3 arasında değişmekte iken, çimentonun özgül ağırlığı ise 3,1 civarındadır. Silis dumanının özgül ağırlığı çimento ve agregaya kıyasla daha düşük olduğundan, beton içerisinde kullanılması durumunda betonun birim ağırlığında azalma söz konusu olabilmektedir. Ayrıca silis dumanı içeren taze ve sertleşmiş betonlar daha koyu renge sahiplerdir.

Silis dumanı sahip olduğu çok ince yapısı ve yüksek miktarda silis içeriğinden dolayı pozolanik aktivitesi çok iyi düzeydedir. Çimento içeriğinde bulunana dikalsiyum silikat (C₂S) ve Trikalsiyum silikat (C₃S) bileşenlerinin hidrate olması sonucu açığa kalsiyum silikat hidrat (CSH) ve kalsiyum hidroksit (Ca(OH₂)) bileşikler çıkarılmaktadır. Beton karışımı içerisine katılan silis dumanı Ca(OH₂) ile reaksiyona girerek yeni bir CSH bileşiği oluşturmaktadır. Ancak silis dumanının oluşturduğu bu yeni bağlayıcı CSH jelleri normallerinden biraz farklıdır. Çimento tanesinden daha küçük silis dumanı taneleri, uygun akışkanlaştırıcı kullanımıyla çimento taneleri arasını doldurarak daha yoğun bir beton elde edilmesini sağlamaktadırlar (Yeğınobalı, 2009).

Silis dumanının beton harcında kullanılması durumunda taze betondaki terlemeyi ve ayrışmayı azalttığı, hidratasyon ısını düşürdüğü, sertleşmiş betonun basınç dayanımını artırdığı, su geçirimsliğini azalttığı, alkali silika reaksiyonunu azalttığı, sülfata karşı

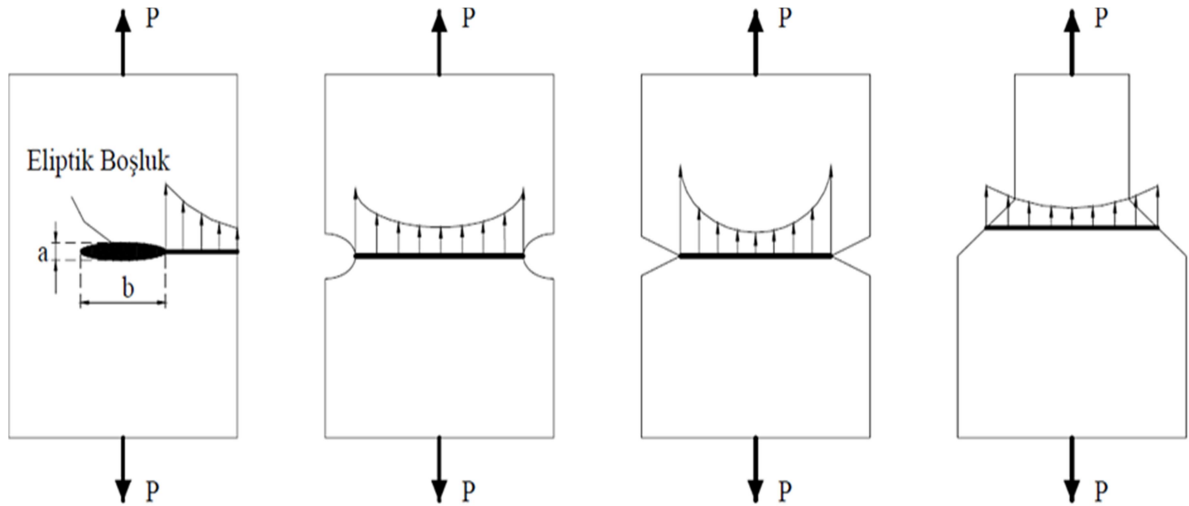
dayanıklılığı arttığı ifade edilmektedir. Ancak bu olumlu etkilerin yanında silis dumanı kullanımının betonun karışım suyu ihtiyacını artırması, beton yüzeyinin düzeltilmesinin zorluğu, plastik rötre çatlağına yol açma ve daha koyu renkli beton üretilmesi gibi olumsuz sayılabilecek etkileri vardır (Erdoğan, 2003).

4. KIRILMA MEKANİĞİ

4.1. Giriş

Sanayi devrimiyle birlikte demir ve çeliğin yapı sektörüne girmesiyle çok yüksek betonarme ve çelik yapılar, büyük gemiler ve deniz altılar inşa edilmiş ve mühendisliğin önemi daha belirgin hale gelmiştir. Ancak İkinci Dünya Savaşı sırasında bazı gemilerin daha kullanılmadan savaş dışı kalması ve füzelerin hedefe ulaşmadan patlamaları gibi olaylar, malzemelerin içyapısının daha çok araştırılması gereksinimini ortaya çıkarmıştır.

Üzerine yük uygulanan elemanlarda, elastik bölgenin geçilmesi durumunda malzemede yapısal kusurlar oluşmaya başlamaktadır. Ayrıca malzeme üretim sırasında da bünyesinde boşluk ve çatlak gibi kusurlara maruz kalabilmektedir. Bu gibi durumlarda kesit boyunca gerilmenin doğrusal olarak olmasından bahsedilemez. Kesit üzerinde doğrusal gerilmeden (P/A) farklı olarak maksimum ve minimum gerilmeler oluşmaktadır. Gerilme yığılması veya çentik etkisi olarak isimlendirilen bu durum Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Çekme etkisine maruz çentikli levhada gerilme dağılımı (Yayla, 2007)

Malzemelerin içyapısında bulunan malzeme kusurları, boşluk ve çatlaklar gibi gerilme yığılması oluşturan problemleri ve buna bağlı olarak yapıda gerçekleşen hasarları incelemek için Kırılma Mekaniği yaklaşımı bir bilim dalı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sorun gevrek hem cam gibi gevrek malzemeler hem de beton gibi kompozit ve yarı gevrek malzemeler içinde geçerlidir.

Betonun kırılma mekaniği uzun açıklıklı köprüler, nükleer santraller, barajlar, savunma amaçlı binalar gibi yüksek maliyet gerektiren yapılar için büyük önem taşımaktadır. Temelleri 1920 yıllarında atılan kırılma mekaniği yaklaşımı betona ancak 1960 yıllarına uygulanabilmiştir. Kırılma mekaniğinin betona uygulanması Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) yaklaşımı ile yapılmış, ancak betonun yarı gevrek bir malzeme olduğu ve kırılma parametrelerinin bu yöntemle elde edilemeyeceği anlaşılmıştır. Bu nedenle yarı gevrek malzemeler için Lineer Olmayan Kırılma Mekaniği yaklaşımı geliştirilmiştir.

Betonun ve betonarme yapıların kırılma mekaniği yaklaşımıyla tasarımının yapılabilmesi için, yapıyı oluşturan betonun ve çeliğin özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Heterojen bir malzeme olan betonun dayanım ve kırılma parametreleri ne kadar iyi bilinirse, yapılarda oluşacak hasarların tespiti de o düzeyde gerçekçi olacaktır.

4.2. Kırılma Mekaniğinin Tarihsel Süreci

Leonardo da Vinci 1500 yıllarında kırılma olayını ilk olarak inceleyen bilim adamıdır. İpin uzunluğu ile dayanımı arasındaki ters ilişkiyi fark etmiştir. Bu yönüyle malzemenin boyut etkisini de ilk çalışan insan olmuştur (Veubeke, 1974). Yaklaşık üç asır sonra Coulomb, basınç etkisi altında taşlarda oluşan çatlak ilerlemeleri üzerine çalışmalar yapmıştır.

Eliptik bir boşluğa sahip sonsuz levha üzerinde, elastik teoriye göre yapılan bir çalışmada levha üzerindeki gerilme durumunu incelenmiştir (Inglis, 1913). Inglis eliptik boşluğa sahip levhada, boşluk ucunda oluşan gerilmeyi, hem gevrek hem de sünek malzemeler için aşağıdaki gibi ifade etmiştir.

$$\sigma_m = K_t \cdot \sigma \quad (4.1)$$

$$K_t = 1 + 2 \cdot \left(\frac{a}{b}\right) \quad (4.2)$$

Yukarıdaki eşitliklerde a ve b boşluk boyutlarını, σ_m boşluk ucundaki maksimum gerilmeyi, σ sonsuz levhaya uygulanan gerilmeyi ve K_t ise gerilme yığılma faktörünü ifade etmektedir.

İnglis yaptığı çalışmalarla kırılma mekaniğine öncülük etmiştir. Griffith İngiliz'in çalışmalarını ilerletmiş ve Lineer Kırılma Mekaniği (LEKM) temelleri, ilk olarak 1920 yıllarında yapılan bir çalışmayla ortaya konmuştur. Cam gibi gevrek bir malzeme üzerinde gerçekleştirilen bu çalışmada, malzemenin hesaplanan teorik mukavemetinin elastisite modülünün yaklaşık %10'u olduğu tespit edilmiştir. Griffith yaptığı çalışmadan çıkan bu farkın malzemenin iç kusurlarından kaynakladığını öne sürmüştür (Griffith, 1920).

Griffith'in yaklaşımı Zener ve Hollomon tarafından metalik malzemelerin kırılmasına uygulanmıştır (Zener and Holloman, 1944). 1957 yılına gelindiğinde, Irwin seramik levhalar üzerinde yaptığı bir çalışmasında basınç dayanımının elastisite modülüne oranının 1/10 olmadığını fark etmiştir ve bunun metal malzemeleri de kapsayacağını ifade etmiştir. Çatlak ucu civarındaki gerilmelerin hesaplanmasında, gerilme şiddet faktörü “ K ” parametresini geliştirmiştir. Gerilme şiddet faktörü çatlağın boyut, şekil ve geometrisinin bir fonksiyonudur (Irwin, 1957).

Barenblatt lineer elastik teori kullanarak, çatlak ucu bölgesinde bulunan kohezif kuvvetlerin etkisi dikkate alan ilk araştırmacıdır. Barnblatt'ın teorisi yüzey yer değiştirmelerini dikkate alan kuvvet-yer değiştirme temeline dayanmaktadır. Çatlak yüzeyleri arasındaki sürtünmeyi dikkate alınmazken, yapılan çalışmada kohozif kuvvetlerin dağılımı da gösterilmemiştir (Brarenblatt, 1959). 1960 yılında Dugdale, bu kohezif kuvvetleri bilinen bir sabit olarak kabul etmiştir. Sonraki çalışmalarda bu fikir, geliştirilen standart sonlu elemanlar uygulamalarına da yansımıştır (Dugdale, 1960).

1960'lı yıllar beton ve betonarme yapılar üzerine kırılma mekaniği temelli çalışmaların yapıldığı ilk yıllardır. Kaplan 1961 yılında, betonun lineer elastik sınırları içerisinde, Griffith'in çalışmalarını betona ilk defa uygulayan araştırmacıdır (Kaplan, 1961).

Rice, Gerilme Yoğunluk Faktörü'nün (SIF) diğer adıyla gerilme şiddet faktörünün, çatlak davranışını belirlemede çok önemli bir yeri ve önemi olduğunun farkına varmıştır. Bu yüzden lineer olmayan elastik malzemelerin gerilme şiddet faktörünün hesabı için 1968 yılında J integrali yaklaşımını geliştirmiştir (Rice, 1968). J integral metodu, enerjinin korunumu prensibi ile çalışmakta ve çatlak ilerlemesine bağlı olarak potansiyel enerjideki değişimin belirlemektedir.

Hillerborg (1976), daha sonra fiktif çatlak modeli olarak isimlendirilen bir kırılma mekaniği yaklaşımı geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımda beton davranışı çekme dayanımına kadar gerilme-şekil değiştirme (σ - ϵ) ilişkisi ile modellenmektedir. Beton çekme dayanımına ulaştığında fiktif çatlaklar oluşmaya başlar ve beton davranışı gerilme-çatlak açılması ilişkisi ile kontrol edilmektedir.

Carpinteri çatlaklı numuneler üzerinde yaptığı 3 noktalı eğilme deneyleriyle, betona ait boyutsuz bir gevreklik numarası tanımlamıştır (Carpinteri, 1982).

$$S_E = \frac{G_f}{f_t \cdot b} \quad (4.3)$$

Yukarıdaki eşitlikte, b çatlak ucu ve kirişin üst lifi arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. Çatlak ucunda bulunan kırılma işlem bölgesi, b mesafesinden küçükse kırılma gevrek olur ve lineer elastik kırılma mekaniği prensipleri uygulanır. İşlem bölgesinin b mesafesinden büyük olması durumlarında ise kırılma yarı gevrek olacaktır.

Bazant, maksimum yükte çatlak ilerlemesi sonucu serbest kalan enerji ile beton tarafından absorbe edilen enerji arasındaki ilişkiyi boyut analizi yardımıyla kurarak boyut etkisi teorisini geliştirmiştir (Bazant, 1984). Boyut etkisi teorisi, malzemenin kırılma özelliklerini belirleyen çatlak boyu ve çatlak alanı gibi iki parametreye bağlıdır.

4.3. Griffith Teorisi

Griffith, gevrek malzemenin ve çatlak bulundurması durumunda kırılmasına sebep olan gerilmeyi belirleyen ilk bağıntıyı aşağıdaki şekilde ifade etmiştir.

$$\sigma_f^2 = \frac{2 \cdot \gamma \cdot E}{\pi \cdot a} \quad (4.4)$$

İfade 4.3'de γ yüzey enerjisini, E elastisite modülünü, a çatlak boyunun yarısı ve σ ise levhaya uygulanan gerilmeyi ifade etmektedir. Griffith yaptığı çalışma malzemenin gerilmesini enerji yöntemiyle hesaplamaya çalışmıştır. Eşitliğe göre kırılmaya neden olan gerilme miktarı, mevcut çatlağın boyutu ile ters orantılıdır.

Griffith eşitliğinde yüzey enerjisi ifadesi yerine, sıklıkla kırılma işini gösteren bir ifade kullanılmaktadır. Çatlak ilerlemesi sırasında deformasyon enerjisinin, ara yüzey enerjisine dönüşümü esas alınmıştır. Bundan dolayı “ G ” ifadesi çatlağın birim yüzeyde ilerlemesi için gereken enerji miktarı anlamına da gelmektedir. Kritik değer olan G_C değerinde kırılma meydana gelmektedir.

$$\sigma_C = 2 \cdot \gamma \quad (4.5)$$

İfade 4.4'ün ifade 4.3'de kullanılmasıyla gerilme eşitliği yeni şeklini almıştır.

$$\sigma_f^2 = \frac{E \cdot G_C}{\pi \cdot a} \quad (4.6)$$

4.4. Irwin Teorisi

Irwin ve ekibi malzeme kırılmasını, çatlak ucundaki gerilme durumunu dikkate alarak analiz etmişlerdir. Çatlak ucu gerilmelerinin hesaplanmasından gerilme şiddet faktörünü geliştirmişlerdir.

$$\sigma_f \cdot \sqrt{\pi \cdot a} = \sqrt{E \cdot G_C} \quad (4.7)$$

Griffith denklemi Eş. 4.6'da olduğu şekilde yazıldığında, $\sigma_f \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$ 'nın değerinin $\sqrt{E \cdot G_C}$ 'ye ulaştığında çatlağın ilerleyeceği anlaşılmaktadır. $\sigma_f \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$ ifadesinin çatlak ilerlemesi, için gerekli kuvvet ölçüsü olduğu düşünülerek, bu terim Gerilme Şiddet Faktörü olarak isimlendirilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

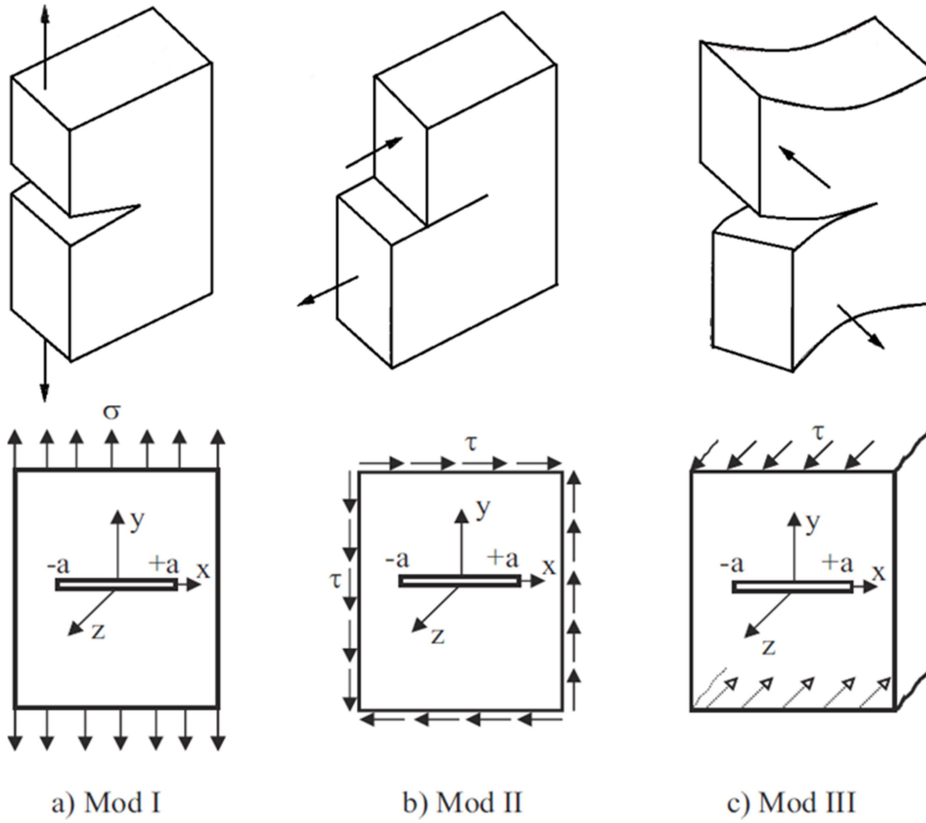
$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (4.8)$$

Gerilme şiddet faktörü K 'nın kritik bir değeri olan “ K_C “ değerinde elemanda kırılma olur. Kritik gerilme tokluğu olarak da isimlendirilen K_C 'nin birimi $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 'dir. Gerilme şiddet faktörü, malzemenin ve çatlağın geometrisiyle ilgili bir ifadedir. Ancak kırılma tokluğu, malzeme özelliğiyle ilgili bir parametredir.

Irwin, sırasıyla çekme, kesme ve burulma durumlarına karşılık gelen mod I, mod II ve mod III yükleme durumlarını (Şekil 4.2), bunlara karşılık gelen gerilme şiddet faktörünü aşağıdaki eşitliklerde ifade etmiştir.

$$\begin{aligned} K_I &= \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \\ K_{II} &= \tau \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \\ K_{III} &= \tau \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Bu eşitliklerde σ malzemeye uygulanan çekme gerilmesi ve τ kayma gerilmesini ifade etmektedir. Griffith teorisi mod I durumuna karşılık gelmektedir.



Şekil 4.2. Kırılma modları ve onlara karşılık gelen gerilme durumları

4.5. Numune Boyutlarının Kırılma Tokluğuna Etkisi

Gerilme şiddet faktörü K geometriye ve yükleme şekline bağlı olduğundan, anı geometriye sahip farklı cins malzemelerden aynı yükleme altında elde edilen K değerleri de aynı olacaktır. Bundan dolayı K bir malzeme sabiti değildir. Ancak kırılma tokluğu K_C , her

malzeme için farklı bir anlam ifade etmektedir. Açılma modu (mod I) için kırılma tokluğu, nominal dayanım $\sigma_N = P/(b.d)$ ve numune boyutlarına bağlı geometrik faktör $f(a/d)$ olmak üzere, aşağıdaki eşitliklerde ifade edilmiştir.

$$K_{IC} = \sigma_N \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot f\left(\frac{a}{d}\right) \quad (4.10)$$

Açılma deformasyon durumunda malzemede iki farklı durum oluşmaktadır. Bunlar düzlem gerilme durumu ve düzlem şekil değiştirme durumlarıdır. Çatlak içeren numuneler, yük altında gerilmeye maruz bırakıldıklarında çatlak nedeniyle üç eksenli gerilmeler oluşur. Düzlem gerilme durumunda numune kalınlığı diğer iki boyuta göre oldukça küçük olduğundan, kalınlık yönünde gerilme oluşmaz. Bu durumda numunede iki eksenli gerilme oluşur ve düzlem gerilme olarak isimlendirilir. Kalın numunelerde ise durum biraz farklıdır. Kalınlık boyunca gerilme oluşmasına rağmen, bu yönde ilerlendiğinde numune içerisindeki malzeme kendini çevreleyen diğer malzemeler tarafından tutulu olduğundan şekil değiştirme yapmaz ve iki boyutta şekil değiştirmeye sahip olur. Bundan dolayı bu tür numuneler düzlem şekil değiştirme durumunu belirtir.

Kırılma tokluğu numunenin boyutlarına bağlı olarak değişmektedir. K_C , elemanın kalınlığı arttıkça belirli bir değere kadar azalmakta ve sonra düzlem gerilme durumundan düzlem şekil değiştirme durumuna geçerek, kalınlıktan bağımsız sabit bir değer almaktadır. Kırılma tokluğunun hesabının doğru bir şekilde hesabı için, açılma modu durumunda malzeme kalınlığının aşağıdaki eşitlikte verilen sayısal değeri sağlaması gerekmektedir.

$$\text{Numune kalınlığı} \geq 2,5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_a}\right)^2 \quad (4.11)$$

4.6. Çatlak Ucu Plastik Bölgesi

Kırılma tokluğu deneyi malzemenin çatlama direncinin bir ölçümü anlamına gelirken, plastik deformasyona uğramış malzemenin çatlama direncini ifade etmemektedir. Ancak Irwin'e göre yeni çatlak oluşumu için gerekli enerji, genellikle plastik deformasyon sırasında yapılan işin yanında bir önem ifade etmemektedir. Diğer bir ifadeyle, çatlak oluşumu ve yayılma hızı Irwin için daha önemli olduğundan, çatlak yayılma hızı “ G_C ” kavramını geliştirmiş ve kırılma tokluğu ile arasındaki bağı aşağıdaki eşitlikte açıklamıştır.

$$G_C = \frac{K_C^2}{E} \quad (4.12)$$

Yükleme sırasında, gerilmeye maruz kalan elemanlarda çatlak ucunda plastik deformasyona uğramış bir bölge bulunmaktadır. Kırılma tokluğu hesabında bir diğer önemli faktör de bu plastik bilgenin “ r_p ” uzunluğudur.

Irwin, çatlağın ucunda plastik bölgede gerilme dağılımının değerinin sabit ve malzemenin akma dayanımına eşit olduğu kabulünü yaparak aşağıdaki formülü geliştirmiştir. Malzemenin akma mukavemetinin azalması durumunda plastik deformasyon daha kolay gerçekleşeceğinden, plastik bölgenin boyu büyür. Plastik deformasyon bölgesinin küçülmesi durumunda ise, malzemenin gevrekliği artarak deformasyon özelliği azalır ve daha ziyade çatlama özelliği gösterir. Gevrek malzemelerin kırılma tokluğu da bu yüzden daha az olmaktadır.

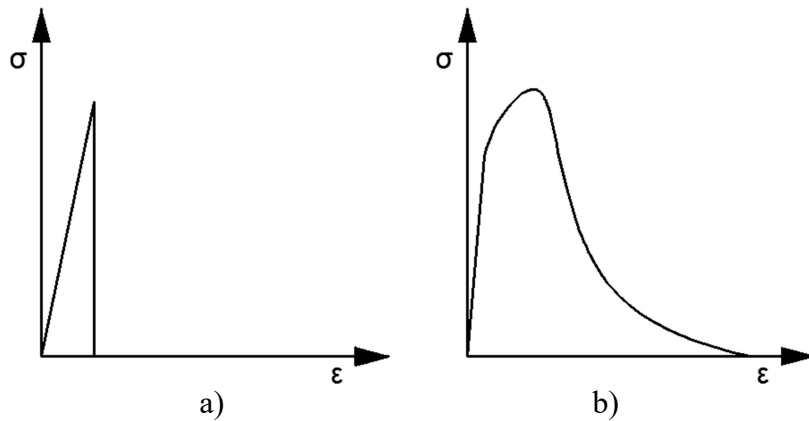
$$r_p = \frac{1}{\pi} \frac{K_{IC}^2}{f_t^2} = \frac{1}{\pi} \frac{E \cdot G_C}{f_t^2} \quad (4.13)$$

5. BETONUN KIRILMA MEKANİĞİ

5.1. Giriş

Beton içyapısında başlangıçtan itibaren ve sonradan oluşan kusurlar bulundurmaktadır. Bunlar hava boşlukları, beton karışımından önce çatlamış agregalar, agrega ve matris arasındaki bağın zayıf olması gibi kusurlar olabilmektedir. Çatlak ve kusur kelimeleri benzer anlamlar taşısalar da aralarında ince bir ayrıntı vardır. Beton içerisinde bulunan önceden veya sonradan oluşmuş bütün çatlaklar kusur olarak nitelendirilebilirken, bütün kusurların çatlak olarak ifade edilmesi doğru değildir. Malzeme çekme dayanımına ulaştığı zaman çatlak oluşumu başlar. Heterojen malzemelerde çatlaklar genellikle maksimum gerilmeye dik ve malzeme içerisindeki en kolay yolu takip ederek ilerlerler.

Gevrek malzemeler için gerilme birim şekil değiştirme eğrisi maksimum gerilme seviyesine kadar lineer elastik olarak ilerler. Maksimum gerilme noktasında önemli derecede yapısal kusurlar oluşur ve yapıyı göçmeye kadar götürür. Beton gibi yarı gevrek malzemelerde ise maksimum gerilme düzeyinden önce lineerlik dikkate değer ölçüde bozulur. Lineerliğin bozulduğu bu akma noktasıyla maksimum tepe noktası arasındaki davranış tam olarak bilinmemekle beraber, yapısal kusurların bu arada oluşmaya başladığı bilinmektedir. Deformasyon kontrollü yükleme yapılarak malzemenin maksimum gerilmeden sonraki yumuşama kısmı elde edilebilir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. a) gevrek ve b) yarı gevrek malzemelerin gerilme uzama grafikleri

Kırılma işlem bölgesi malzeme de oluşan yumuşama yırtılmasının olduğu bölgedir ve betonun kırılma davranışı, kırılma işlem bölgesinden büyük oranda etkilenmektedir.

5.2. Kırılma Mekanizmasının Betona Uygulanması

Griffith tarafından geliştirilen kırılma mekanizması yaklaşımı betona ancak 40 yıl sonra uygulanabilmiştir. Beton boyutlarının dayanıma etkisinin, beton içerisindeki çatlakların rastgele dağılımıyla ilişkili olduğu ortaya çıktıktan sonra, kırılma mekanizmasının betona uygulaması 1961 yılında Kaplan tarafından yapılmıştır. Kaplan, kritik deformasyon enerjisi yayılma hızının betona uygulanabileceğini belirtmiş ve bu alanda öncülük etmiştir.

Griffith teorisinin betona uygulanması çalışmaları Glucklich tarafından ayrıntılı şekilde iletirilmiştir (Glucklich, 1969, 1971). Glucklich, kritik deformasyon enerjisi yayılım hızının (G_c), betonun yüzey enerjisinin iki katından daha fazla olacağını belirtmiştir. Betonun tek bir çatlakla göçme durumuna gelmediği, bunu yerine çatlak ucunda mikro boyutta çatlak bölgesinin olduğunu ve bunların daha fazla kırılma enerjisi gerektireceğini belirtmiştir. Glucklich, Beton içerisinde bulunan ve yüksek dayanıma sahip olan agregalar, çatlağı daha sert bir bölgeden geçmeye veya agreganın etrafından dolaşmaya zorladığını, böylece gerekli kırılma enerjisinin arttığını ifade etmiştir.

Daha sonra yapılan çalışmalar, kritik enerji yayılma hızı ve gerilme yoğunluk faktörü üzerine yoğunlaşmıştır. Yapılan çalışmalar, K_c 'nin karışımdaki agrega oranı, kaba agrega boyutu ve agreganın pürüzlülüğü gibi faktörlerin artmasıyla artarken, su/çimento oranının artması ve beton içerisindeki hava boşluğu miktarının artmasıyla azaldığını ortaya koymuştur. Ayrıca kırılma tokluğunun yükleme hızıyla orantılı olarak bir miktar arttığı da söylenebilir. Çelik donatıların veya çelik, cam, asbest, karbon lif gibi malzemelerin de betona karıştırılmasıyla kırılma tokluğu parametresi artırılmaktadır.

Kritik çatlak uzunluğuna ulaşmayan çatlaklar üzerinde, çatlak açılması hızı ve kırılma tokluğu arasındaki ilişkiyi incelemek üzere, çimento, beton ve lifli betonlar üzerinde yoğun çalışmalar yapılmıştır. Ancak, elde edilen verilerin analizinden ortak bir sonuca varılamamıştır.

Diğer grup araştırmacılar ise, eleman boyutunun ve geometrisinin betonun kırılma parametreleri üzerindeki etkilerini araştırmak için deneyler yapmışlardır. Ancak farklı araştırmacılar tarafından elde edilen bulgular, birbirleriyle çelişki bir durum oluşturmuştur. Bu durum, kırılma tokluğunu belirleme çalışmalarındaki yöntem farklılıklarından

kaynaklanmaktaydı. Bu da araştırmacıları, lineer elastik kırılma mekaniğinin beton türü malzemelere uygulanamayacağı fikrine yönlendirmiştir.

Lineer kırılma mekaniğinin betona uygulanamayacağı anlaşıldıktan sonra, bazı araştırmacılar tarafında lineer olmayan kırılma mekaniği yöntemleri önerilmiştir. Bunlar J integrali (Rice, 1968), R eğrisi analizi ve kritik çatlak ucu deplasman yöntemleridir. Bunlara ek olarak, çatlak ucunda sayıca çok mikro çatlakların oluşturduğu difüzyon bölgesini ifade eden, boyutu maksimum agrega boyutuna bağlı olan, yayılı çatlak modeli önerilmiştir. Daha sonra ise fiktif çatlak modeli geliştirilmiş (Hillerborg, 1976). Bu modelde, çatlağın çok fazla açılmadığı durumlarda, çatlak yüzlerine gerilme etkisi göz önünde bulundurulmuştur. Fiktif çatlak modelinden sonra, iki parametrelili model (Jeng and Shah, 1985) ve boyut etkisi modeli (Bazant and Kazemi, 1990), betonun kırılma mekaniği parametrelerini belirlemek için kullanılmıştır. Tüm bu yöntemler içerisinde, araştırmacılar arasında betonun davranışını en iyi sergileyen bir model üzerinde fikir birliği yoktur.

5.3. Kırılma Parametrelerini Belirlemeye Yönelik Çalışmalar

Kaplan LEKM modelini 1961 yılında betona uygulamıştır. 3x3x16 inç ve 6x6x20 inç boyutlarında değişken çentik boylarına sahip beton elemanlarda 3 ve 4 noktalı eğilme deneyleri yapmıştır. Kaplan yaptığı denetlerde G_C 'nin farklı çentik boylarında birbirine yakın değerlere sahip olduğu, üç noktalı eğilme testinde %15 daha büyük değere sahip olduğunu ve betonun yüzey enerjisinden yaklaşık 12 kat daha büyük olduğunu ortaya koymuştur (Kaplan, 1961).

Naus ve Lott betonun kırılma direncini belirlemek için harç, çimento hamuru ve betondan üretilmiş, aynı çentik boyuna sahip 2x2x12 inç ve 4x4x12 inç boyutlarındaki kirişlerle 4 noktalı eğilme deneyleri yapmışlardır. Yapılan deneylerden K_C 'nin zamanla arttığı, kaba kum/çimento oranıyla arttığını ve su/çimento oranının artmasıyla azaldığını ortaya koymuşlardır (Naus ve Lott, 1969).

Carpinteri (1981), yaptığı çalışmasında Buckingham-Pi teoremini kullanarak betonda ve harçta K_{IC} , G_{IC} ve J_{IC} gibi kırılma parametrelerini belirlemiştir. Carpinteri deneysel çalışmasında çentik boyutlarını değişken almış ve analitik olarak çalışmasını

desteklemiştir. Yaptığı çalışma sonucunda karakteristik çentik boyunun 0,25-0,30 arasında olduğunda K_{IC} 'nin önce arttığı sonra ise sabit kaldığını gözlemlemiştir.

Mindess, Lawrence ve Kesler (1977) yaptıkları çalışmalarında, 3x3x14 inç boyutlarında çentikli kırıslara dört noktalı eğilme deneyi uyguladılar. Harç, normal beton ve 8 farklı cam ve çelik lifli beton numuneler üzerinde K_C , G_C ve J_C gibi kırılma parametrelerini belirlediler. Lif içeriğinin hacimce %0,75 değerinden az olduğu durumlarda, cam ve çelik liflerin kırılma davranışına etkisinin çok az olduğunu, beton için J_C 'nin K_C ve G_C 'ye kıyasla daha iyi bir yaklaşım olduğunu ifade etmişlerdir.

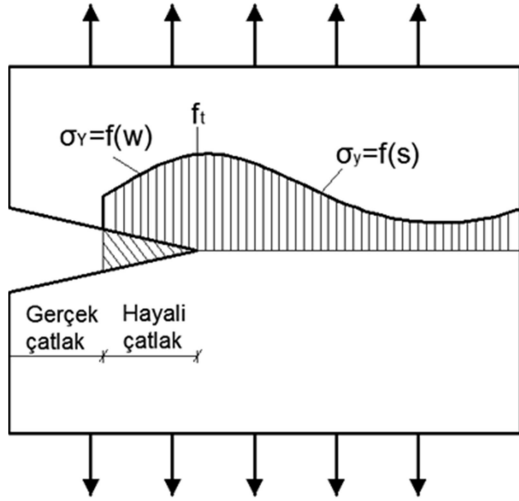
Betonun kırılma parametrelerini belirleme çalışmaları daha çok açılma modu (Mod I) durumu için yapılan çalışmalardır. Bu çalışmalara ilave olarak, Bar ve Bear yaptığı deneylerde beton numuneleri eksantrik basınca maruz bırakmışlar ve K_C değerinin çentik boyu ile ters orantılı olduğunu ifade etmişlerdir (Barr ve Bear, 1977). Mindess ve arkadaşları çimento hamurundan üretilen numuneler üzerinde burulma deneyleri yaparak K_C değerini belirlemişlerdir (Mindess, Nadeau ve Hay, 1974).

5.4. Betonun Kırılma Mekanizması ile İlgili Modeller

5.4.1. Fiktif çatlak modeli

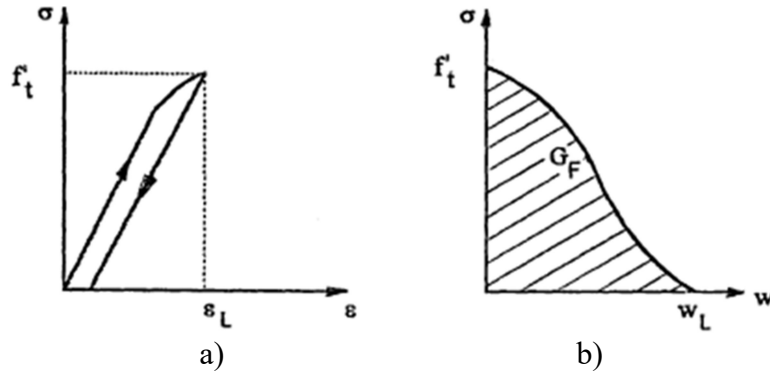
İlk defa 1976 yılında Hillerborg tarafından önerilen bu modelde, çatlak ucundaki kırılma süreci bölgesi gerilme aktarabilen bir çatlak olarak düşünülür. Çentikli numuneler üzerinde üç noktalı eğilme deneyleri uygulanarak yük deformasyon eğrisi elde edilir. Bu eğriden plastik deformasyonlar çıkarıldığında eğrinin altında kalan alan kırılma enerjisini vermektedir. Mod I durumuna uyan çentikli numunelerde oluşan gerilme değişimi Şekil 5.2'de verilmiştir.

Eleman üzerindeki yük artarken hayali çatlağın genişliği de artacak ve açılma limit değere ulaştığında gerilme çatlak ucunda sıfır değerine düşecektir. Böylece fiktif çatlak gerçek bir çatlağa dönüşmüş olur.



Şekil 5.2. Hillerborg tarafından önerilen fiktif çatlak modeli

Çekme gerilmesine maruz kalan elemanda çatlak ucundaki birim deformasyon, limit değerine ulaştığında kırılma bölgesi oluşacaktır. Hillerborg gerilmelerin hayali çatlak bölgesinin genişliğine bağlı olarak aktarıldığını kabul etmiş, gerilme ve çatlak ucu açılması diyagramını tanımlamıştır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3. Betonun gerilme-şekil değiştirme ve gerilme-çatlak açılması grafikleri

5.4.2. Boyut etkisi modeli

Bazant, geometrik boyutları birbirine benzeyen numunelerin karakteristik boyları ile nominal dayanımları arasındaki ilişkiyi boyut etkisi olarak tanımlamıştır (Bazant ve Kazemi, 1991). Buradaki nominal dayanım, elemana uygulanan maksimum yükün kesit alanına bölünmesiyle elde edilmektedir. Yapılan çalışmalarda deney elemanının boyutunun artmasıyla birlikte nominal dayanımda azalma olduğu gözlenmiştir. Bunu nedeni olarak,

numune boyutunun artmasıyla birlikte, elemanın içerisinde bulunan kritik kusurların da artması ifade edilmiştir.

Bu nedenle, Bazant tarafından betonun mekanik davranışına daha uygun deterministik yöntemler geliştirilmiştir (Bazant, Kim ve Pfeiffer, 1986). Bu yöntemde tepe yükü ile iki adet kırılma parametresi elde edilmektedir. Bunlardan birisi kritik enerji salıverilme hızı, diğeri ise kırılma süreci bölgesi uzunluğudur. Bu parametrelerin sadece tepe yükü kullanılarak bulunması nedeniyle avantajlı bir yöntemdir. Ancak üç farklı boyuta sahip elemanlar üzerinde deney yapılması gerekmektedir.

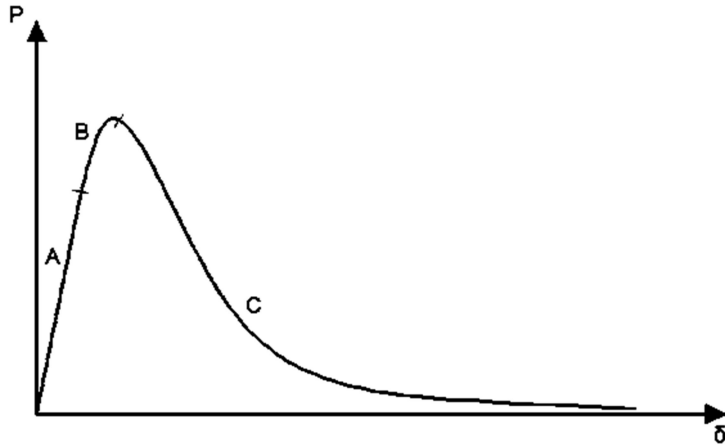
5.4.3. İki parametrelili model

Jenq ve Shah (1985), tarafından önerilen iki parametrelili modelde, çentik uzunluğu a_0 olan gerçek bir elemanın maksimum yüke kadar gösterdiği davranış, a_e efektif çatlak uzunluğuna sahip elastik bir eleman aracılığıyla modellenmektedir. İki parametrelili modelde, boyut etkisindeki gibi farklı boyutlu modeller kullanılmasına gerek yoktur. Çentikli bir eğilme elemanında üç noktalı eğilme deneyi yapılarak maksimum yüke ulaşıldığında önce yük kaldırılarak sonra tekrar yüklenir. Yük çatlak genişliği eğrisinin eğiminin bu çevrimlerden nasıl uzadığı araştırılarak iki adet kırılma parametresi belirlenmektedir. Bu parametreler kritik gerilme şiddet faktörü K_{IC} ve çatlak ucu açılma uzunluğunun kritik değeri $CTOD_C$ değerleridir. Tek tip deney numunesi kullanılması ve iki adet kırılma parametresi elde edilmesi bu yöntemin avantajı olmasına rağmen, yük çevirimi sırasında yük ve çatlak genişliği ilişkisinin hassas olarak ölçülmesi gerekmektedir.

5.5. Kırılma Enerjisi G_F

Çentikli bir kiriş numunesinin üç noktalı eğilme altındaki davranışı şematik olarak Şekil 5.4'de gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi yük-deplasman grafiği temel olarak üç bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde yük ve deplasman arasında sabit bir bağıntı olup, yük orantısal olarak artmaktadır. Bu aşamada çatlak ucunda açılmalar oluşmasına rağmen, çatlak ilerlememektedir. Küçük çatlakların oluşmaya başladığı ve çatlak ilerlemesinin geliştiği ikinci durumda, çatlak ucunda kırılma süreci bölgesi oluşmaktadır. Gerilme yumuşaması olarak bilinen üçüncü bölgede ise, çatlak hızla ilerlemektedir. Bu aşamada numune üzerinde oluşan hasarların çoğu dar bir bölgede toplanmaktadır. Beton numunenin

üzerindeki yük azaldıkça, kusurlar da ters orantılı olarak giderek artmaktadır ve sonunda gelişen tek bir çatlak ile numune göçmesi oluşur. Gerileme yumuşama bölgesi malzeme türleri için farklılık gösterdiğinden, tipik bir malzeme parametresi olarak ifade edilebilir.



Şekil 5.4. Çentikli betonun yük-deplasman grafiği şematik gösterimi

Kırılma enerjisi, eğilme yükü altındaki malzemenin kırılarak birden çok parçaya ayrılması için gerekli enerji toplamının, gelişen çatlaktaki yüzey enerjisine dönüşmesidir. Yük deplasman eğrisi altında kalan alanın hesaplanmasıyla bulunur. RILEM TC 50-FMC, betonun kırılma enerjisini aşağıdaki eşitlikte belirtmiştir (Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Materiaux Thecnical Comitte Thecnical Comitte 50-FCM, 1985).

$$G_f = (U_0 + m \cdot g \cdot \delta) / A \quad (5.1)$$

$$A = b \cdot (h - a) \quad (5.2)$$

Burada;

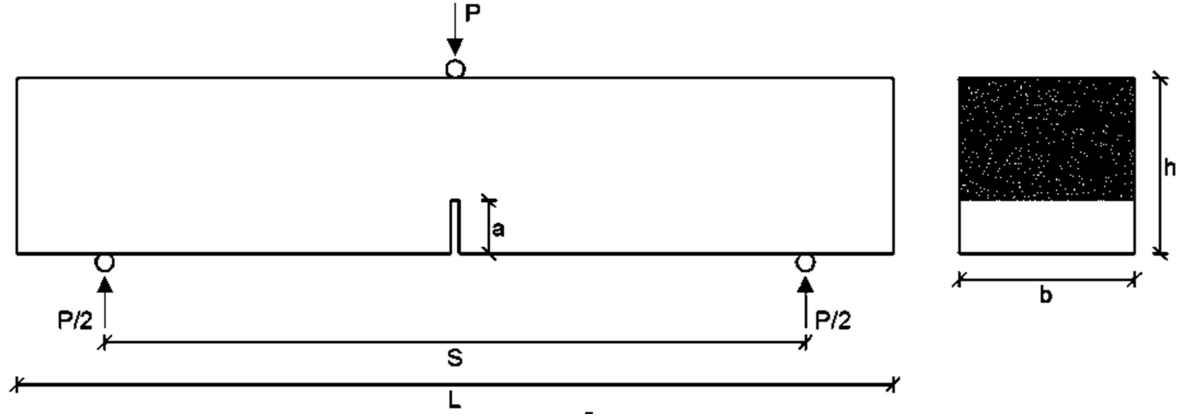
U_0 : Yük-deplasman eğrisi altında kalan alan (N.mm)

m : Kütle (kg)

g : Yerçekimi ivmesi ($9,81 \text{ mm/s}^2$)

δ : Göçme anındaki deplasman (mm)

A : Yükleme doğrultusuna paralel yüzey alanı (mm^2)



Şekil 5.5. Çentikli beton geometrisi

Kırılma enerjisi, eğilme numunesinin boyutlarına ve çatlak derinliğine bağlı olduğundan dolayı, Rilem Teknik Komitesi tarafından numune boyutları ve çatlak derinliği sınırlandırılmıştır. Ayrıca betonun maksimum yük kapasitesine yaklaşık olarak 30 ile 60 dakika arasında bir sürede ulaşması gerektiği belirtilmiştir. Bu da yaklaşık olarak 0,005 mm/s'ye tekabül etmektedir. Mindess yaptığı çalışmasında, yükleme hızının 5×10^{-7} 'den 5×10^{-5} 'e çıkmasıyla birlikte, kırılma enerjisinin %15 arttığını ifade etmiştir (Mindess, 1984).

Bazant ve Becq-Giraudon yaptıkları çalışmasında lif içermeyen betonlardan üretilen küçük eğilme elemanlarıyla yaptıkları çalışmasında, betonun kırılma enerjisini bazı parametrelere bağlı olarak ifade etmişlerdir (Bazant ve Becq-Giraudon, 2002).

$$G_f = 2,5 \cdot \alpha_0 \cdot \left[\frac{f_c}{0,058} \right]^{0,40} \cdot \left[1 + \frac{D_{max}}{1,94} \right]^{0,43} \cdot \left[\frac{w}{c} \right]^{-0,18} \quad (5.3)$$

Burada;

α_0 : Agregatın şekil faktörü (yuvarlak agregalar için =1, köşeli agregalar için =1.12)

f_c : Basınç dayanımı

D_{max} : Maksimum agregat çapı

w/c : Su/Çimento oranı

Kırılma enerjisinin tahmini için, Avrupa Uluslar Arası Beton Komitesi maksimum agregat çapını ve basınç dayanımı içeren ve ampirik bir ifade olan Eş. 5.4'ü önerirken (Comité

Euro-International du Béton -FIB, 2010), Martin ve arkadaşları yayınladıkları çalışmasında Eş. 5.5'i önermişlerdir (Martin, Stanton, Mitra ve Lowes, 2007).

$$G_f = 73. (f_{cm})^{0,18} \quad (5.4)$$

$$G_f = [0,0469. (D_{max})^2 - 0,5. D_{max} + 26]. \left[\frac{f_c}{10}\right]^{0,7} \quad (5.5)$$

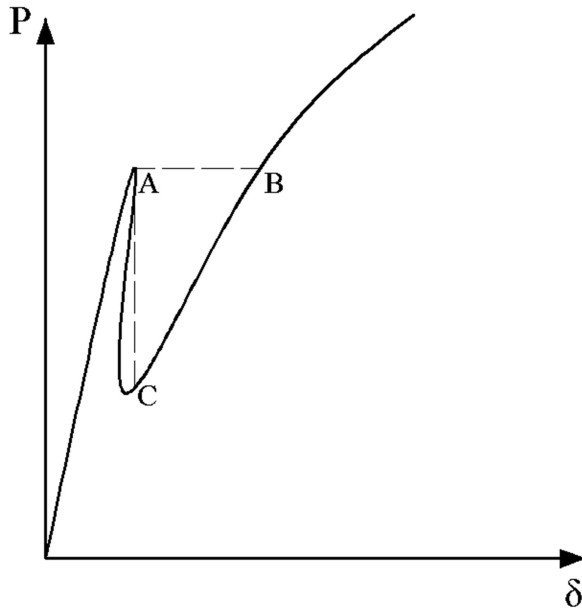
5.6. Kirişlerde Minimum Eğilme Donatısı

Kırılma mekaniğinin betona uygulanmasından kısa bir süre sonra yapılan bazı çalışmalarda, betonun gerilme yoğunluk faktörü K_I , çatlak ucundaki yumuşamadan dolayı bazı çalışmalarda sıfır olarak alınmıştır (Barenblatt, 1962; Dancygier ve Savir 2006; Wills, 1967). Ancak tutulu çatlak modelinde çatlağın ilerleme şartı olarak, çatlak ucundaki gerilme yoğunluk faktörü K_I 'nın kritik değer olan K_{IC} değerine ulaşması gerekmektedir. Çeşitli araştırmacılar tarafından ifade edilen geometrik fonksiyonları kullanarak betonarme yapıya ait özellik olan olan boyutsuz bir ifade geliştirmişlerdir. Gevreklik indisi olarak ifade elen N_p 'değeri betonun kırılma tokluğu K_{IC} , donatının akma dayanımı f_y , ve kiriş yüksekliğine bağlıdır (Carpinteri, 1984; Okamura, Watanable ve Takano,1975).

Minimum donatı oranı, eğilme kirişinde ilk çatlağın oluşmasıyla birlikte donatının akmasının gerçekleşmesi durumunu ifade etmektedir (Bosco ve Carpinteri ve Debernardi, 1990a). Betonarme eğilme elemanlarında, kiriş üzerine uygulanan yükün belirli bir noktaya ulaşmasıyla birlikte kılcal eğilme çatlakları oluşmaktadır. Bu çatlakların oluşumuyla beraber kiriş, lineer davranışını kaybetmektedir. Çatlaktan sonraki bölgede, yük kontrollü yükleme yapılmasından kaynaklanan ileri sıçrama ve deformasyon kontrollü yükleme yapılmasından kaynaklanan geri sıçrama durumu söz konusudur (Bosco ve Carpinteri, 1992). Bu durum şematik olarak Şekil 5.6'de gösterilmektedir.

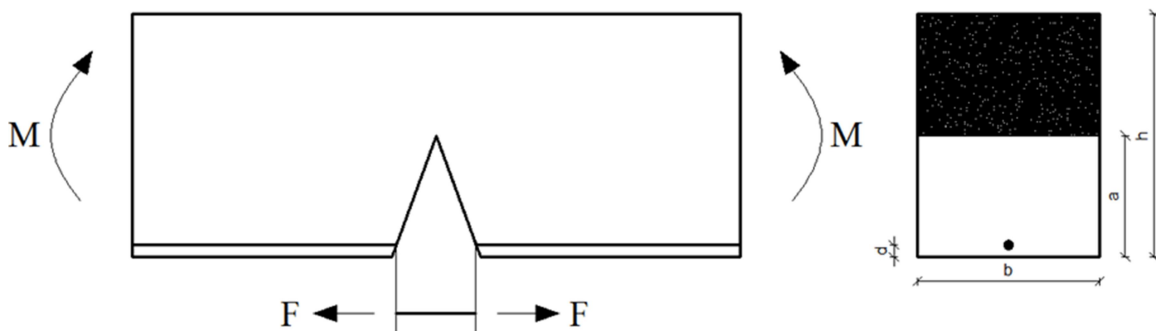
Çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda öncekilerden farklı olarak, beton karışımının içerisine lif katılak köprüleme etkisi üzerinde çalışmalar yapılmıştır (Carpinteri, Ferro ve Ventura, 2000; Ferro, 2002). Çalışmada, donatılar için köprülenmiş beton modeli kullanılırken, matrix ve lif karışımı için kohezif beton modeli kullanılmıştır. Boyut analizinin de yapıldığı çalışmada, yapı davranışını belirleyen moment eğrilik

ilişkisinin, üç adet boyutsuz parametreye bağlı olduğu ifade edilmiştir. Bunlardan ilki normalize edilmiş elastisite modülü ile normalize edilmiş kritik çatlak açıklığı arasındaki ortak ifadedir (w_c). Diğer ikisi ise donatılı betonun gevreklik numarası (N_p^1) ve lifli matrix fazın gevreklik numarasıdır (N_p^2). Minimum donatı oranı üzerindeki boyut etkisi çalışmalarında minimum donatı oranının, kirişin geometrik özelliklerine, donatının akma dayanımına, betonun çekme dayanımına ve betonun tokluğuna bağlı olduğunu ifade edilmiştir (Carpinteri ve Corrado, 2011; Corrado, Cadamuro ve Carpinteri, 2011).



Şekil 5.6. Çentikli beton geometrisi Yük kontrollü yükleme (AB) ve deplasman kontrollü yükleme (AC)

Genişliği b yüksekliği h olan dikdörtgen bir kirişin donatı konumu, kiriş alt yüzünden d mesafesi kadar uzaktadır. Şekil 5.7’de görüldüğü gibi kiriş üzerine uygulanan yükten dolayı, eğilme momenti (M) ve donatı çekme kuvveti (F) oluşmuştur (Carpinteri, 1984).



Şekil 5.7. Çekme bölgesinde çatlak oluşan betonarme kiriş

M^* ve F^* ifadeleri, çatlak ucunda gerilme yoğunluk faktörünü belirleyen ifadeler olup sırasıyla aşağıdaki eşitliklerde ifade edilmiştir (Bosco, Carpinteri ve Debernardi, 1990b).

$$M^* = M - F \cdot \left(\frac{h}{2} - d\right) \quad (5.6)$$

$$F^* = -F \quad (5.7)$$

Moment ve donatı kuvvetinden kaynaklanan, çatlak ucundaki gerilme yoğunluk faktörleri ise sırasıyla Eş. 5.8 ve Eş. 5.9'da gösterilmiştir.

$$(K_I)^m = \frac{M^*}{b \cdot h^{1,5}} Y_m(\xi) \quad (5.8)$$

$$(K_I)^f = \frac{F^*}{b \cdot h^{0,5}} Y_f(\xi) \quad (5.9)$$

Buradaki ξ ifadesi rölatif çatlak uzunluğunu ifade etmekte olup, çatlak boyunun giriş boyuna bölünmesiyle bulunur ($\xi=a/h$). $Y_m(\xi)$ ve $Y_f(\xi)$ ise geometrik fonksiyon tanımı olup, $\xi \leq 0,7$ olması durumu için ifade edilmiştir (Okamura, Watanable ve Takano, 1975). Çatlak ucundaki toplam gerilme yoğunluk faktörü, süperpoze yapılarak bulunur.

$$K_I = (K_I)^m + (K_I)^f \quad (5.10)$$

Eş. 5.8 ve Eş. 5.9 ifadelerinin Eş. 5.10 eşitliğinde yerlerine yazılmasıyla, moment aşağıdaki ifadede çıkarılmaktadır.

$$M = \frac{K_I \cdot h^{1,5} \cdot b}{Y_m(\xi)} + \frac{F \cdot h}{Y_m(\xi)} [Y_f(\xi) + Y_m(\xi)(0,5 - \frac{d}{h})] \quad (5.11)$$

Eşitliğin iki tarafı da sadeleştirilerek yazılırsa, momenti boyutsuz olarak Eş. 5.12'de elde ederiz ($M \leq M_p$).

$$\frac{M}{K_I \cdot h^{1,5} \cdot b} = \frac{1}{Y_m(\xi)} + N_p \cdot \left[\frac{Y_f(\xi)}{Y_m(\xi)} + (0,5 - \frac{d}{h}) \right] \quad (5.12)$$

Buradaki N_p değeri gevreklik indisi olup donatı gerilmesine, donatı yoğunluğuna, kesit geometrisine ve gerilme yoğunluk faktörüne bağlıdır.

$$N_p = \frac{\sigma_s \cdot h^{1/2} \cdot A_s}{K_I \cdot A} \quad (5.13)$$

Donatının akması durumunda, donatıdaki gerilme akma gerilmesi olarak alınırsa Eş. 5.12 ve Eş. 5.13 ifadesi aşağıdaki ifadelerle dönüşmektedir ($M > M_p$).

$$\frac{M}{K_{IC} \cdot h^{1.5} \cdot b} = \frac{1}{Y_m(\xi)} + N_p \cdot \left[\frac{Y_f(\xi)}{Y_m(\xi)} + \left(0,5 - \frac{d}{h}\right) \right] \quad (5.14)$$

$$N_p = \frac{\sigma_y \cdot h^{1/2} \cdot A_s}{K_{IC} \cdot A} \quad (5.15)$$

Hafif donatılı betonarme elemanların boyut analizinde, eğilme davranışının aşağıdaki parametrelerle ilintili olduğu ifade edilmiştir (Corrado ve diğerleri, 2011).

$$M = \Phi(\sigma_u, G_F, E_c, \sigma_y, \rho_b, h, \vartheta) \quad (5.16)$$

Burada M eğilme momenti, σ_u betonun çekme dayanımı, G_F betonun kırılma enerjisi, E_c betonun elastisite modülü, σ_y donatının akma dayanımı, ρ_b donatı oranı, h kesit yüksekliğini ve ϑ eğilme elemanının bölgesel dönmesini ifade etmektedir. Buckingham'ın π teorisi ve boyut modeli, Eş. 5.16'da verilen ifadeleri boyutsuz olarak gruplandırmamızı sağlamaktadır. Eğer kesit yüksekliği ve gerilme yoğunluk faktörü boyutsal olarak bağımsız kabul edilirse, aşağıdaki Eş. 5.17 ifadesi elde edilir.

$$M_1 = \Phi_1(s, N_p, \vartheta_n) \quad (5.17)$$

$$s = \frac{K_{IC}}{\sigma_u \cdot h^{1/2}} \quad (5.18)$$

$$N_p = \rho_b \frac{\sigma_y \cdot h^{1/2}}{K_{IC}} \quad (5.19)$$

N_p ve s grafik üzerinde karşılaştırılarak aralarındaki ilişki Eş. 5.20’de olduğu gibi bulunmuştur.

$$N_p = 0,26 \cdot s^{-0,71} \quad (5.20)$$

Eş. 5.18 ve Eş. 5.19, Eş. 5.20’de yerlerine yazılarak minimum donatı miktarı, aşağıdaki gibi bulunur.

$$\rho_{\min} = 0,26 \frac{K_{IC}^{0,29} \cdot \sigma_u^{0,71}}{\sigma_y \cdot h^{0,15}} \quad (5.21)$$

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Beton Karışımı

Yapılan çalışmada, beton karışımından yüksek dayanım elde edebilmek amacıyla, kompakt bir beton tasarımı yapılmış, su/ çimento oranı düşük seviyelerde tutulmuştur. Bu amaçla kaba agregaya yerine ince agregaya tercih edilmiştir. Çok ince dane yapısına sahip puzolan kullanılarak mikro boşlukların doldurulması ve beton dayanımının yüksek tutulması amaçlanmıştır.

6.1.1. Çimento

Deneyde yüksek dayanım elde edebilmek amacıyla, yüksek dayanıma sahip Beyaz Portland Çimentosu (BPÇ-52,5 R) kullanılmıştır. Karışımında çimento oranı yüksek tutularak, hidrasyona girmeyen fazla çimentonun dolgu malzemesi olarak kullanılması sağlanmıştır. Kullanılan BPÇ-52,5 R tipi çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Çimentonun a) Kimyasal, b) Fiziksel Özellikleri

Çözünmeyen kalıntı	0,18	Özgül ağırlık (gr/cm ³)	3,06
SiO ₂	21,6	Özgül yüzey (Blaine – cm ² /gr)	4600
Al ₂ O ₃	4,05	Beyazlık (Y değeri)	85,5
Fe ₂ O ₃	0,26	Priz başlangıcı (dakika)	100
CaO	65,7	Priz sonu (dakika)	130
MgO	1,30	Su (%)	30
SO ₃	3,30	Hacim sabitliği (cm)	0,1
Kızdırma kaybı	3,20	0,045 mm elekten kalıntı (%)	1,0
Na ₂ O	0,30	0,090 mm elekten kalıntı (%)	0,1
K ₂ O	0,35	2 günlük basınç dayanımı (kg/cm ²)	370
Klorür (Cl ⁻)	0,01	7 günlük basınç dayanımı (kg/cm ²)	500
Serbest CaO	1,6	28 günlük basınç dayanımı (kg/cm ²)	600

a)

b)

6.1.2. Agregaya

Karışım içerisinde agregaya olarak maksimum dane çapı 1 mm olan silis kumu kullanılmıştır. Silis kumu, içerdiği silisyum dioksit (SiO₂) ve demir oksit (FeO) oranlarına göre farklı

kimyasal yapılara ve sertliklere sahiptir. Sıcaklığa ve kimyasal etkilere karşı dirençli olduklarından dolayı, çeşitli endüstri dallarında kullanımı yaygındır. Fayans ve seramik yapıştırıcıları, derz harçları, yüzey sertleştiricileri, cam yünü imalatı, elyaf takviyeli prekast imalatı ve sanayi boya imalatı gibi çeşitli sektörlerde silis kumu kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek aşınma direnci ve dayanımı sayesinde, yapı sektöründe beton karışımları içerisinde kullanılmaktadır. Deneyde kullanılan kuvars kumu için elek analizi değerleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Silis kumu elek analizi

Elek Boyutu (µm)	Analiz Sonucu (%)
1000	0,1
710-1000	1,7
500-710	9,7
355-500	28,2
250-355	41,5
180-250	16,7
125-180	1,7
90-125	0,3
0-90	0

6.1.3. Hiper akışkanlaştırıcı katkı

Beton kıvamını değiştirmeden su oranını yüksek oranda azaltmak için veya su oranını değiştirmeden işlenebilirliği artırmak amacıyla, karışım içerisine katılan kimyasal katkılara süper akışkanlaştırıcı katkılar denilmektedir. Yeni nesil hiper akışkanlaştırıcılar içeriğindeki polikarboksilat sayesinde klasik süper akışkanlaştırıcılardan ayrılmaktadırlar. İçeriğinde betona ve donatıya uzun vadede zarar veren maddeler içermezler. Kullanım miktarına bağlı olarak, betonun su ihtiyacını %25 ile %40 arasında düşürürler. Deneyde kullanılan kimyasal katkı, karboksilat bazlı olup özellikleri Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.3. Kimyasal katkı özellikleri

Tip	Polikarboksilat bazlı
Görünüm	Açık kahve renkli sıvı
Yoğunluk	1,07±0,003gr/cm ³
pH	5,00±2
Alkali içeriği	≤ %10 (TS EN 480-12)

6.1.4. Silis dumanı

Türkiye’de silis dumanın üretildiği tek yer Antalya’da bulunan Eti Elektrometalurji A.Ş. tesisleridir. Silis dumanı üretimi, Ferrosilisyum ve silikoferrokrom baca tozları olmak üzere, yıllık toplamda 1000-1500 ton arasında değişmektedir. Burada üretilen silis dumanı çeşitli üniversitelerdeki araştırma deneylerinde, yalıtım, ateş tuğlası ve hazır beton sektörlerinde kullanılmaktadır. Alaşımdaki silisyum içeriğine bağlı olarak, silis dumanındaki SiO_2 miktarı artmaktadır. Üretimde silisyum metali kullanılması durumunda SiO_2 değeri %98 değerlerine kadar ulaşmaktadır (ACI Committee 234, 1996). Çizelge 6.4’de alaşımdaki silisyum içeriğine bağlı olarak SiO_2 değişimi verilmiştir.

Çizelge 6.4. Silis dumanındaki SiO_2 miktarları

Alaşım türü	Silis dumanındaki SiO_2 oranı (%)
%50 Ferrosilisyum	61-84
%75 Ferrosilisyum	84-91
Metal silisyum	87-98

6.1.5. Karbon lif

Karbon lifler, sahip oldukları yüksek çekme mukavemeti sayesinde uzay ve savunma teknolojisinde sıklıkla kullanılan bir malzeme türüdür. Günümüzde yapı güçlendirme çalışmaları ve yüksek performanslı beton üretimi gibi çeşitli yapı alanlarında kullanımı yaygınlaşmıştır. Kullanılan lif oranına bağlı olarak betonun çekme ve aşınma direncini artırarak, betona dayanıklılığını ve kalıcılığını artırır. Deneyde kullanılan karbon lifin bazı mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 6.5’de verilmiştir.

Çizelge 6.5. Karbon lif mekanik ve fiziksel özellikleri

Çekme dayanımı (MPa)	3800
Elastisite modülü (GPa)	228
Elektrik iletkenliği (ohm-cm)	0,00155
Özgül ağırlık(gr/cm^3)	1,81
Elyaf çapı (mikron)	7,2
Karbon yüzdesi (%)	95
Elyaf uzunluğu (mm)	6

6.2. Beton Karışım Oranları ve Üretimi

Deneyde kullanılan karışım oranları 1 m³ beton için aşağıdaki Çizelge 6.6'da verilmiştir. Çizelgede verilen değerlerin birimi kg cinsinden olup, deneyde kullanılan lif oranları ise hacimcedir.

Çizelge 6.6. Beton karışım oranları (kg/m³)

Karışım	Su	Çimento	Silis Kumu	Akışkanlaştırıcı	Silis Dumanı	Karbon Lif	Çelik Lif
Lifsiz	198	990	1210	29,7	148,5	-	-
%0,43 Karbon Lifli	198	990	1210	29,7	148,5	7,73	-
%0,65 Karbon Lifli	198	990	1210	29,7	148,5	11,6	-
%0,33 Çelik lifli	198	990	1210	29,7	148,5	-	25,76
%0,66 Çelik lifli	198	990	1210	29,7	148,5	-	51,53
%0,99 Çelik lifli	198	990	1210	29,7	148,5	-	77,29

Beton karışım oranları, yapılan ön dökümler sonucunda, mikserin kova hacmi ve motor gücü de dikkate alınarak belirlenmiştir. Kiriş boyutları 150*200*1300 mm ve kiriş hacmi ise 39 dm³ olduğundan, betonarme kirişlerin dökümünde Çizelge 6.6'da verilen değerler 0.039 katsayısı ile çarpılarak kullanılmıştır.

Beton karışımı sırasında, öncelikle harç üretimi yapılmış ve ardından silis kumu eklenerek karıştırma işlemi tamamlanmıştır. Karıştırıcı içerisinde öncelikle silis dumanı, çimento ve lifler koyularak, yaklaşık bir dakika boyunca kuru karışım yapılmıştır. Akışkanlaştırıcı karışım suyunun içine katılarak karıştırılmış ve bu sıvı karışım, mikserdeki kuru karışımın içine yavaşça ilave edilerek yaklaşık 2 dakika boyunca karıştırılmıştır. Son olarak silis kumu, beton harca ilave edilerek 3 dakika karıştırılmış ve daha önce yağlanan kalıplara dökülmüştür.

6.3. Eleman Boyutları ve İsimlendirilmesi

Deneyde minimum donatı oranını belirlemek amacıyla donatılı kirişler ve beton parametrelerini belirlemek amacıyla da donatısız küçük eğilme elemanları, küp ve silindir numune üretimi yapılmıştır. Bu elemanların boyutları Çizelge 6.7’de verilmiştir.

Çizelge 6.7. Eleman ve numune boyutları

Eleman	Boyutlar (mm)
Donatılı kiriş	150x200x1300
Donatısız kiriş	100x100x500
Küp	100x100x100
Silindir	75x150

Deneyde kullanılan betonarme kirişler, içeriğindeki lif türü, lif oranı ve donatı miktarına göre Çizelge 6.8’de verildiği gibi isimlendirilmiştir. İlk iki harf lif türünü, 3. harf lif oranını, yanındaki rakam donatı oranını ve son harf ve rakam set numarasını vermektedir. Örneğin, CF A1 S1 ifadesinde CF karbon lif, A lif oranı, 1 donatı oranını ifade etmektedir. Her bir elemandan 2 set üretildiğinden S1 ve S2 ifadeleri bu farkı belirtmektedir

Çizelge 6.8. Betonarme kiriş elemanlarının isimleri

Lif türü	Lif oranı (%)	Donatı miktarı	Numune adı
Lifsiz	0,00	1Ø8	NF A1 S2
		2Ø8	NF A2 S2
		3Ø8	NF A3 S2
Karbon lif	0,43	1Ø8	CF A1 S1
		2Ø8	CF A2 S1
		3Ø8	CF A3 S1
	0,65	1Ø8	CF B1 S1
		2Ø8	CF B2 S1
		3Ø8	CF B3 S1
Çelik lif	0,33	1Ø8	SF A1 S1
		2Ø8	SF A2 S1
		3Ø8	SF A3 S1
	0,66	1Ø8	SF B1 S1
		2Ø8	SF B2 S1
		3Ø8	SF B3 S1
	0,99	1Ø8	SF C1 S1
		2Ø8	SF C2 S1
		3Ø8	SF C3S1

6.4. Deneylerde Kullanılan Ölçüm Cihazları ve Yükleme-Ölçüm Düzenegi

Bu deney Gazi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında yapılmış ve burada bulunan cihazlar kullanılmıştır.

6.4.1. Yük hücresi

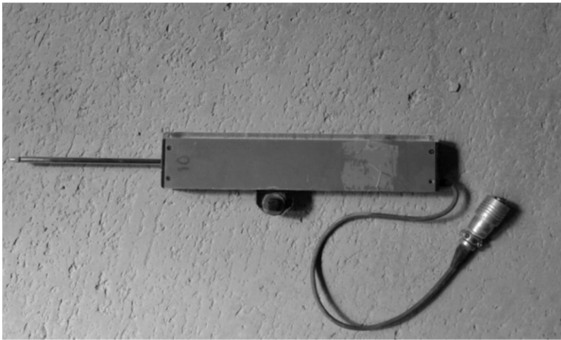
Yapılan deneyde 300 kN basma ve 150 kN çekme kapasitesine sahip 6 kg pirinç Load Cell kullanılmıştır (Resim 6.1). Deneyden yapılmadan önce, pres altında kalibrasyonu yapılan yük hücresinin deney sırasında basma özelliği kullanılmıştır.



Resim 6.1. Yük hücresi (Load Cell)

6.4.2. Deplasman ölçer (LVDT)

Deneyde 100 mm ölçüm kapasitesine sahip yük hücresi kullanılmıştır. Deneyde kullanılmadan önce, deplasman ölçerin kalibrasyonu yapılmıştır (Resim 6.2).



Resim 6.2. Deplasman ölçer (LVDT)

6.4.3. Veri toplayıcı (Data logger)

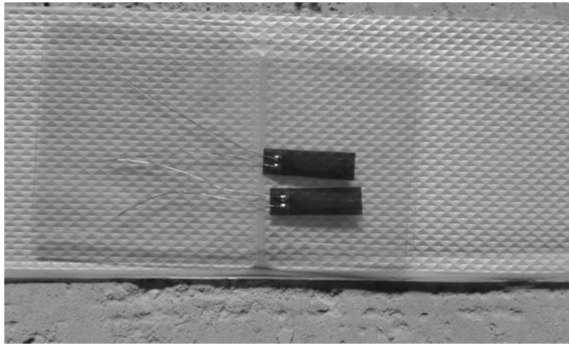
Deneyde iki adet TDG marka sekiz kanallı veri toplayıcı kullanılmıştır. Switch ayarları sayesinde yük hücresi, deplasman ölçer ve birim deformasyon ölçer için ayrı ayrı kanal kazanç ayarları yapılmıştır (Resim 6.3).



Resim 6.3. Veri toplayıcı (Data Logger)

6.4.4. Birim deformasyon ölçer (Strain gauge)

Deneyde beton yüzeyde oluşan birim şekil değiştirmeleri ölçmek amacıyla kiriş yüzeyine, ortalama 10 adet strain gauge yapıştırılmıştır (Resim 6.4).



Resim 6.4. Birim deformasyon ölçer (Strain gauge)

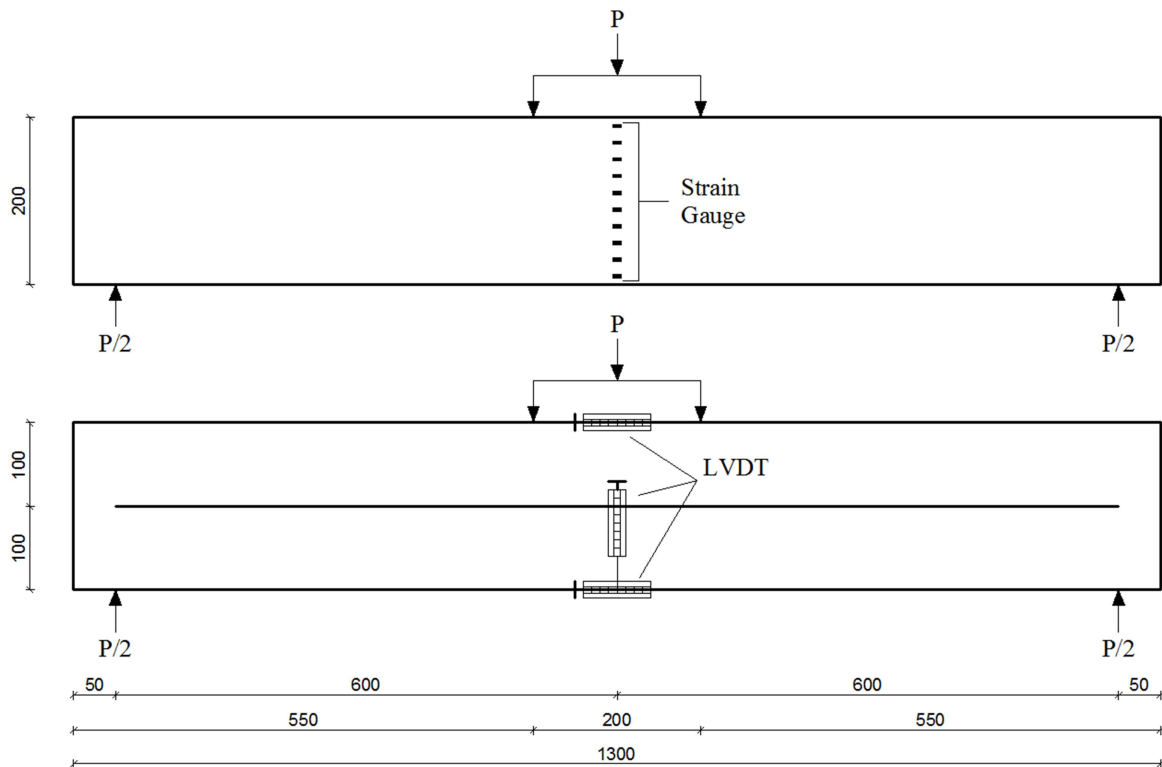
Kullanılan birim deformasyon ölçerler 120 ohm direnç ve 10 amper akım özelliklerine sahiptir. Ayrıca kullanılan birim deformasyon ölçerlerin gauge faktörü üretici firma tarafından 2 ± 0.01 olarak verilmiştir. Birim deformasyon ölçerlerden elde edilen voltaj verileri, çeyrek Watson köprüsü kullanılarak birim deformasyon değerlerine dönüştürülmüştür.

6.4.5. Yükleme ve ölçüm düzeneği

Deneyde, yükleme noktasının altındaki temas noktasında gelişen ve birim deformasyon ölçerlerden elde edilen değerleri etkileyen, beton çekme gerilmelerini ortadan kaldırmak amacıyla, 4 noktalı yükleme düzeneği kullanılmıştır (Şekil 6.1).

Donatılı kirişlerin ortasındaki toplam yer değiştirmeyi, mesnet çökmelerinden bağımsız olarak belirleyebilmek amacıyla mesnetlerin üst bölgesinde, matkapla delik açılarak hazırlanan ölçüm düzeneği yerleştirilmiştir.

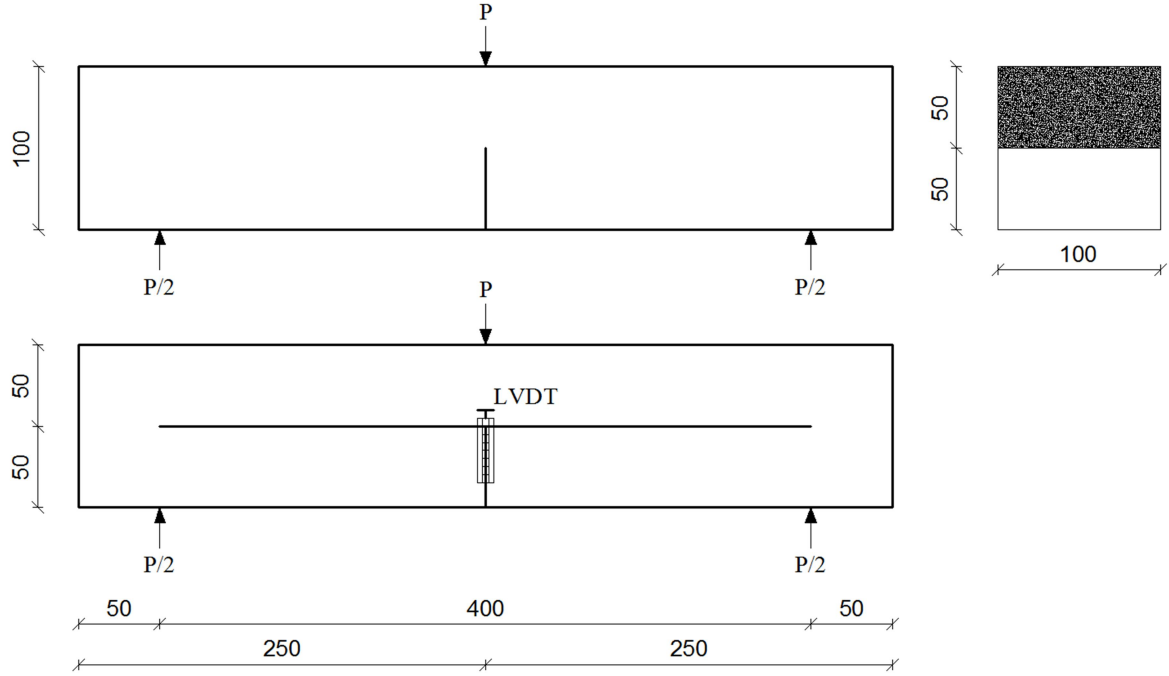
Kiriş orta bölgesinde eğilmeden dolayı oluşan eğriliği belirlemek amacıyla, 2 adet LVDT kirişin üst ve alt lifi seviyesinde yerleştirilmiştir. Ayrıca kirişin orta bölgesinde oluşan birim deformasyonları belirlemek amacıyla, 10 adet birim deformasyon ölçer kiriş derinliği boyunca 2 cm arayla yerleştirilmişlerdir. Şekil 6.1’de verilen değerler mm cinsindendir.



Şekil 6.1. Dört noktalı yükleme ve ölçüm düzeneği

Ayrıca kırılma enerjisini belirlemek amacıyla, donatı bulunmayan küçük eğilme elemanlarının orta noktalarından 3 cm uzunluğunda çentikler açılarak 3 noktalı yükleme

deneyleri yapılmıştır (RILEM Technical Committee 50-FCM, 1985). Üç noktalı eğilme deneyi şematik olarak Şekil 6.2’de gösterilmektedir.



Şekil 6.2. Üç noktalı yükleme ve ölçüm düzeneği

7. DENEY SONUÇLARI

7.1. Küp Numunelerin Basınç Dayanımları

Lif içermeyen ve farklı lif oranlarına sahip karışımlardan alınan, 100x100x100 mm boyutlarında küp numuneler üzerinde basınç deneyi yapılarak, karışımların dayanımları bulundu. Basınç dayanımını belirlemek için alınan küp numuneler, 2000 kN kapasiteli hidrolik yükleme cihazında 9 kN/saniye hızda yükleme yapılarak kırıldı (Resim 7.1).



(a)



(b)

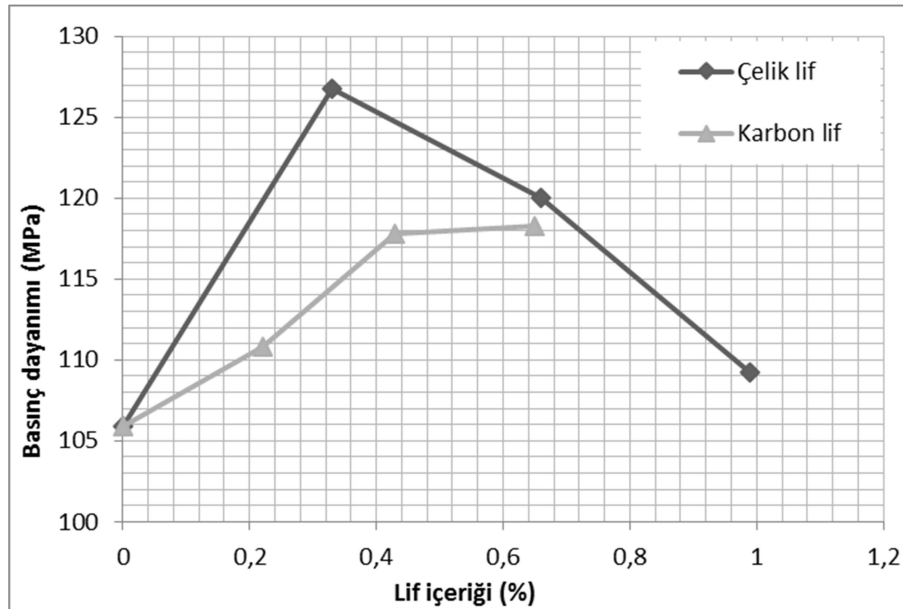
Resim 7.1. a) küp numuneler, b) basınç deneyi

Farklı lif oranı içeren karışımlardan altışar adet küp numune üzerinde yapılan basınç testi sonucunda çıkan değerler Çizelge 7.1’de verilmiştir. Karışım içerisinde farklı oranlarda kullanılmış lif içeriklerinin basınç dayanımına olumlu etkisi görülmüştür.

Çizelge 7.1. Ortalama küp dayanımları ve standart sapma değerleri

Lif türü	Lif oranı (%)	Küp basınç dayanımı (MPa)			Ortalama dayanım (MPa)	Standart sapma (MPa)
Lifsiz	0,00	80,4	102,7	122,6	105,87	14,34
		104,6	11,5	113,4		
Karbon lif	0,22	134,5	91,7	104,7	110,78	14,36
		104,9	112,7	116,2		
	0,43	117,4	109,6	128,5	117,83	16,15
		120	139,3	92,2		
	0,65	102,2	100	108,5	118,27	16,92
		125	136,1	137,8		
Çelik lif	0,33	130,8	116,2	131,7	126,73	6,21
		122,2	128,7	130,8		
	0,66	121,3	111,9	123,4	120,03	4,53
		119,6	119,2	124,8		
	0,99	123,4	99,3	116	109,23	10,95
		102,8	96,9	117		

Yukarıdaki Çizelge 7.1’de verilen değerler grafik olarak Şekil 7.1’de verilmiştir.



Şekil 7.1. Karbon ve çelik lifin basınç dayanımına etkisi

Karbon ve çelik lif içeren karışımlardan alınan küp numunelerin ortalama dayanımları, lif içermeyen karışımdan alınan şahit numunelerin ortalama dayanımından %3,20 ile %19,70 arasında değişen oranlarda daha yüksek çıkmıştır.

Karışımındaki karbon lif miktarıyla basınç dayanımı arasında doğrusal bir orantı olmadığı, lif içeriğinin artmasıyla birlikte dayanımın önce artıp sonra sabit kaldığı görülmüştür.

Çelik lif li karışımlardan elde edilen verilerde ise, lif içeriği ile dayanım arasında ters bir ilişki olduğu görülmüştür. Lif içeriğinin artmasıyla birlikte, basınç dayanımının o ölçüde azaldığı görülmüştür.

7.2. Silindir Yarma ve Beton Çekme Deneyi

Farklı beton karışımların çekme dayanımını belirlemek amacıyla 75x150 mm boyutlara sahip silindir numuneler üzerinde yarma deneyi yapılmıştır. Yük uygulama noktasında betonun ezilmemesi ve yükün uniform yayılı yük olarak uygulanması için, plakalar kullanılmıştır (Resim 7.2). Deney sonucunda silindirlerin genellikle, eksek boyunca uygulanan yük doğrultusunda kırıldığı görülmüştür. Ancak %0,66 ve %0,99 oranında çelik lif içeren elemanlarda, lif içeriğinin fazla olmasından dolayı, diğer elemanlar gibi bir ayrılma olmadığı görülmüştür.



Resim 7.2. Silindir numunelerin Brazilian yarma testi

Betonun çekme dayanımını ölçmek amacıyla kullanılan standart çekme testi için, her karışımdan alının ikişer adet elemana çekme testi uygulanmıştır (Resim 7.3-a). Bu deneyde özel olarak yaptırılan kalıp, çekme cihazının çenelerine tutturulmuş ve kalıba yerleştirilen eleman çekme kuvvetine maruz bırakılmıştır. Deney sonucunda çekme etkisine maruz kalmış elemanların, orta ve baş kısmından koparak iki parçaya ayrıldığı görüldü. Ancak,

hacimce %0,99 oranında elik lif içeren elemanlarda tam olarak ayrışma olmadığı görüldü (Resim 7.3-b).



(a)



(b)

Resim 7.3. a) beton çekme deneyi, b) beton çekme numuneleri

Her iki testten elde edilen sonuçlar aşağıdaki çizelgede verilmiştir (izelge 7.2). Buna göre, 3 mm uzunluğunda elik lif içeren karışımarda, betonun kalıba yerleştirilmesi sırasında lif boylarının uzunluğundan dolayı bu testin elik lif içeren betonlar için uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Standart ekme deneyinde elemanların kırılma bölgelerinin farklı olması ve liflerin kalıp içerisine düzgün yerleştirilememesinden dolayı hesaplarda silindir yarma değeri kullanılmıştır.

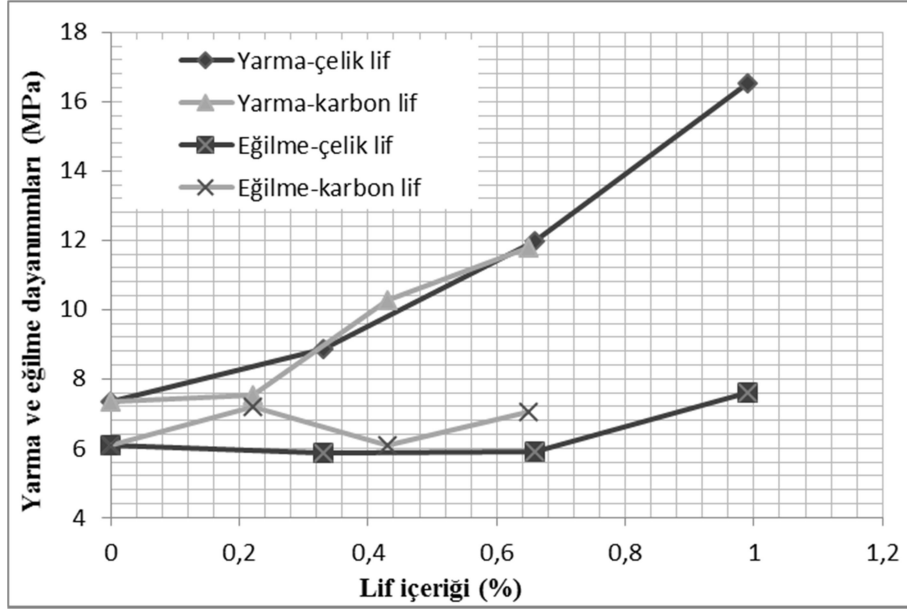
Çizelge 7.2. Beton yarma ve standart çekme deney sonuçları

Lif türü	Lif oranı (%)	Yarma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)
Lifsiz	0	5,7	9,4
		8,9	11,7
			11,3
Karbon lif	0,22	6,1	9,6
		8,9	9,8
			6,8
	0,43	8,3	10
		12,2	9,3
			10,6
	0,65	11,2	12,2
		12,4	12,6
			11,9
Çelik lif	0,33	9,5	9,7
		8,3	4,5
			10,3
	0,66	11,9	8,9
		11,9	8,9
			10,8
	0,99	17,8	10,3
		15,3	9,5
			7,9

Yarma dayanımı (σ_t) ile lif oranı yüzdesi arasında V_f arasında basit regresyon analizi yapılmış ve regresyon katsayısı 0,97 ($R=0,97$) olan ifade Eş. 7.1’de verilmiştir.

$$\sigma_t = 6,82e^{0,87 f} \quad (7.1)$$

Beton içerisindeki lif oranının artmasıyla birlikte betonun yarma dayanımında artış görülmüştür. Karbon ve çelik lif türlerinin beton yarma dayanımına etkilerinin benzer olduğu görüldü. Ayrıca çentikli kirişlerin eğilme test sonuçlarından, çatlak derinliği göz önünde bulundurularak, eğilme dayanımları hesaplanmıştır. Eğilme dayanımlarındaki artışın, yarma dayanımlarındaki artışa göre çok düşük olduğu görülmüştür (Şekil 7.2).



Şekil 7.2. Karbon ve çelik lifin yarma ve eğilme dayanımına etkisi

7.3. Üç Noktalı Kırılma Enerjisi Deneyleri

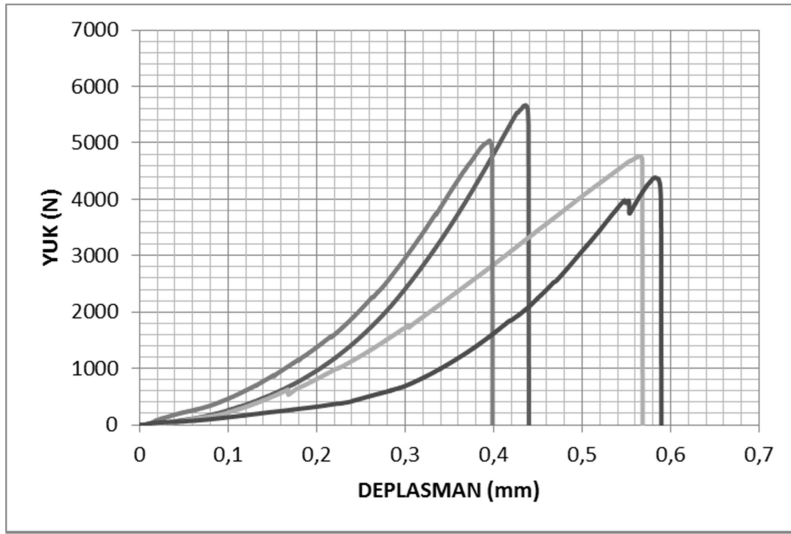
Üç noktalı kırılma enerjisi deneylerinde, deplasman kontrollü yükleme yapmak için 1000 kN kapasiteli Shimadzu marka kapalı sistem test cihazı kullanılmıştır (Resim 7.4). Deney sonucunda farklı oranına sahip elemanların yük-düşey deplasman eğrileri ve eğilme dayanımları elde edilmiştir.



Resim 7.4. Çentikli elemanlarda kırılma enerjisi deneyi

Farklı beton karışımlarının kırılma enerjilerinin belirlenmesi amacıyla, her karışımdan 4 adet çentikli numuneye eğilme testi uygulanmıştır. Lif içermeyen beton eğilme

elemanlarının kırılmalıkları yüksek olduğundan dolayı, bu numunelere 0.05 mm/dakika hızla yükleme yapılmıştır. Kullanılan karbon lif oranının yetersiz olması ve bu nedenle eğilme elemanlarında yeterli oranda şekil değıştirme sertleşmesi görülmediğinden, karbon lif içeren elemanlarda lifsiz elemanlar gibi 0.05 mm/dakika hızında yüklenmiştir. Ancak çelik liflerde görülen süneklikten dolayı, içeriğinde çelik lif bulunan elemanların yükleme hızı 0.3 mm/dakika yapılmıştır.



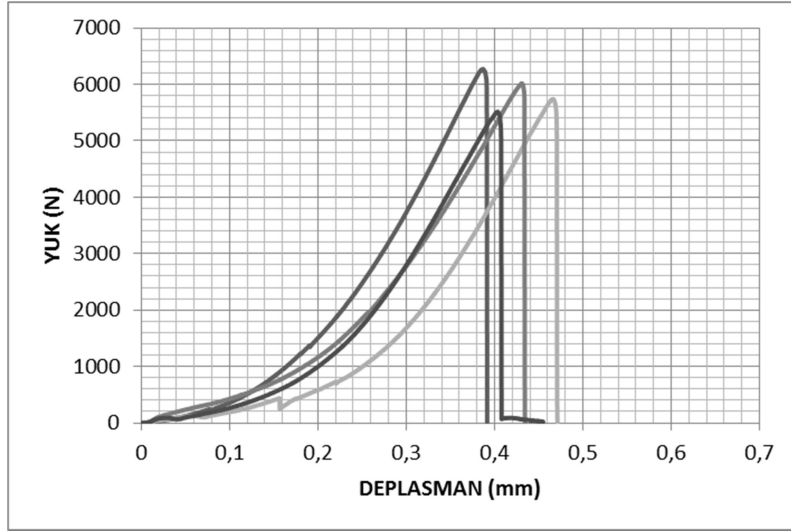
Şekil 7.3. Lif içermeyen elemanların yük-deplasman grafikleri

Lif içermeyen eğilme elemanlarında, oldukça gevrek olduklarından dolayı maksimum yük taşıma kapasitelerine ulaştıktan sonra ani kırılma ile göçme gerçekleşmiştir (Şekil 7.3). Bundan dolayı literatürde belirtilen ampirik denklemlerden elde edilen sonuçlarla, deneyden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bazant, Martin ve CEB-FIB tarafından önerilen ampirik denklemlerden elde edilen sonuçlar ile deney sonuçlarının karşılaştırılması Çizelge 7.3'de verilmiştir. Denklemlerde agregaların köşeli olduğu kabul edilmiştir.

Çizelge 7.3. Lif içermeyen karışımların kırılma enerjilerinin karşılaştırması

Dmax (mm)	w/c	Dayanım (MPa)	Kırılma enerjisi (N/m)			
			Bazant	Martin	CEB-FIB	Deney sonucu
1	0,2	80,4	80,8	109,9	164,2	102,7
		102,7	89,1	130,5	170,9	107,9
		111,5	92,1	138,2	173,2	112,9
		122,6	95,6	147,7	175,9	150,7

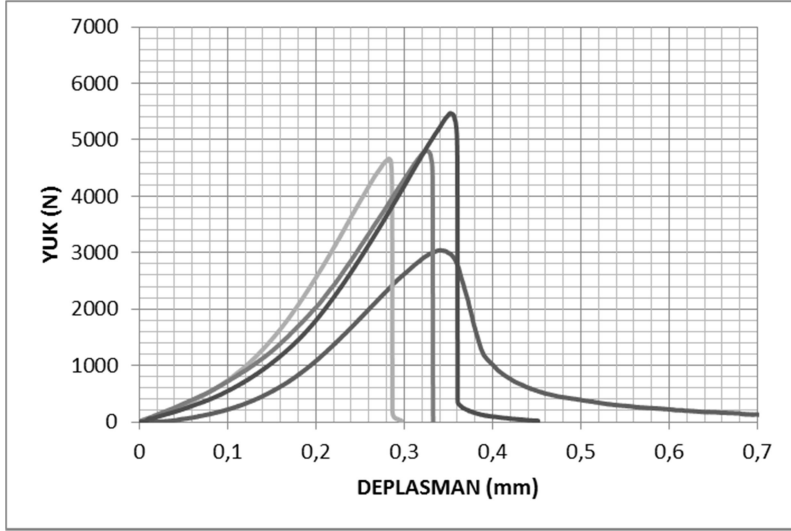
Hacimce %0,22 oranında karbon lif içeren çatlaklı eğilme elemanlarının kırılma yükleri 5,5 kN ile 6,25 kN arasında, deplasman değerleri ise 0,39 mm ile 0,46 mm aralıklarında değişmektedir (Şekil 7.4).



Şekil 7.4. %0,22 karbon lif içeren elemanların yük-deplasman grafikleri

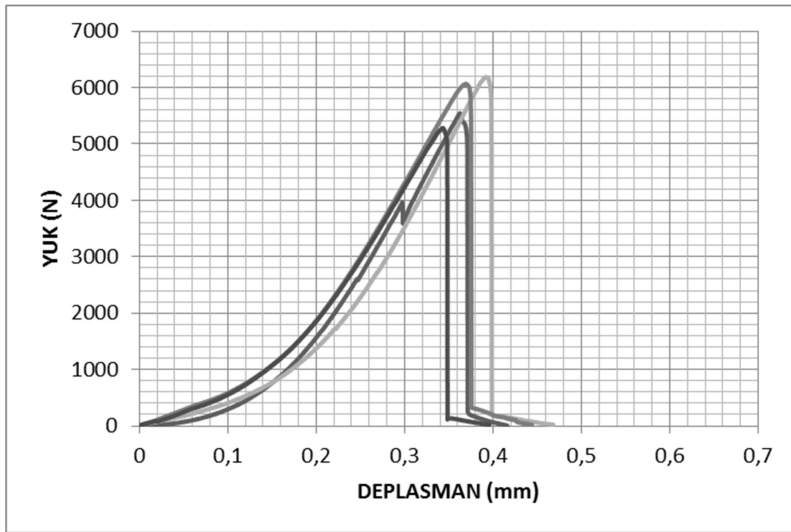
Lif oranının çok düşük olmasından dolayı, maksimum yük noktasından sonra elemanlarda ani kırılma gerçekleşmiş ve deformasyon artışı gözlenmemiştir. Lif içermeyen elemanlarla karşılaştırıldıklarında, %0,22 karbon lif içeren elemanların kırılma yüklerinde değişiklik olmazken, yaptıkları deformasyon miktarında azalma olduğu görülmüştür.

Hacimce %0,43 oranında karbon lif içeren çatlaklı eğilme elemanlarının kırılma yükleri 4,6 kN ile 5,5 kN arasında, deplasman değerleri ise 0,28 mm ile 0,45 mm aralıklarında değişmektedir (Şekil 7.5). Lif oranının düşük olmasından dolayı, maksimum yük noktasından sonra elemanlarda ani kırılma gerçekleşmiş ve küçük miktarda deformasyon artışı gözlenmiştir. Deney elemanlarından birisinin diğerlerine göre daha küçük kırılma yükü değerine sahipken daha fazla süneklik gösterdiği görülmektedir. Bu nedenle ortalama kırılma enerjisi hesabına katılmamıştır.



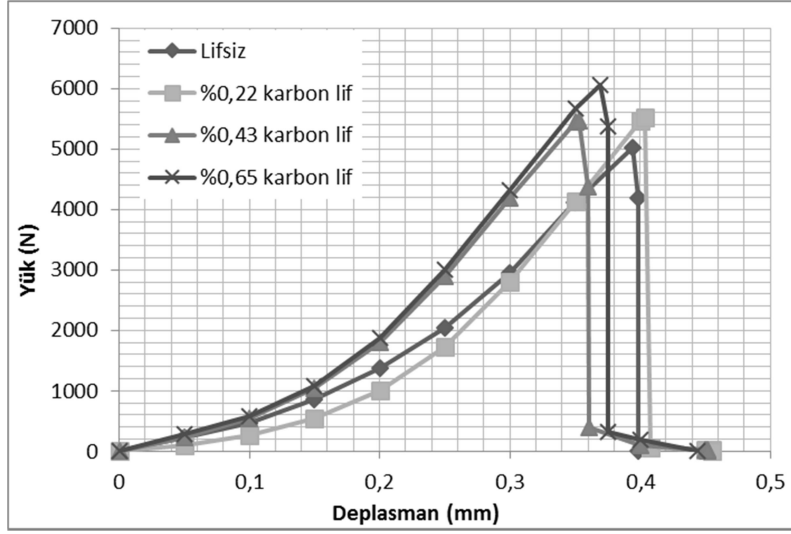
Şekil 7.5. %0,43 karbon lif içeren elemanların yük-deplasman grafikleri

Hacimce %0,65 oranında karbon lif içeren çatlaklı eğilme elemanlarının kırılma yükleri 5,2 kN ile 6,2 kN arasında, deplasman değerleri ise 0,40 mm ile 0,47 mm aralıklarında değişmektedir (Şekil 7.6).



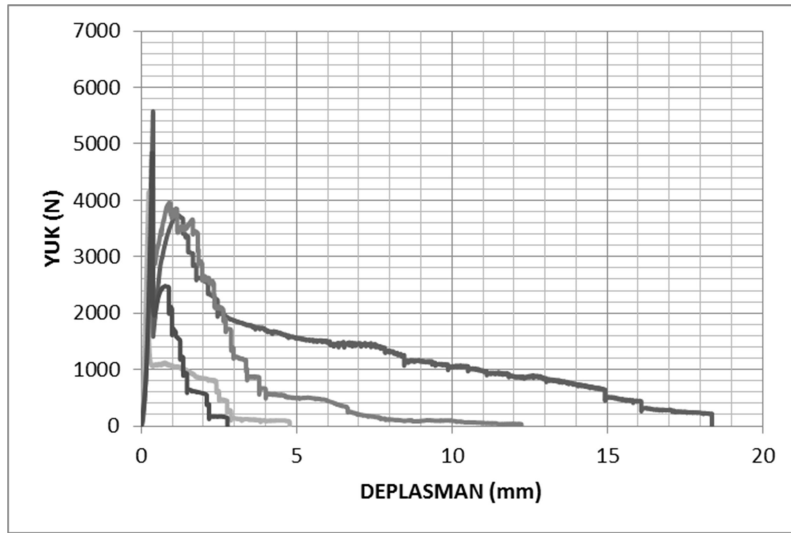
Şekil 7.6. %0,65 karbon lif içeren elemanların yük-deplasman grafikleri

Lifsiz ve hacimce %0,22; %0,43 ve %0,65 oralarında karbon lif içeren çentikli eğilme elemanlarının, 3 noktalı eğilme deney sonuçlarından elde edilen verilerin ortalaması alınmış ve bu ortalama değere yakın olan numunelerin grafikleri Şekil 7.7'de verilmiştir.



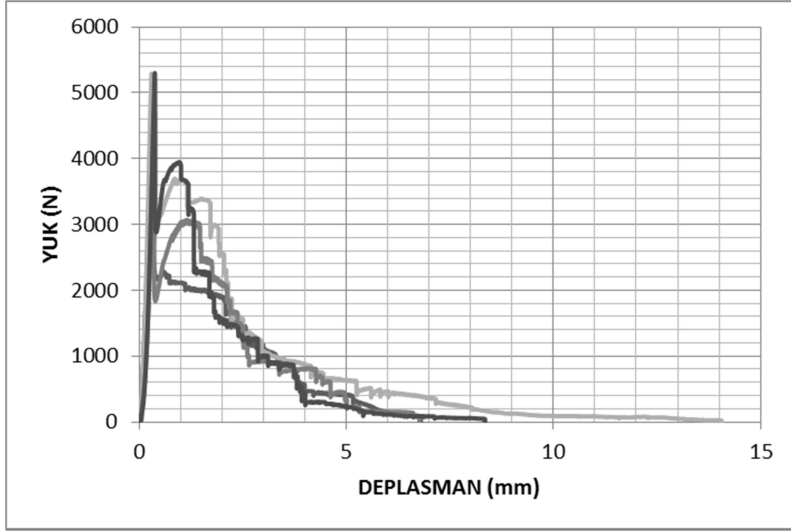
Şekil 7.7. Lifsiz ve karbon lif içeren elemanların ortalama yük-deplasman grafikleri

%0,33 oranında çelik lif içeren elemanların yük-düşey deplasman grafikleri Şekil 7.8’da verilmiştir. Elemanların kırılma yükleri 4,2 kN ile 5,6 kN arasında değişmesine rağmen, düşey deplasman değerlerinde ciddi bir artış gözlenmiştir. Ayrıca maksimum değerinden sonra azalan yük, belirli bir değerden sonra tekrar artmıştır.



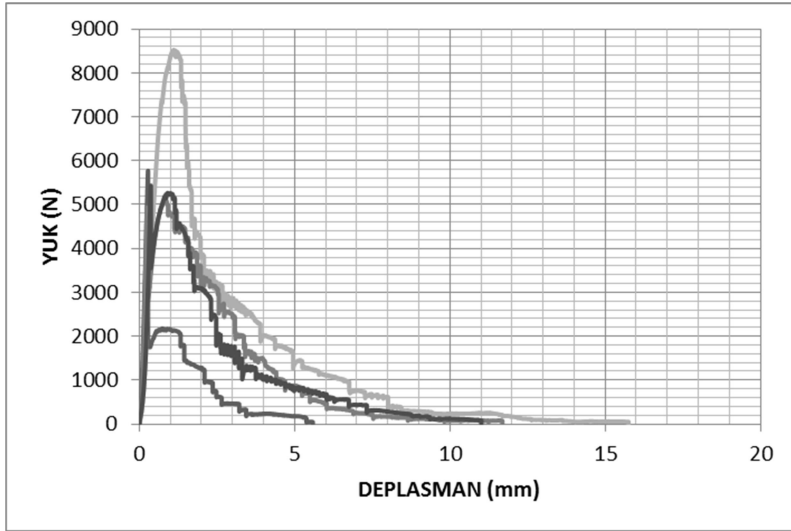
Şekil 7.8. %0,33 çelik lif içeren elemanların yük-deplasman grafikleri

%0,66 oranında çelik lif içeren elemanların kırılma yükleri 4 kN ile 5,3 kN arasında değişmektedir. Maksimum yük taşıma kapasiteleri, %0,33 çelik lif içeren elemanlara benzer olmasına rağmen, ortalama düşey deplasman değerlerinde azalma gözlenmiştir (Şekil 7.9).



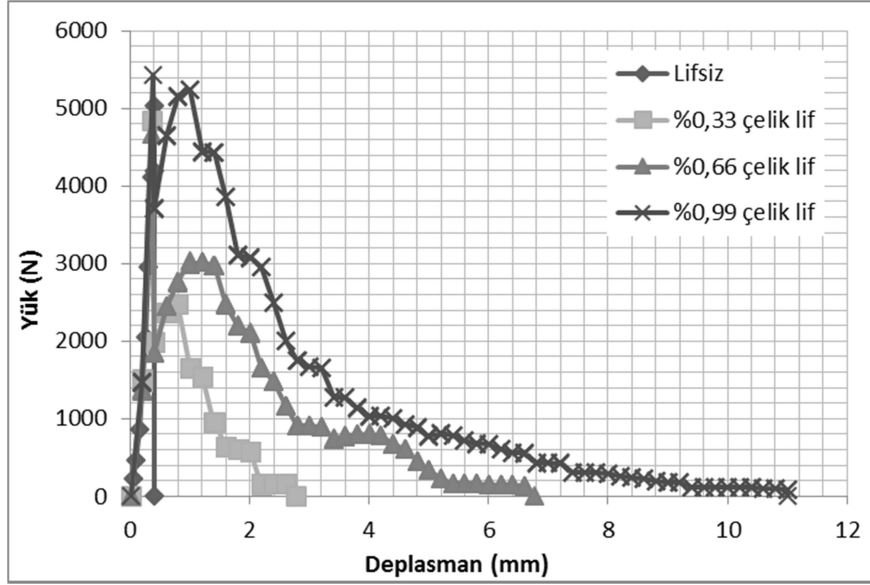
Şekil 7.9. %0,66 çelik lif içeren elemanların yük-deplasman grafikleri

%0,99 oranında çelik lif içeren elemanların kırılma yükleri ise 4,9 kN ile 5,6 kN arasında değişmektedir (Şekil 7.10). Elemanlardan birinde kırılma yükünden daha büyük yük değerine ulaşıldığı görülmüştür. Lif dağılımının uniform olmamasından ve bu elemanın lif içeriğinin fazla olmasından dolayı böyle bir durumun geliştiği düşünülmektedir.



Şekil 7.10. %0,99 çelik lif içeren elemanların yük-deplasman grafikleri

Lifsiz ve hacimce %0,33; %0,66 ve %0,99 oranlarında çelik lif içeren çentikli eğilme elemanlarının, 3 noktalı eğilme deney sonuçlarından elde edilen verilerin ortalaması alınmış ve bu ortalama değere yakın olan numunelerin grafikleri Şekil 7.11’da verilmiştir.



Şekil 7.11. Lifsiz ve çelik lif içeren elemanların ortalama yük-deplasman grafikleri

Grafiklerdeki yük-düşey deplasman eğrilerinin altında kalan alanlardan yararlanılarak, her karışım için ortalama kırılma enerjisi ve ortalama eğilme dayanımı değerleri bulunmuştur. Bu değerler Çizelge 7.4’de verilmiştir.

Çizelge 7.4. Beton karışımların kırılma enerjileri ve eğilme dayanımları

Lif türü	Lifsiz	Karbon lif			Çelik lif		
Lif oranı (%)	0	0,22	0,43	0,65	0,33	0,66	0,99
Ortalama G_f	107,89	110,46	89,24	122,07	445,33	1149,52	2114,5
Ortalama eğilme dayanımı (MPa)	6,08	7,21	6,1	7,06	5,86	5,9	7,59

Düşük oranlarda karbon lif kullanılan elemanlarda, plastik rötre ve kuruma rötrelerinin neden olduğu çatlakların, lif içermeyen şahit elemanlara oranla daha az olduğu görülmüştür. Ancak elemanların yük-deplasman grafiklerinin altında kalan alanların ortalamasına bakıldığında, düşük oranda karbon lif kullanımının betonun tokluğunu çelik life göre çok fazla artırmadığı görülmektedir.

Kullanılan üç farklı karbon lif oranından, %0,22 oranına sahip elemanın kırılma enerjisi en yüksek iken, %0,43 oranına sahip elemanın kırılma enerjisi ise en düşük seviyede kalmıştır. Ortalama eğilme dayanımlarına baktığımızda ise, %0,22 ve %0,65 oranlarında

lif kullanımı betonun eğilme dayanımını lif içermeyen karışıma göre artırdığı, %0,43 oranında karbon lif kullanımının ise betonun eğilme dayanımını azalttığı görülmektedir.

Betonda kullanılan 3 farklı orandaki çelik liflerin, tıpkı karbon lifler gibi betonda oluşan rötreleri azalttığı görüldü. Ancak karbon liflerden farklı olarak, betonda düşük oranlarda çelik lif kullanımının betonun kırılma enerjisini 10 ile 15 kat arasında artırdığı görüldü. Kırılma enerjisi (G_f) ve kullanılan çelik lif oranı (V_f) arasındaki ilişki regresyon analizi yapılarak belirlenmiş ve Eş. 7.2’de verilmiştir.

$$G_f = 0,13e^{3V_f} \quad (7.2)$$

Karışımında farklı oranlarda çelik lif bulunduran çentikli eğilme elemanlarının kırılma enerjilerinin ortalamasına bakıldığında, hacimce %0,99 oranında çelik lif içeren eğilme elemanın en yüksek, %0,66 oranında çelik lif içeren elemanın ise en düşük kırılma enerjisine sahip olduğu görülmüştür. Çelik lifli betonları ortalama eğilme dayanımlarına bakıldığında %0,33 ve %0,66 oranlarında lif içeren elemanların, lif içermeyen şahit elemana göre bir fark içermediği, ancak %0,99 oranında lif kullanımının betonun eğilme dayanımını artırdığı görüldü.

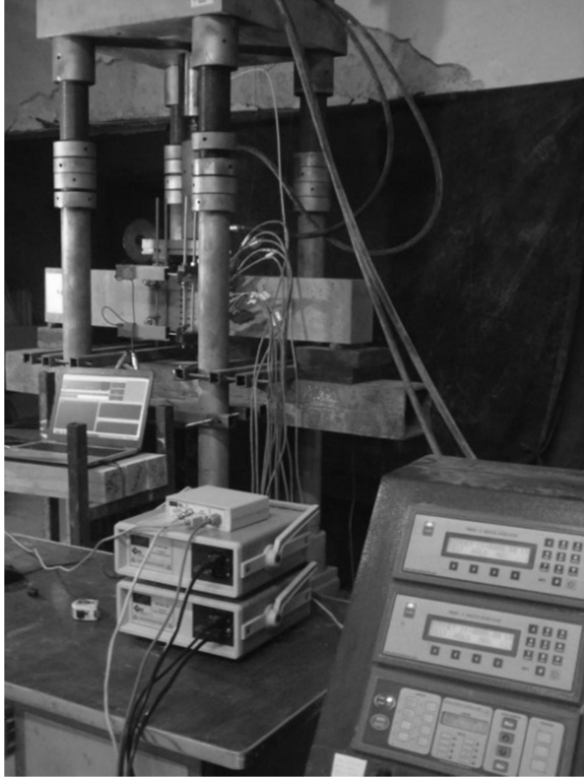
7.4. Dört Noktalı Betonarme Kiriş Deneyleri

Eurocode-2, kirişler için kullanılması gerekli olan minimum donatı oranını kiriş boyutlarına malzeme özelliklerine bağlı olarak tanımlamıştır. Yapılan deneysel çalışmada lif içermeyen karışımlar için minimum donatı oranı 0,00269 olmaktadır. Deneyde kullanılan donatı miktarları 1Ø8, 2Ø8 ve 3Ø8 sırasıyla 0,00167; 0,00335 ve 0,00502 donatı oranlarına karşılık gelmektedir. Betonarme kirişlerin minimum donatı hesabını belirlemek amacıyla üretilen kirişler üzerinde 4 noktalı eğilme deneyleri uygulandı (Resim 7.5). Tek donatılı kirişlerde yaklaşık olarak 20 mm düşey deplasman değerlerinde donatıda kopma meydana geldi. Bu yüzden diğer kirişlerin de düşey deplasman değerleri 20 mm değerine ulaşıncaya dek deneylere devam edilmiştir.

Eğrilik ölçümleri için lif içermeyen 1Ø8 donatılı eğilme elemanında, kiriş orta noktasının 6 cm sol ve 6 cm sağ mesafesine, kiriş alt ve üst yüzey seviyesinde birer adet olmak üzere iki adet elektronik deplasman ölçer (LVDT) yatay olarak kullanıldı. Ancak bu elemanda

kullanılan 12 cm'lik ölçüm aralığı çatlak açılımını belirlemek için yetersiz olduğundan diğer elemanlarda ölçüm mesafesi 34 cm yapılmıştır.

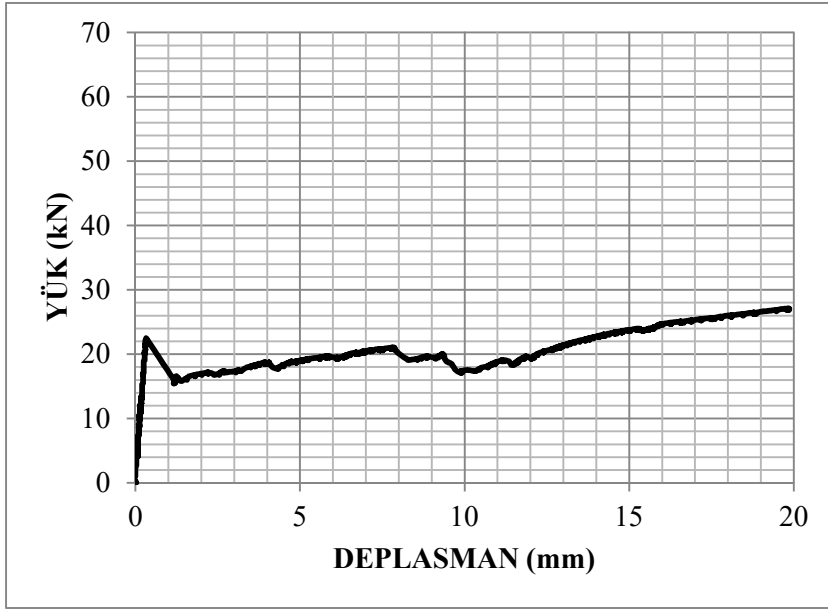
Kirişlerin yüzeyindeki birim şekil değiştirmeleri ölçmek amacıyla, birim deformasyon ölçerler kullanıldı. Çatlama yükünden sonra gelişen bazı çatlaklar, birim deformasyon ölçerlere zarar verdiğinden ve strain yerleşmesine neden olduklarından dolayı, çatlak altında kalan birim deformasyon ölçerlerden hatalı ölçüm alınmasına neden olmuşlardır. Bu yüzden çatlak noktasından sonraki yükleme değerlerinde kiriş yüzeyindeki birim deformasyon değişimleri eğrilik ölçümü için kullanılan iki adet LVDT ile kontrol edildi.



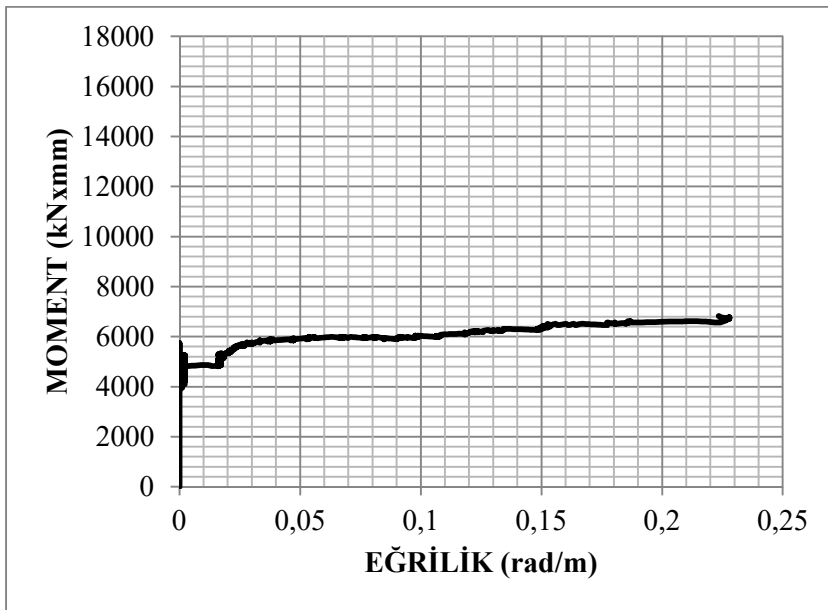
Resim 7.5. Betonarme kirişlerin 4 noktalı yükleme deneyi

7.4.1. NF A1 S2

Lifsiz beton karışımı kullanılarak üretilen ve 1Ø8 donatı içeren kontrol elemanı ile 4 noktalı eğilme deneyi yapıldı. Üst ve alt kiriş yüzü seviyesinden 1 cm mesafe bırakılmış, üst kısma 1,5 cm ve alt kısma da 2 cm arayla yerleştirilmek üzere 11 adet birim deformasyon ölçer kullanılmıştır. Elde edilen yük-deplasman ve moment-eğrilik grafikleri Şekil 7.12'de verildi.



(a)

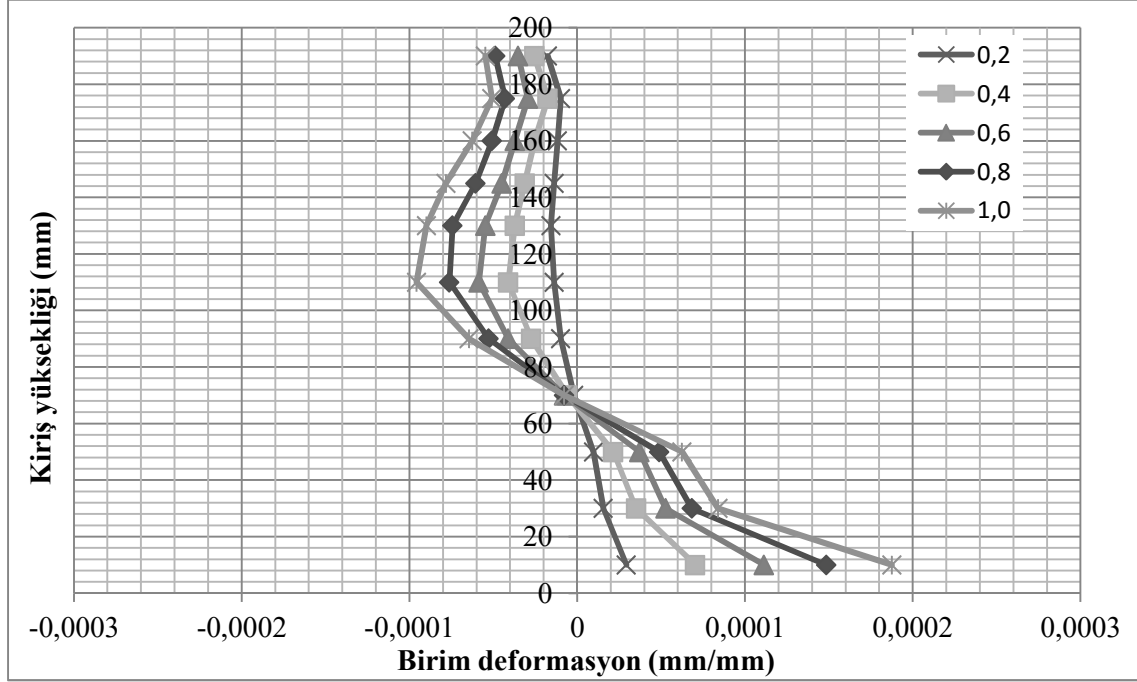


(b)

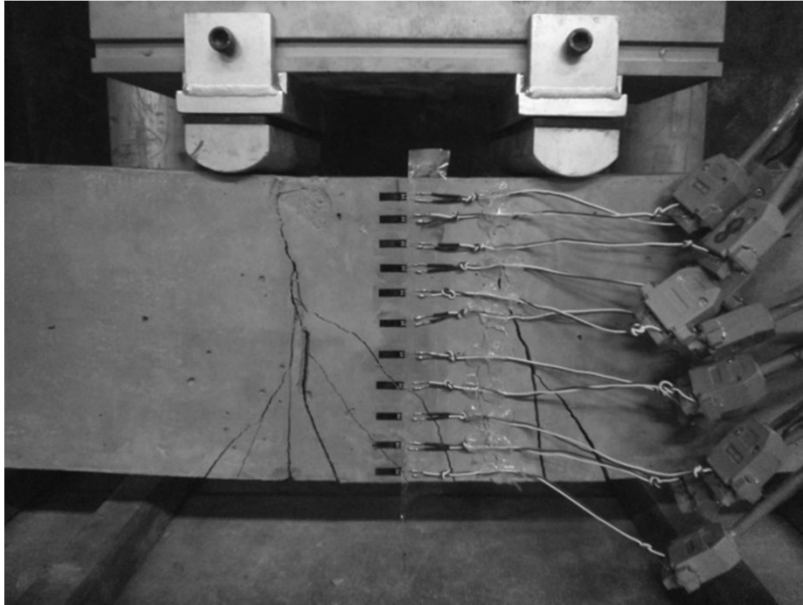
Şekil 7.12. NF A1 S2 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği

Kiriş yüzünde oluşan birim deformasyon değerleri ilk kırılma yükünün belirli değerleri için aşağıdaki Şekil 7.13’de verilmiştir. Elde edilen verilerden lifsiz tek donatılı betonun gerilme dağılımının, normal betonun gerilme dağılımına benzediği ve yükün artmasıyla beraber basınç bölgesindeki lineerliğin bozulduğu görülmektedir. Artan yüklerle beraber kirişin tarafsız ekseninin konumunda bir değişme olmamıştır. Eğilmeye neden olan ve giderek artan yükün, kiriş tarafından artan deformasyonlarla karşılanmaya çalışıldığı görülmüştür. Kirişin çekme bölgesinde, yükün artmasıyla beraber deformasyon

değişimlerinde lineer bir artış görülürken, basınç bölgesindeki lineer değişim yaklaşık 115 mm yükseklikten sonra bozulmuştur.



Şekil 7.13. NF A1 S2 elemanında yük-birim deformasyon grafiği



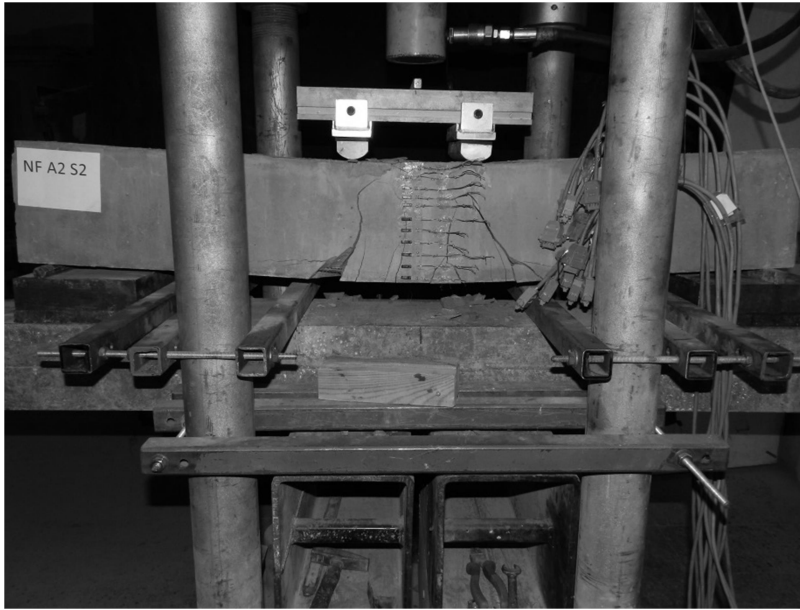
Resim 7.6. NF A1 S2 elemanında eğilme çatlakları

Eğilme elemanı 22,48 kN olan çatlama yüküne ve buna karşılık gelen 0,329 mm düşey deplasman ve 0,00143 rad/m eğrilik değerine ulaşmasıyla kirişte ani çatlak oluşmuştur. Bu çatlama dayanımından sonra eleman taşıma gücünü yaklaşık olarak %25 oranında

kaybetmiştir. Kiriş, düşey deplasman değeri 4,89 mm ve eğrilik değeri 0,030 rad/m değerine karşılık gelen 18,89 kN eğilme yüküne ulaştığında donatıda akma meydana gelmiştir. Deplasmanın yaklaşık olarak 10 mm'ye ulaşmasından sonra ise donatı birim şekil değiştirme değeri 0,04 değerine ulaştığından, donatıda pekleşme gerçekleşmiştir. Deney sonunda kiriş yükü 27,29 kN ve eğriliğin 0,228 rad/m değerine ulaşmıştır. Düşey deplasman değeri 20 mm'ye ulaştığında deneye son verilmiştir.

7.4.2. NF A2 S2

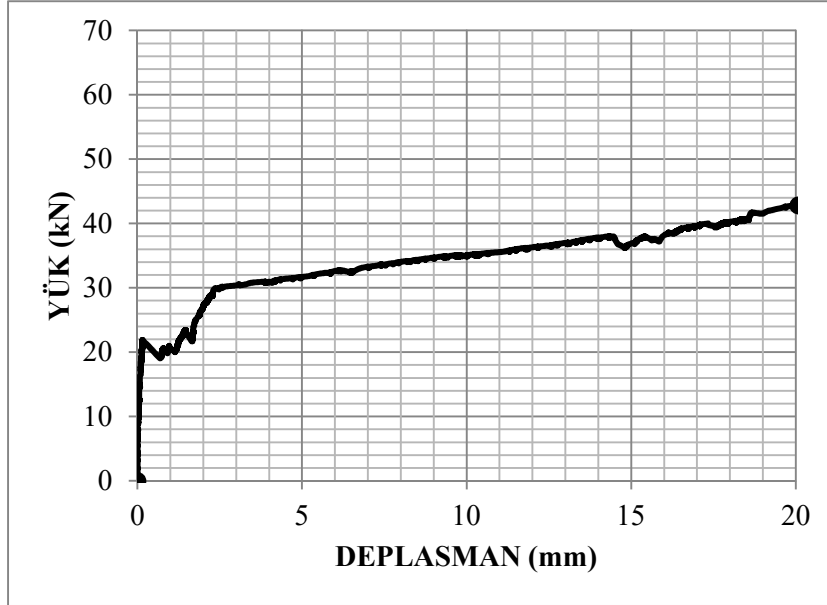
Lif içermeyen ve 2Ø8 donatı miktarına sahip kontrol elemanı üzerinde dört noktalı eğilme deneyi yapıldı. Kiriş üstünden ve kiriş altından 1 cm bırakılmış, üstteki 5 tanesi 1,5 cm arayla alttaki 6 tanesi de 2 cm arayla yerleştirilmek üzere 11 adet birim deformasyon ölçer kullanılmıştır.



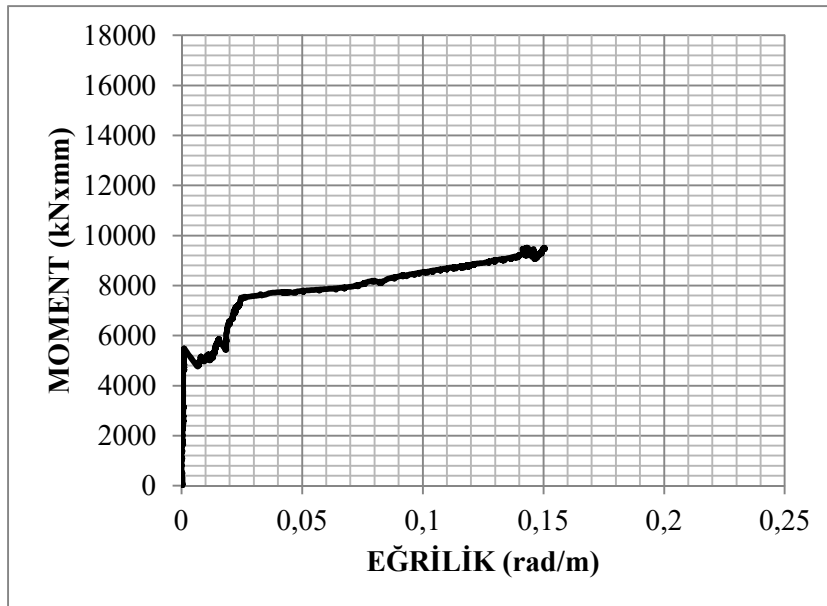
Resim 7.7. NF A2 S2 elemanında eğilme çatlakları

Eğrilik ölçümleri için kiriş orta noktasının 17 cm sol ve 17 cm sağ tarafında, kirişin hem alt hem de üst yüzey seviyesine yatay LVDT'ler yerleştirildi. Kirişin üst ve alt lif hizasına yerleştirilen elektronik deformasyon ölçerler aracılığıyla elde edilen verilerden, moment-eğrilik grafiği Şekil 7.14-b'de, yük-deplasman grafiği ise Şekil 7.14-a'da verilmiştir. Kiriş çatlama yükü 21,92 kN değerine ulaştığında, düşey deplasman değeri 0,152 mm ve eğrilik ise 0,00115 rad/m olarak ölçüldü. Kiriş çatlama yüküne kadar elastik davranış

sergilemiştir. Kesitte çatlak oluşuktan sonra yükte yaklaşık %10 oranında bir azalma olmuştur. Ancak donatıdaki akma noktası kiriş yükü 1,418 mm düşey yükte meydana gelmiştir. Donatının aktığı anda kiriş üzerinde 23,03 kN düşey yük ve 0,0150 rad/m eğrilik ölçümü alındı.



(a)

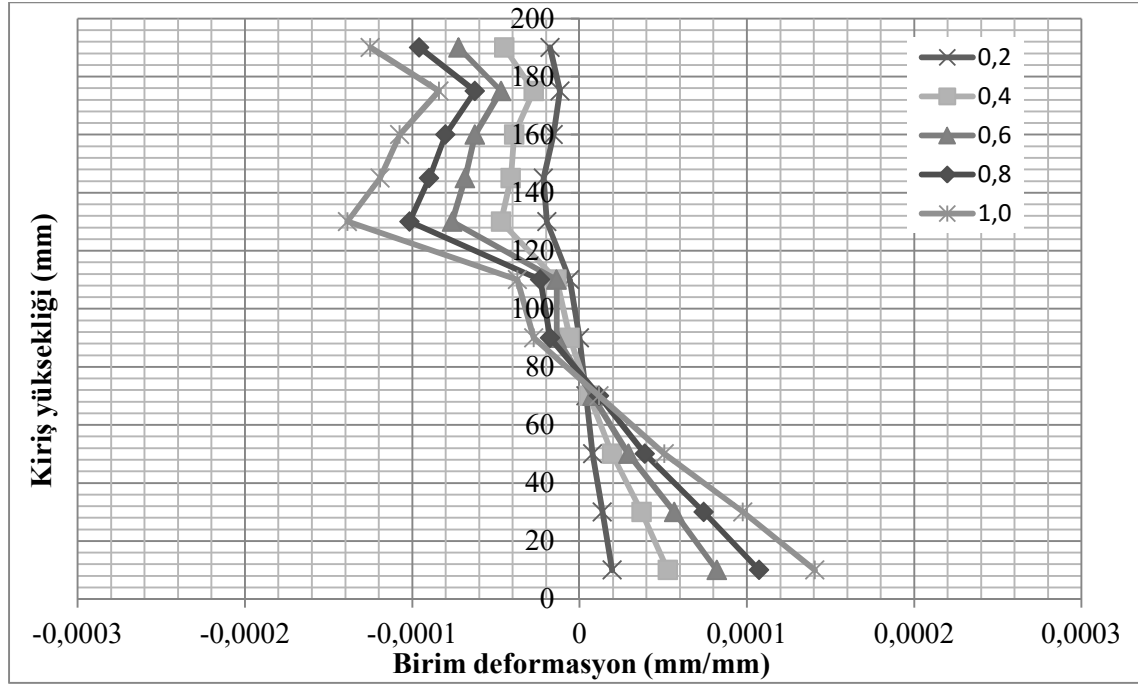


(b)

Şekil 7.14. NF A2 S2 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği

Kiriş yüzünde oluşan birim deformasyon değerleri, ilk kırılma yükünün belirli yüzdelğinde aşağıdaki Şekil 7.15’de verilmiştir. Artan yüklerle beraber kirişin tarafsız

ekseninin konumunda bir değişme olmamıştır. Eğilmeye neden olan ve giderek artan yükün, kiriş tarafından artan deformasyonlarla karşılanmaya çalışıldığı görülmüştür. Kirişin çekme bölgesinde, yükün artmasıyla beraber deformasyon değişimlerinde lineer bir artış görülürken, basınç bölgesindeki lineer değişim yaklaşık 130 mm yükseklikten sonra bozulmuştur

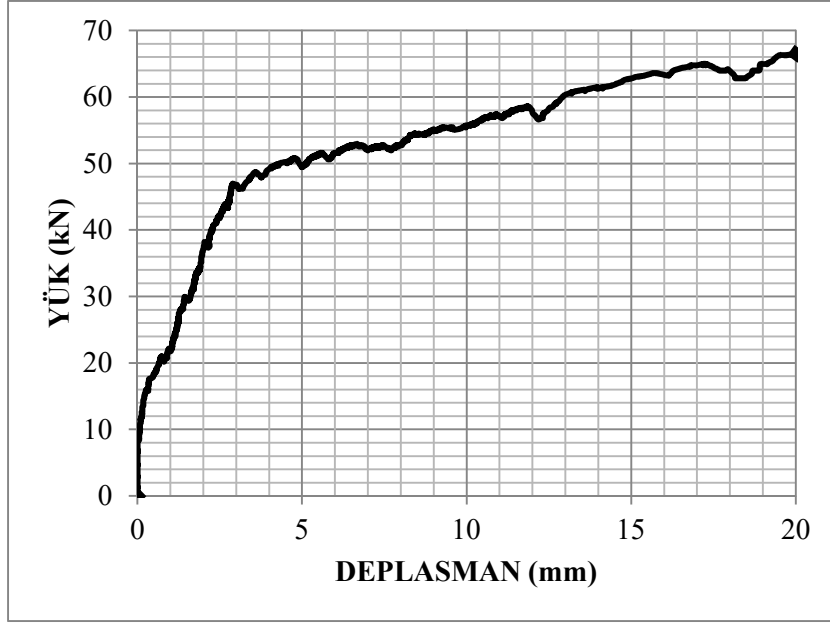


Şekil 7.15. NF A2 S2 elemanında yük-birim deformasyon grafiği

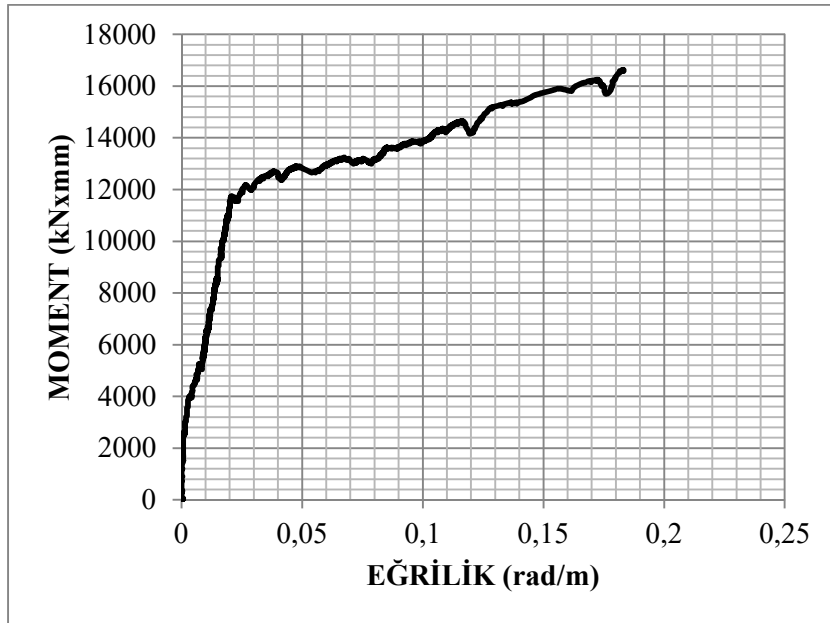
7.4.3. NF A3 S2

Lif içermeyen betondan üretilen ve 3Ø8 donatı içeren eleman üzerinde 4 noktalı eğilme deneyi yapıldı. Üst ve alt kiriş yüzü seviyesinden 1 cm mesafe bırakılmış, 2 cm arayla yerleştirilmek üzere 10 adet birim deformasyon ölçer kullanılmıştır. Kirişin üst ve alt lif hizasına yerleştirilen elektronik deformasyon ölçerler aracılığıyla elde edilen verilerden, moment-eğrilik grafiği Şekil 7.16-b'de, yük-deplasman grafiği ise Şekil 7.16-a'da verilmiştir.

Deney elemanında, önceki iki kirişten farklı olarak yük azalması görülmemiştir. Bunun nedeni diğer kirişlere oranla daha fazla kullanılan çekme donatısının makro boyutta köprüleme yapması ve çatlakların ani gelişimini önlemesiyle, elemanı betonarme kiriş gibi davranmaya zorlamasıdır.



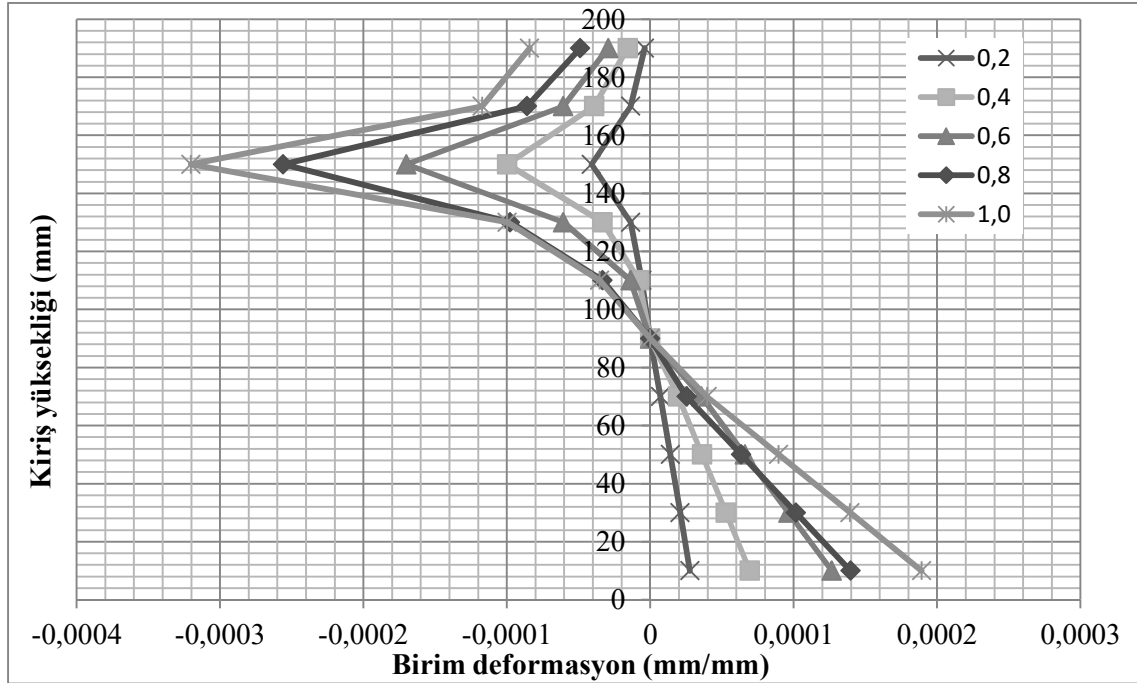
(a)



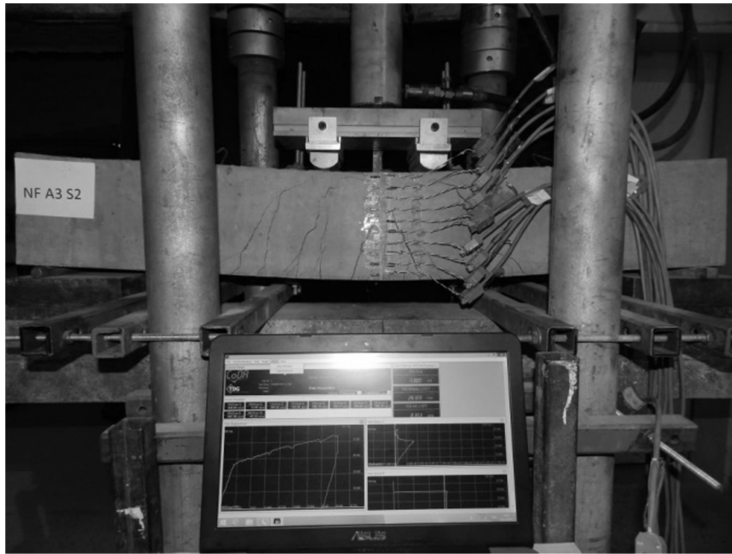
b)

Şekil 7.16. NF A3 S2 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği

Kiriş yükü 15,8 kN değerine ulaştığında, düşey deplasman 0,277 mm ve eğrilik de 0,00306 rad/m değerlerine gelmiştir. Yük-deplasman grafiğinde, yükün 43,138 kN ve düşey deplasmanın 2,62 mm değerine ulaşmasıyla donatıda akma meydana gelmiştir. Donatı akma anında eğriliğin 0,0185 olduğu görüldü. Düşey deplasman değeri yaklaşık 20 mm değerine ulaşmasıyla deneye durdurulmuş ve bu noktadaki yük ve eğrilik sırasıyla 66,52 kN ve 0,183 rad/m olarak ölçüldü. Kiriş yüzünde oluşan birim deformasyon değerleri, ilk kırılma yükünün belirli yüzdelinde aşağıdaki Şekil 7.17’de verilmiştir.



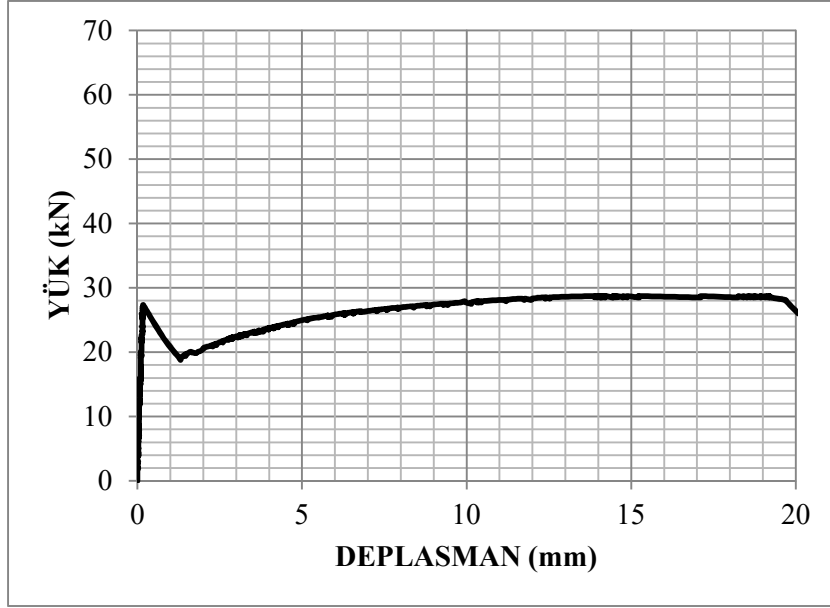
Şekil 7.17. NF A3 S2 elemanında yük-birim deformasyon grafiği



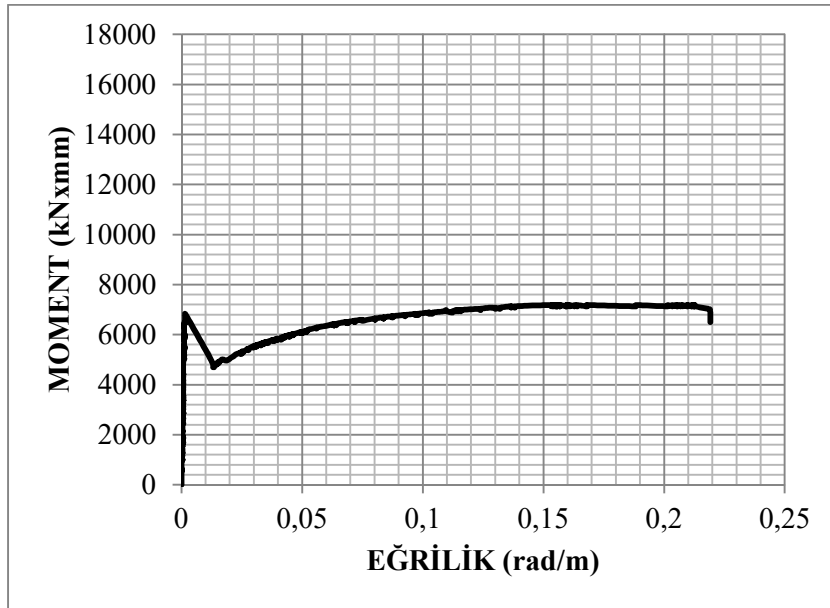
Resim 7.8. NF A3 S2 elemanında çatlakları

7.4.4. CF A1 S1

Hacimce %0,43 karbon lif içeren beton karışımından üretilen ve 1Ø8 donatı bulunduran eğilme elemanı üzerinde, kurulan düzenek yardımıyla 4 noktalı eğilme deneyi yapıldı. Üst ve alt kiriş yüzü seviyesinden 1 cm mesafe bırakılmış, 2 cm arayla yerleştirilmek üzere 10 adet birim deformasyon ölçer kullanılmıştır. Elde edilen yük-deplasman ve moment-eğrilik grafikleri Şekil 7.18'de verildi.



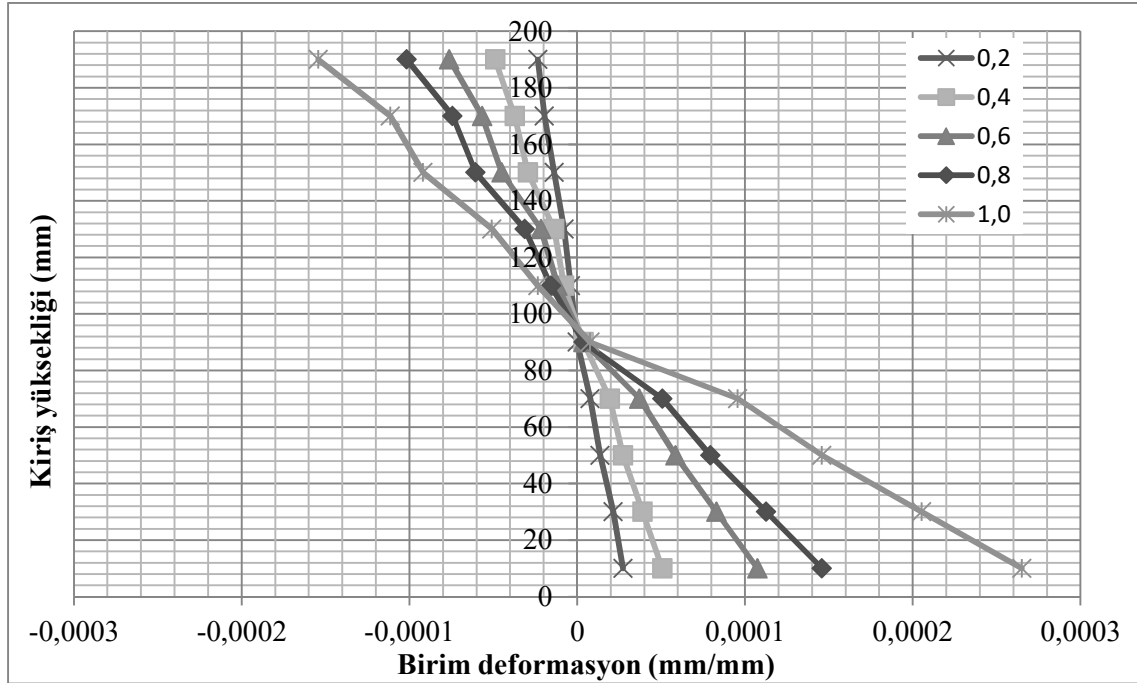
(a)



(b)

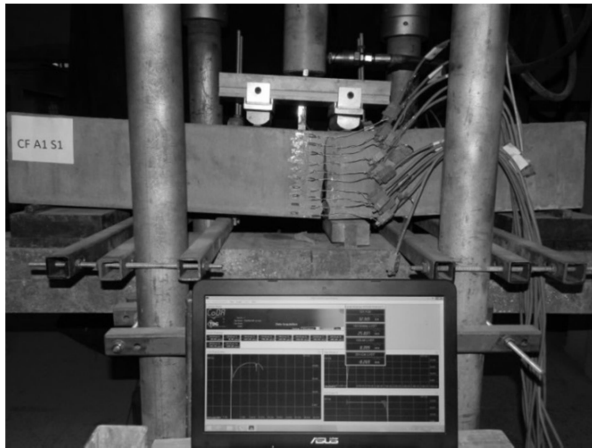
Şekil 7.18. CF A1 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği

Kiriş yüzünde oluşan birim deformasyon değerleri ilk kırılma yükünün belirli değerleri için aşağıdaki Şekil 7.19’da verilmiştir. Elde edilen verilerden, beton içerisinde karbon lif kullanımının betonun basınç bölgesindeki birim deformasyon değişimini lineer hale dönüştürmüştür. Artan yüklerle beraber kirişin tarafsız ekseninin konumunda bir değişme olmamıştır. Eğilmeye neden olan ve giderek artan yükün, kiriş tarafından artan deformasyonlarla karşılanmaya çalışıldığı görülmüştür. Kirişin çekme ve basınç bölgesinde, yük ile beraber deformasyon değişimlerinde lineer bir artış görülmüştür.



Şekil 7.19. CF A1 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği

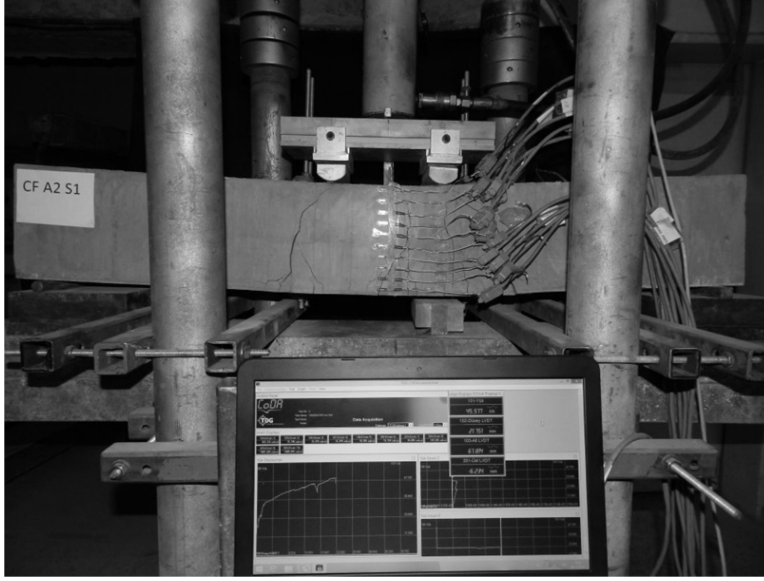
Hacimce %0,43 karbon lif içeren deney elemanının çatlama yükünün 27,32 kN, bu yük değerindeki düşey deplasmanın 0,176 mm ve eğriliğin 0,00153 rad/m olduğu görüldü. Çatlama yüküne kadar elastik bir davranış gösteren elemanda, maksimum yükten sonra ani gelişen çatlağın etkisiyle yükte düşme gözlenmiştir. Düşey deplasman 1,31 mm ve eğrilik 0,0143 olduğu noktada kiriş yükü akma dayanımı olan 19,01 kN değerine ulaşmıştır. Ancak donatıdaki pekleşmeden dolayı, deneyin sonuna doğru kiriş yükü 26,03 kN ve eğrilik 0,219 rad/mm değerine ulaşmıştır. Düşey deplasman değeri 20 mm'ye ulaştığında deneye son verilmiştir.



Resim 7.9. CF A1 S1 elemanında eğilme çatlağı

7.4.5. CF A2 S1

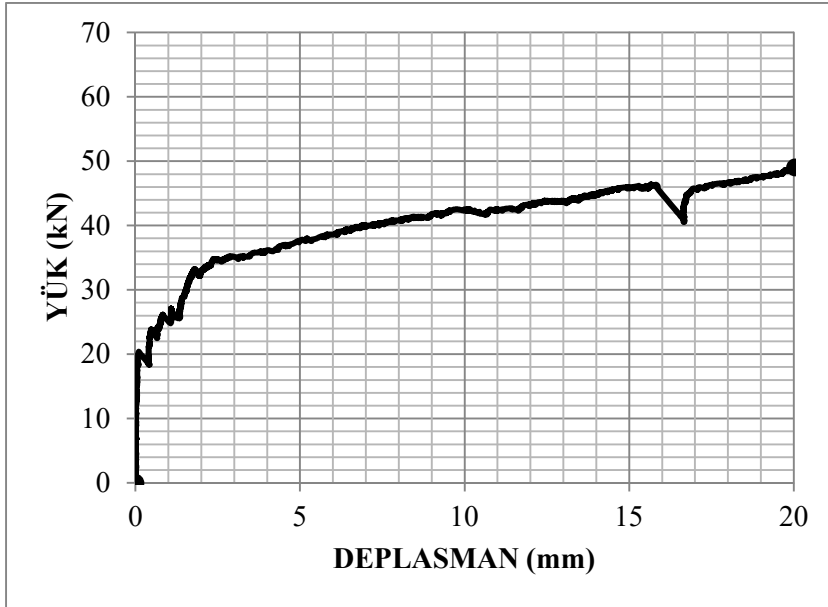
Hacimce %0,43 karbon lif içeren beton karışımından üretilen ve 2Ø8 donatı bulunduran eğilme elemanına 4 noktalı eğilme testi yapıldı. Üst ve alt kiriş yüzü seviyesinden 1 cm mesafe bırakılarak, 2 cm arayla yerleştirilen 10 adet birim deformasyon ölçerler ile kiriş yüzünde eğilmeden kaynaklanan birim deformasyonlar ölçüldü. Kiriş orta bölgesine yerleştirilen deplasman ölçerler yardımıyla eğrilik ölçümleri alındı.



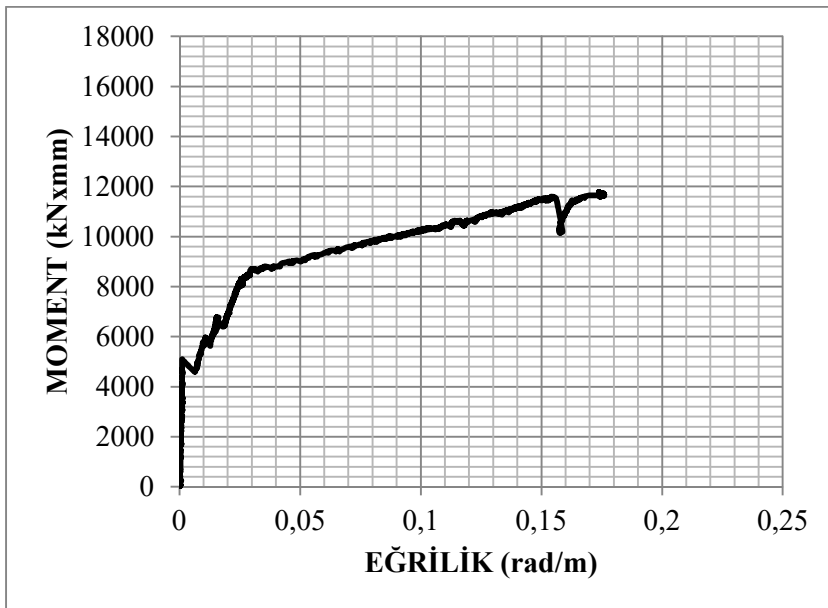
Resim 7.10. CF A2 S1 elemanında eğilme çatlakları

Eğrilik ölçümleri için kiriş orta noktasının 14 cm sol ve 14 cm sağ tarafında, kirişin hem alt hem de üst yüzey seviyesine yatay LVDT'ler yerleştirildi. Kirişin üst ve alt lif hizasına yerleştirilen elektronik deformasyon ölçerler aracılığıyla elde edilen verilerden, moment-eğrilik grafiği Şekil 7.20-b'de, yük-deplasman grafiği ise Şekil 7.20-a'da verilmiştir.

Hacimce %0,43 karbon lif içeren deney elemanının çatlama yükü 20,2 kN olduğu görüldü. Ayrıca elemanın çatlama yükünde 0,126 mm düşey deplasman ve 0,00154 rad/m eğrilik değerine ulaştığı görüldü. Çatlama yüküne kadar elastik bir davranış gösteren elemanda, maksimum yükten sonra yükte 2 kN değerinde düşme gözlenmiştir. Kiriş yükü 24,05 kN ve 0,73 kN düşey deplasman değerine ulaştığında, eleman üzerindeki eğrilik 0,0180 rad/m olarak ölçüldü, bu yük değerinde donatıda akma meydana geldi. Elemanın düşey deplasman değeri yaklaşık 20 mm ulaşmasıyla deneye son verildi. Deney durdurulduğunda eleman üzerindeki yük 49,05 ve eğrilik 0,162 olarak belirlendi.



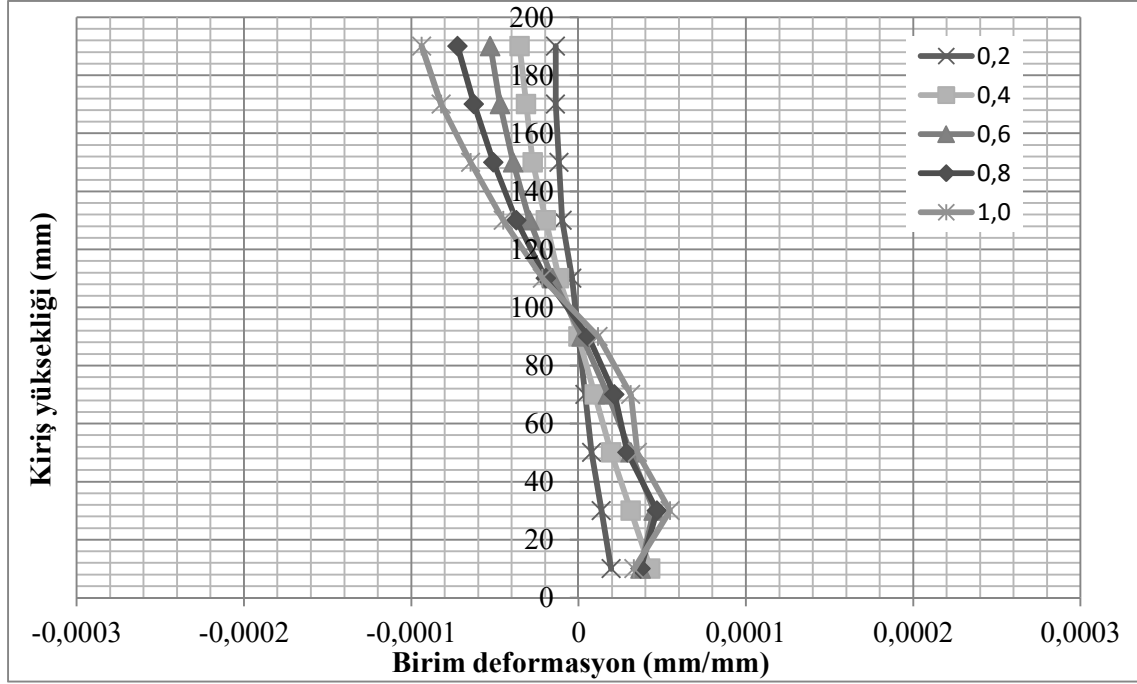
(a)



(b)

Şekil 7.20. CF A2 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği

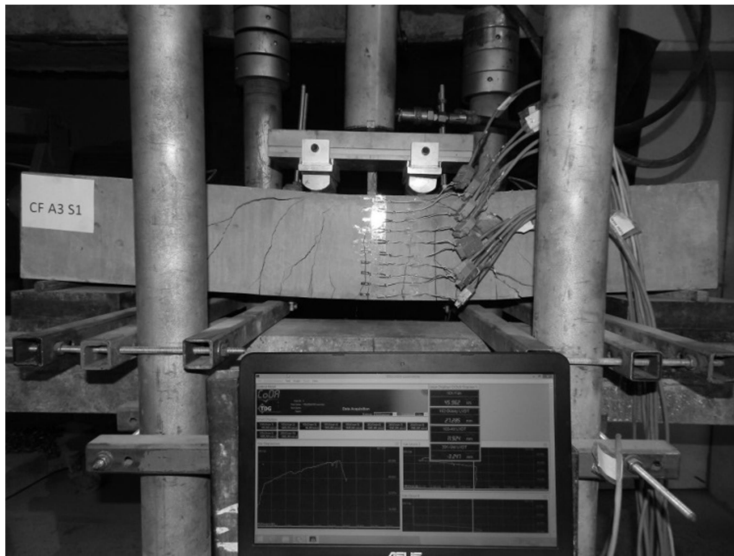
Kiriş yüzünde oluşan birim deformasyon değerleri, ilk kırılma yükünün belirli yüzdelğinde aşağıdaki Şekil 7.21’de verilmiştir. Artan yüklerle beraber kirişin tarafsız ekseninin konumunda bir değişme olmamıştır. Eğilmeye neden olan ve giderek artan yükün, kiriş tarafından artan deformasyonlarla karşılanmaya çalışıldığı görülmüştür. Kirişin basınç bölgesinde, yükün artmasıyla beraber deformasyon değişimlerinde lineer bir artış görülürken, basınç bölgesindeki donatı artışından dolayı birim deformasyon değerlerinde sınırlı artış görülmüştür.



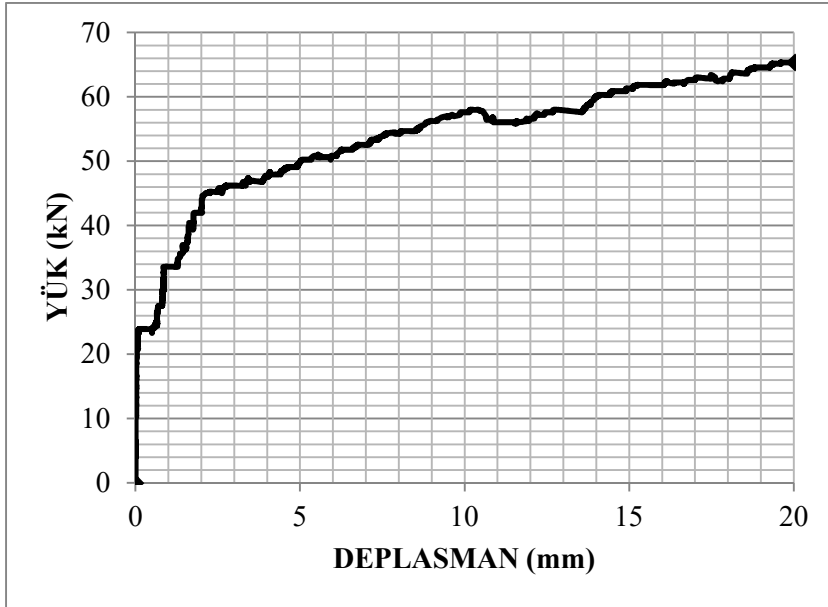
Şekil 7.21. CF A2 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği

7.4.6. CF A3 S1

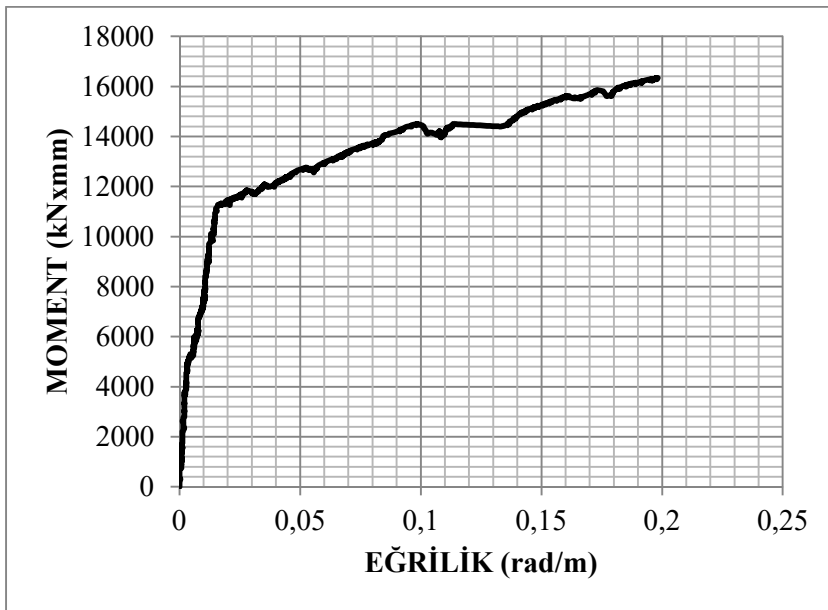
Hacimce %0,43 karbon lif içeren beton karışımından üretilen ve 3Ø8 donatı bulunduran betonarme kirişle 4 noktalı eğilme deney yapıldı. Kirişin arka yüzüne yatay olarak yerleştirilen yatay LVDT'ler yardımıyla Şekil 7.22-b'de verilen moment-eğrilik grafiği, çizilmiştir.



Resim 7.11. CF A3 S1 elemanında eğilme çatlakları



(a)

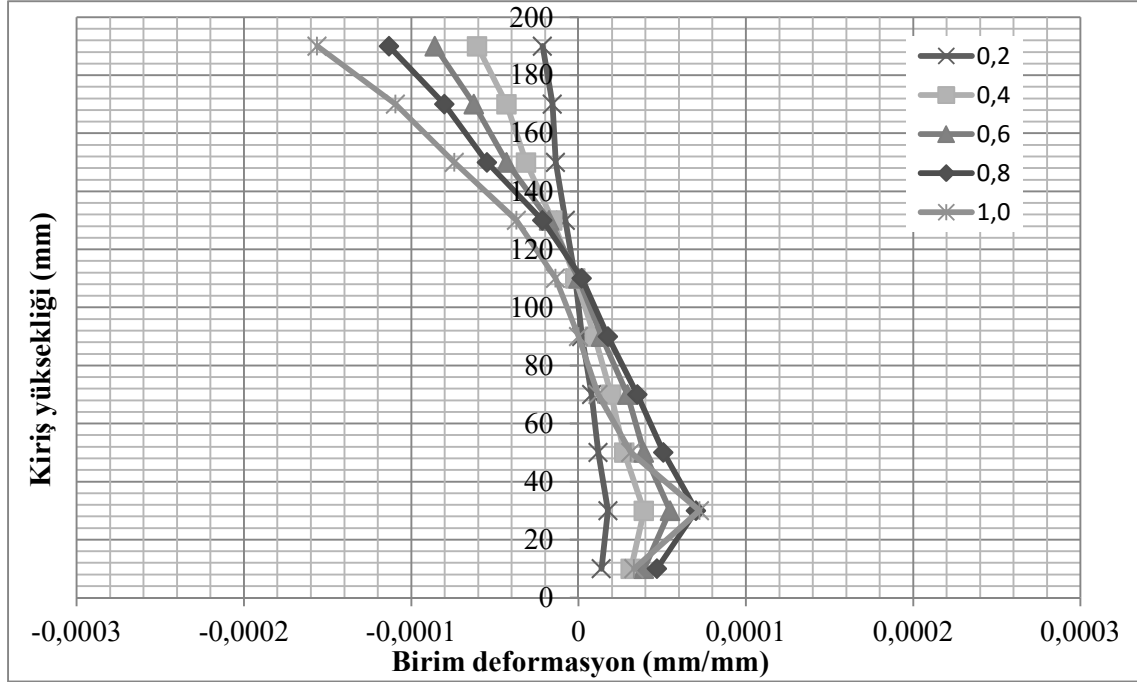


(b)

Şekil 7.22. CF A3 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği

Kirişin çatlama dayanımı 23,91 kN, bu yük değerindeki düşey deplasman ve eğrilik değerleri sırasıyla 0,101 ve 0,00580 olarak ölçüldü. Kirişin yük-deplasman ve moment-eğrilik grafiklerine bakıldığında, elemanın davranışının bi-lineer olduğu görülmüştür. Yük değerinin 45,83 kN, düşey deplasmanın 2,54 mm ve eğriliğin 0,0189 olduğu noktada meydana gelen donatı akması, kirişin davranışının değişmesine neden olmuştur. Düşey deplasman değeri 20 mm değerine ulaşmasıyla deneye son verildi. Deneye sonunda elemanın taşıdığı yük 65,36 kN ve eğriliği 0,187 rad/m olarak belirlendi. Kiriş yüzünde

oluşan birim deformasyon değerleri, ilk kırılma yükünün belirli yüzdelğinde aşağıdaki Şekil 7.23’de verilmiştir. Kirişte oluşan eğilme çatlaklarının, elemanın donatı oranıyla birlikte arttığı görüldü. Kiriş yüzünde oluşan birim deformasyon değişimlerinin yük ile doğru orantılı olarak çatlama yüküne kadar arttığı görüldü.



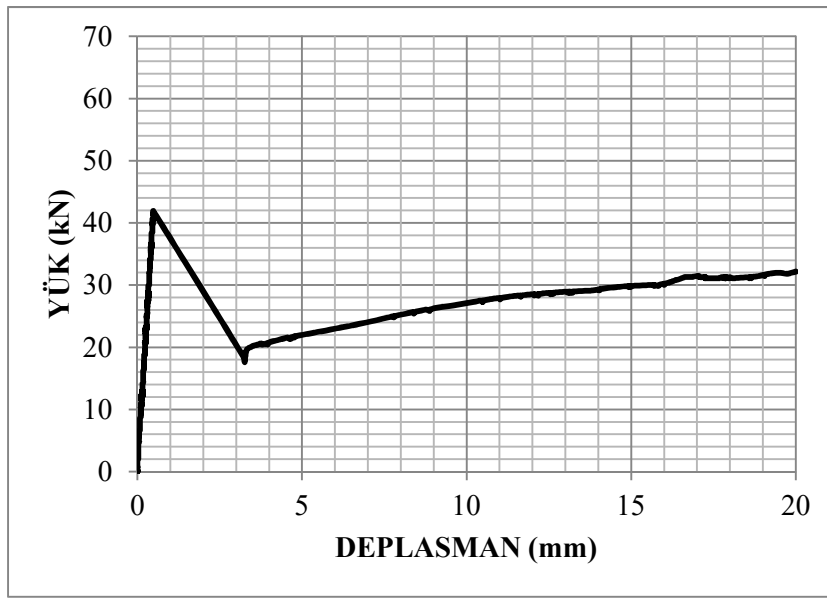
Şekil 7.23. CF A3 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği

7.4.7. CF B1 S1

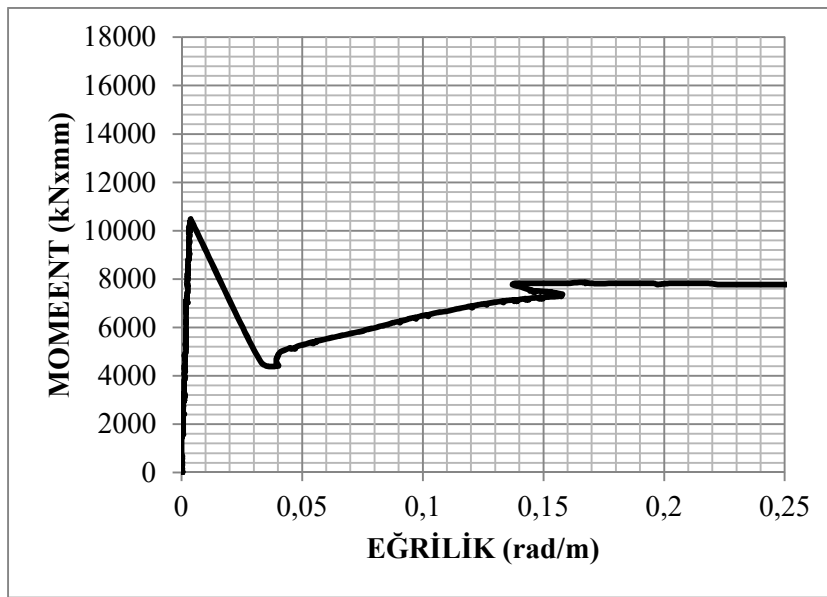
Karışımında hacimce %0,65 oranında karbon lif içeren betondan üretilen ve 1Ø8 donatı bulunduran betonarme kiriş ile yapılan 4 noktalı eğilme deneyi sonucunda, yük-deplasman, moment eğrilik ve yük-birim deformasyon eğrileri Şekil 7.24’de olduğu gibi elde edilmiştir. Birim şekil değiştirme ölçümleri için 11 adet birim deformasyon ölçer, eğrilik ölçümleri için 2 adet LVDT ve düşey deplasman ölçümleri için ise 1 adet LVDT kullanıldı.

Kiriş üzerindeki yükün 41,92 kN değerine ulaşmasıyla birlikte, kesitte ilk çatlakın oluştuğu görüldü. Çatlama yükünde düşey deplasman değeri 0,481 mm olurken, kiriş eğrilği 0,00384 olarak ölçüldü. Kiriş yükü, çatlama yükünden sonra ani olarak gelişen tek çatlakın etkisiyle aniden düşmüştür. Kiriş deneyleri deplasman kontrollü yapılamadığından dolayı, çatlama yükü ile yükün düşerek minimum değere ulaştığı nokta arasında ölçüm alınamadı. Ancak alabildiğimiz verilerden elde edilen sonuca göre, kirişin akma noktasının ölçüm

alınamayan iki bölge arasında olduğu görüldü. Kiriş üzerinde gelişen çatlağın geometrisinden dolayı kiriş yükü 31,1 kN ve düşey deplasman değeri 17,34 mm noktasında, kiriş arka yüzüne yerleştirilen ve eğrilik ölçümlerinde kullanılan yatay LVDT'lerden alt kısımda olanının ölçüm noktası ile bağlantısı kopmuştur. Aynı yükte ve 17,64 mm düşey deplasman değerinde ise üstteki LVDT'den veri alımı durmuştur. Bundan dolayı kirişin, belirtilen yük ve deplasman değerlerinden sonra moment-eğrilik grafiği çizilemedi. Düşey deplasman değeri yaklaşık 20 mm değerine ulaştığında, kiriş üzerindeki yükün 31,17 kN olduğu görüldü ve deney sonlandırıldı.



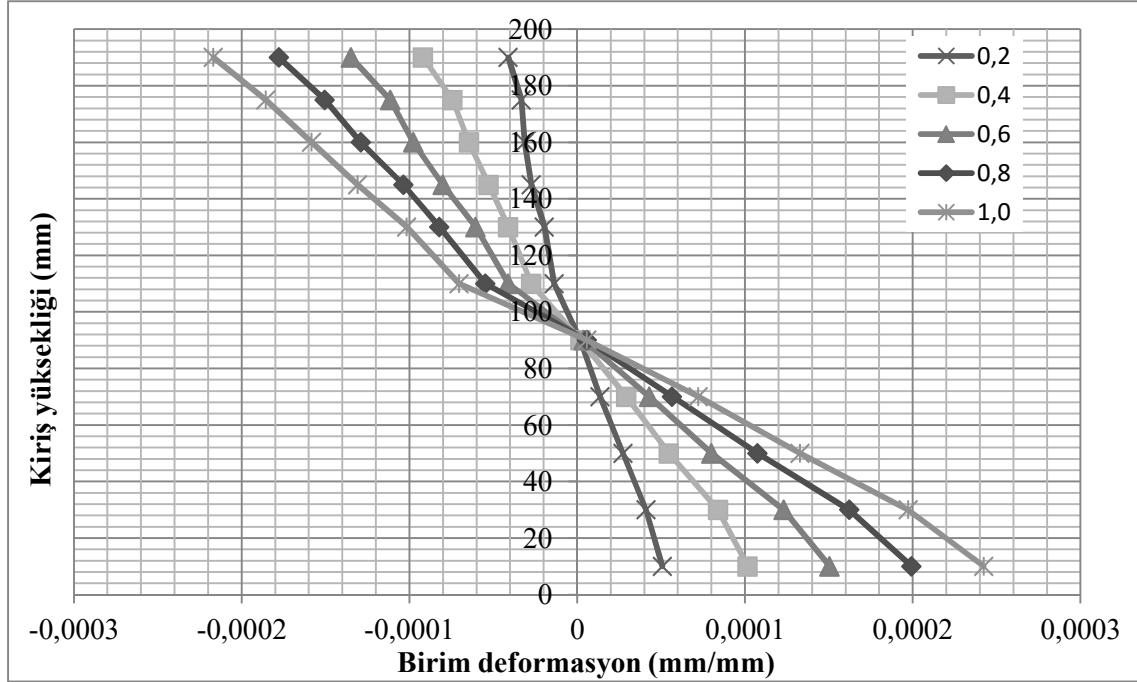
(a)



(b)

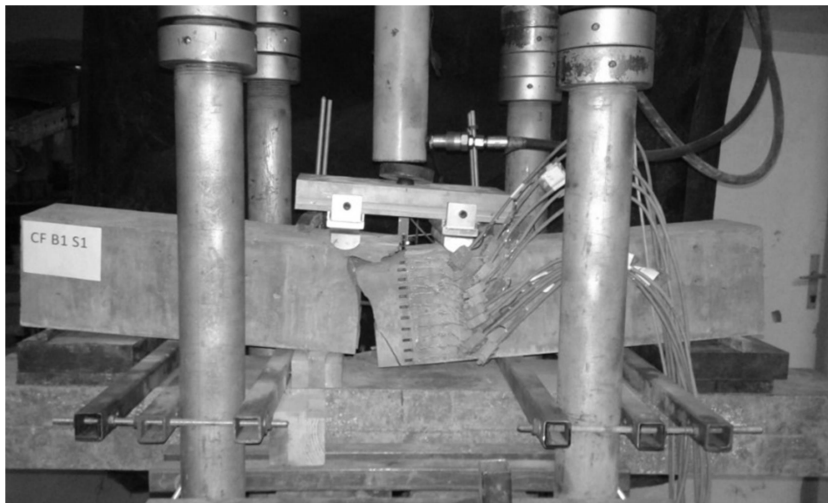
Şekil 7.24. CF B1 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği

Kiriş yüzünde oluşan birim deformasyon değerleri ilk kırılma yükünün belirli değerleri için aşağıdaki Şekil 7.25’de verilmiştir. Elde edilen verilerden, beton içerisinde karbon lif kullanımının betonun basınç bölgesindeki birim deformasyon değişimini lineer hale dönüştürdüğü görülmüştür.



Şekil 7.25. CF B1 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği

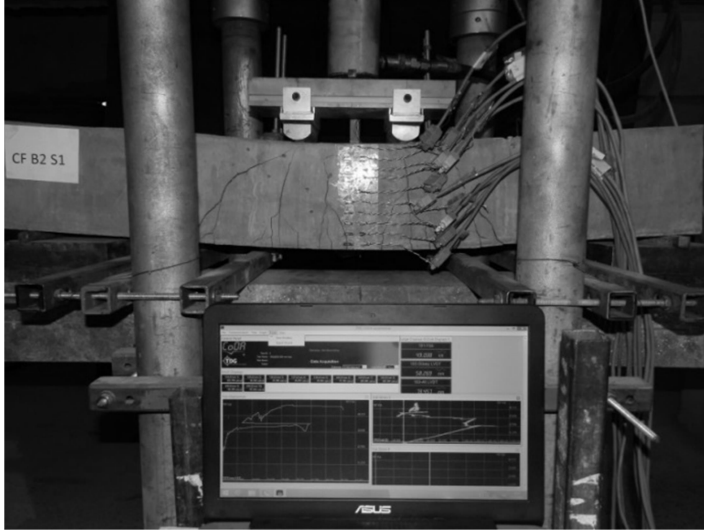
Deney sonunda kiriş üzerinde oluşan gevrek eğilme çatlağı görünümü Resim 7.12’de verilmiştir.



Resim 7.12. CF B1 S1 elemanında eğilme çatlağı

7.4.8. CF B2 S1

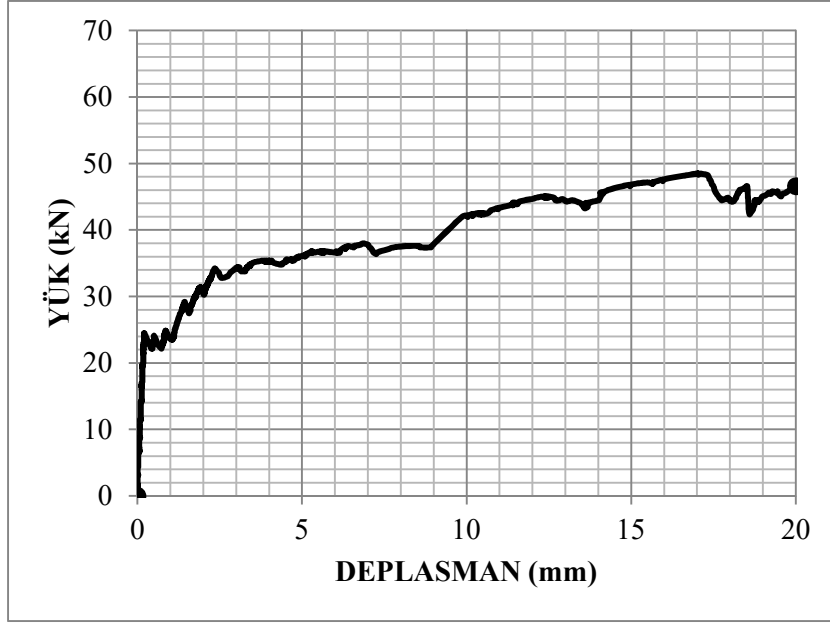
Hacimce %0,65 oranında karbon lif ve 2Ø8 donatı bulunduran betonarme kiriş ile 4 noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda yük-deplasman, moment eğrilik ve yük-birim deformasyon eğrileri elde edilmiştir. Birim şekil değiştirme ölçümleri için 10 adet birim deformasyon ölçer, eğrilik ölçümleri için 2 adet LVDT ve düşey deplasman ölçümleri için ise 1 adet LVDT kullanıldı.



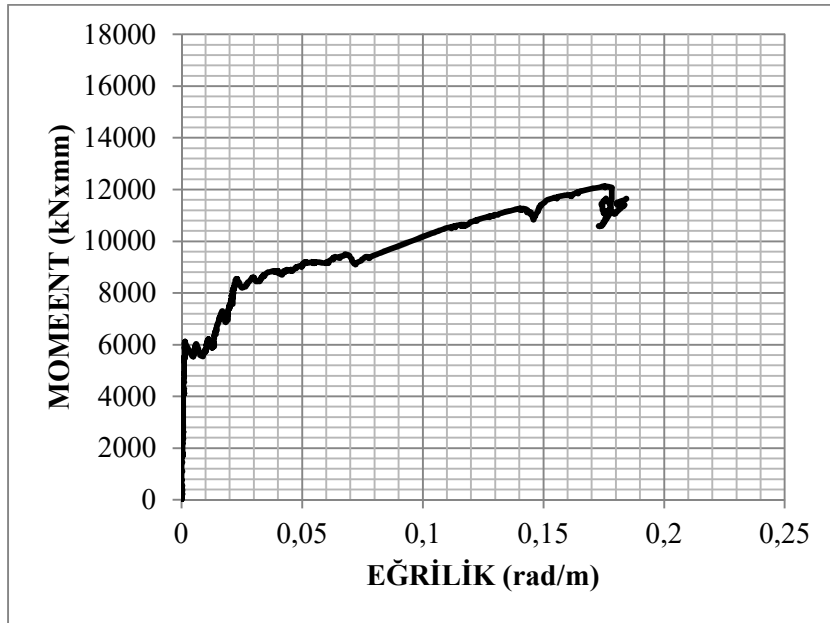
Resim 7.13. CF B2 S1 elemanında eğilme çatlakları

Eğrilik ölçümleri için kiriş orta noktasının 14 cm sol ve 14 cm sağ tarafında, kirişin hem alt hem de üst yüzey seviyesine yatay LVDT'ler yerleştirildi. Kirişin üst ve alt lif hizasına yerleştirilen elektronik deformasyon ölçerler aracılığıyla elde edilen verilerden, moment-eğrilik grafiği Şekil 7.26-b'de, yük-deplasman grafiği ise Şekil 7.26-a'da verilmiştir.

Deney sırasında çatlama yükünün 24,29 kN olduğu ve elemanın bu yüke kadar doğrusal davranış sergilediği görüldü. Çatlama yükünde elemanın düşey deplasman değeri 0,227 ve kiriş eğrilik değeri 0,00153 olarak kaydedildi. Çatlak oluşmasıyla yükte 2 kN azalma olmuş ancak donatının taşıdığı çekme yükü artmaya başlamıştır. Kiriş üzerindeki yük 25,44 kN ve düşey deplasman değeri 1,159 mm değerlerine ulaştığında kirişte akma meydana gelmiştir. Deney sonunda deplasman değeri yaklaşık 20 mm olduğunda kiriş yükünün 46,59 kN olduğu kaydedildi. Akma yükündeki eğrilik 0,0154 rad/m olarak ölçülürken, deney sonundaki eğrilik ise yaklaşık 12 kat artmış ve 0,184 rad/m olarak ölçülmüştür.



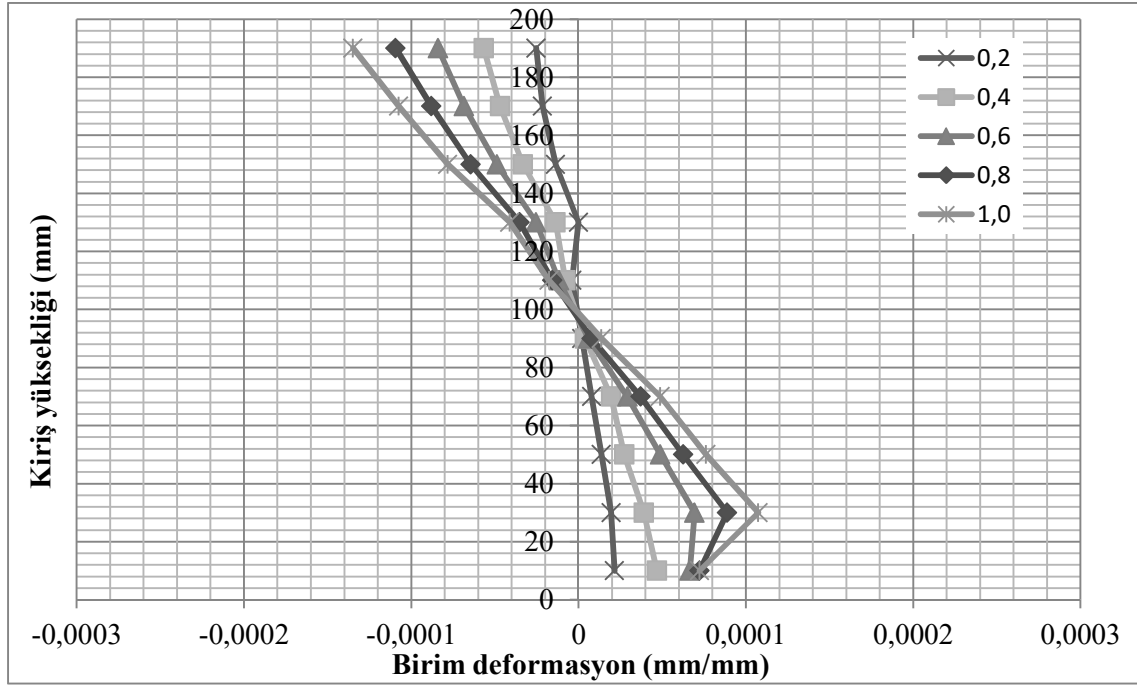
(a)



(b)

Şekil 7.26. CF B2 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği

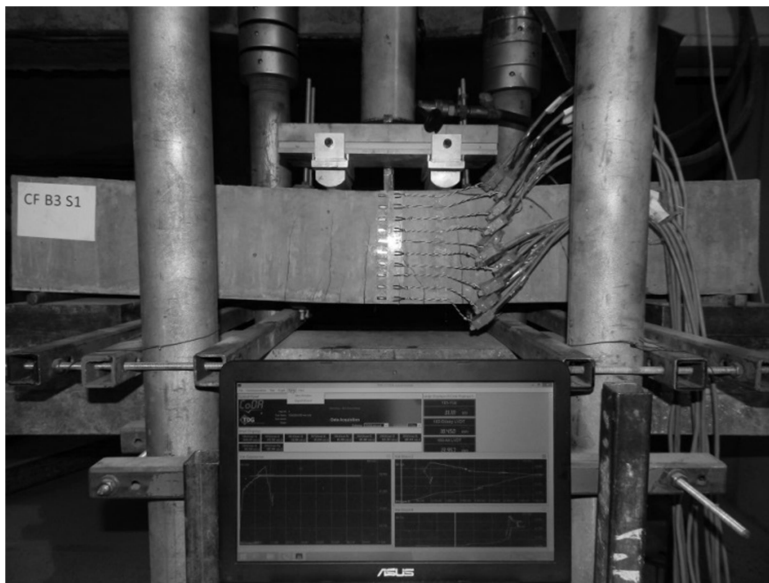
Kiriş yüzünde oluşan birim deformasyon değerleri, ilk kırılma yükünün belirli yüzdelğinde aşağıdaki Şekil 7.27’de verilmiştir. Donatı oranının artmasıyla birlikte kirişte oluşan çatlak sayısı da artarak davranış sünek bir hale gelmiştir. Kiriş yükünün artmasıyla birlikte, birim deformasyon ölçerler tarafından ölçülen şekil değiştirmelerinde yükle orantılı olarak arttığı görüldü.



Şekil 7.27. CF B2 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği

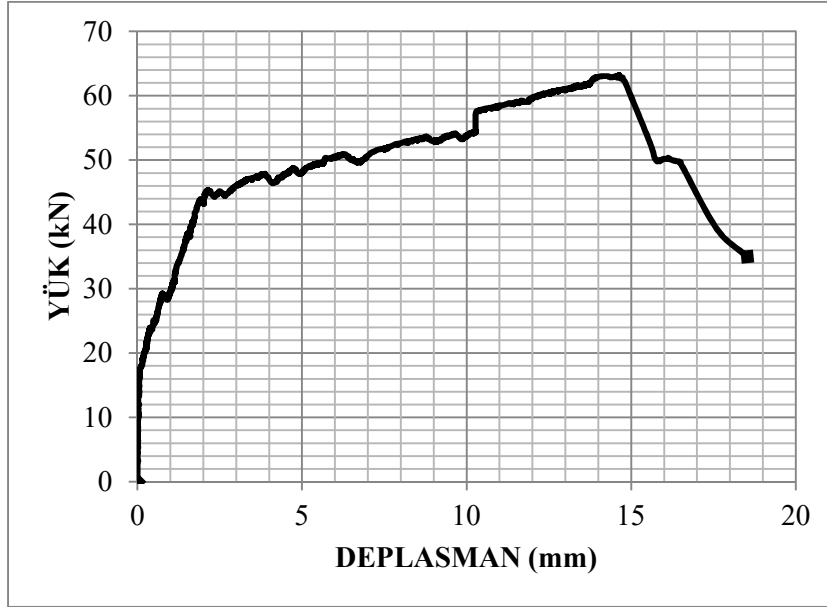
7.4.9. CF B3 S1

Hacimce %,65 oranında karbon lif ve 1Ø8 donatı bulunduran betonarme kiriş ile yapılan 4 noktalı eğilme deneyi sonucunda, yük-deplasman, moment eğrilik ve yük-birim deformasyon eğrileri elde edilmiştir.

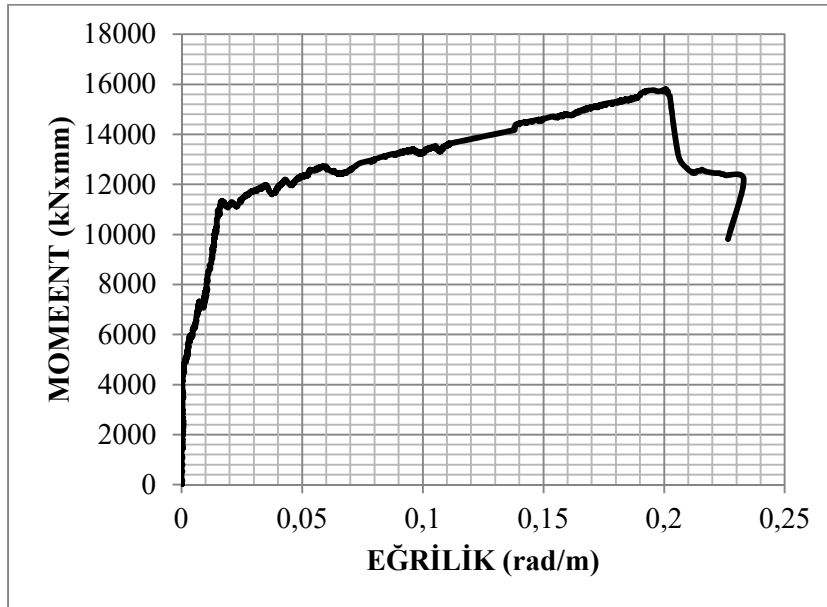


Resim 7.14. CF B3 S1 elemanında eğilme çatlakları

Birim şekil değıştirme ölçümleri için 10 adet birim deformasyon ölçer, eğrilik ölçümleri için 2 adet LVDT ve düşey deplasman ölçümleri için ise 1 adet LVDT kullanıldı. Yatay olarak yerleştirilen LVDT'lerden alınan sonuçlar Şekil 7.28'de verilmiştir.



(a)



(b)

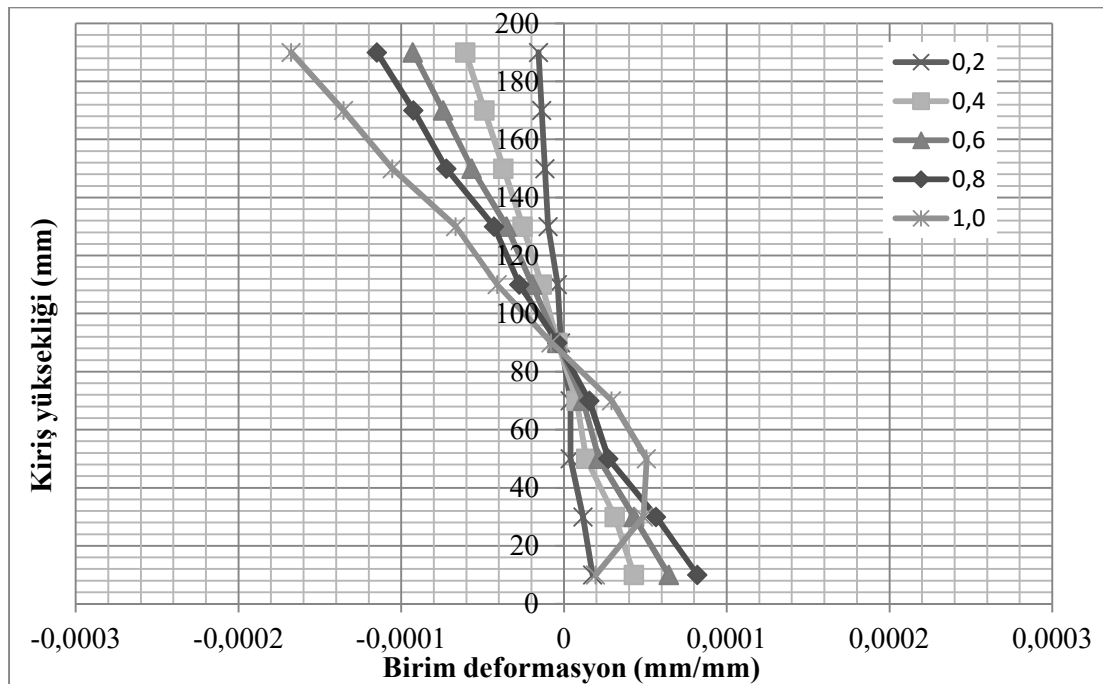
Şekil 7.28. CF B3 S1 elemanın a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiğı

Deney elemanı çatlama yükünün, aynı oranda karbon lif içeren diğer elemanlara göre daha az olduğı görüldü. 19,07 kN olan çatlama yükünde, kirişin düşey deplasman değeri 0,101 mm ve eğriliğı 0,00116 rad/m olarak ölçüldü. Kiriş akma yükü olan 42,5 kN değeri

ulaştığında, yük-deplasman ve moment-eğrilik grafiklerinde kırılma olmuştur. Kiriş donatısının akmaya başladığı noktada düşey deplasman 1,788 mm ve eğrilik 0,0146 rad/m olarak ölçüldü. Kiriş yükü 62,14 kN değerine geldiğinde kiriş üzerinde sağ yükleme noktası ve sağ mesnet arasında kesme çatlakları oluştu. Çatlak, artan deplasmanla beraber gelişerek yükün 35 kN değerine kadar azalmasına neden oldu. Bu yük altında eğrilik değeri ise 0,226 rad/m olarak kaydedildi.

Kiriş yüzünde oluşan birim deformasyon değerleri, ilk kırılma yükünün belirli yüzdelğinde aşağıdaki Şekil 7.29'da verilmiştir. Kirişte oluşan eğilme çatlaklarının, elemanın donatı oranıyla birlikte arttığı görüldü. Çatlak oluşumuyla birlikte kirişin çekme bölgesinde bulunan birim deformasyon ölçerlerden alınan verilerin azaldığı görüldü. Bu azalmanın temel nedeninin gerilme yerelleşmesinden kaynaklı olduğu ve çatlama anından sonra çekme bölgesinde kalan birim deformasyon ölçerlerin hatalı sonuç verdiği görüldü.

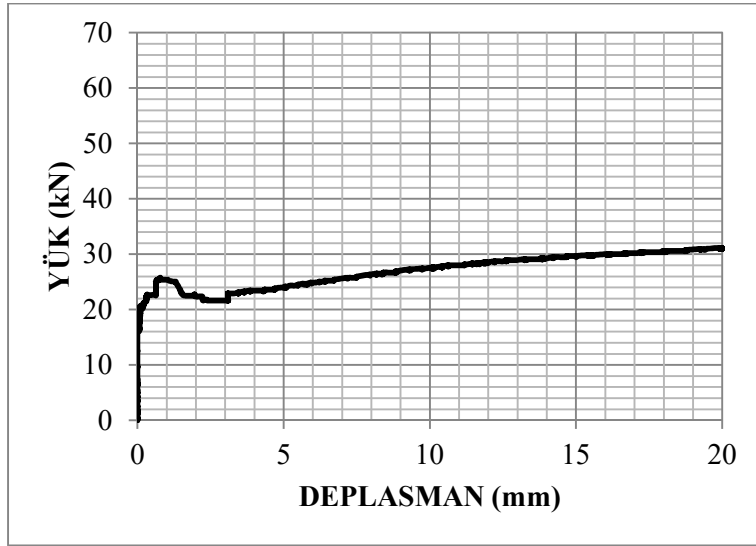
Kiriş üzerindeki yükün artmasıyla birlikte tarafsız eksenin konumunda değişme olmazken, kesitte oluşan gerilme dağılımının ilk kırılma yüküne kadar lineer olarak arttığı görülmüştür. İlk kırılma yükünden sonra kirişin taşıma gücüne katkı sağlayan çekme gerilmeleri ortadan kalkmıştır. Bunu telafi ederek taşıma kapasitesini artırmak için tarafsız eksenin konumu yukarılara yükselmiştir.



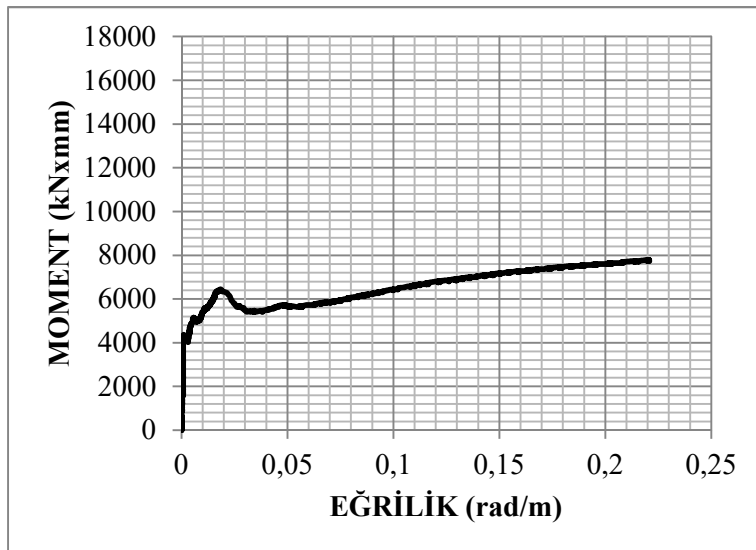
Şekil 7.29. CF B3 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği

7.4.10. SF A1 S1

Hacimce %0,33 oranında çelik lif içeren 1Ø8 boyuna donatılı kirişin 4 noktalı eğilme deneyi yapıldı. Eğrilik ölçümleri için 2 adet LVDT, ölçüm noktasıyla arasındaki mesafe 34 cm olacak şekilde kirişin arka yüzeyine yatay olarak yerleştirildi. Düşey deplasman ölçümü için ise 1 adet LVDT arka yüzeyde kirişin orta noktasına yerleştirildi. Kiriş üzerinde oluşan birim şekil değiştirmeleri ölçmek için ise kiriş yüzeyine 10 adet birim deformasyon ölçerler yerleştirildi. Elde edilen yük-deplasman ve moment-eğrilik grafikleri Şekil 7.30'da verildi.



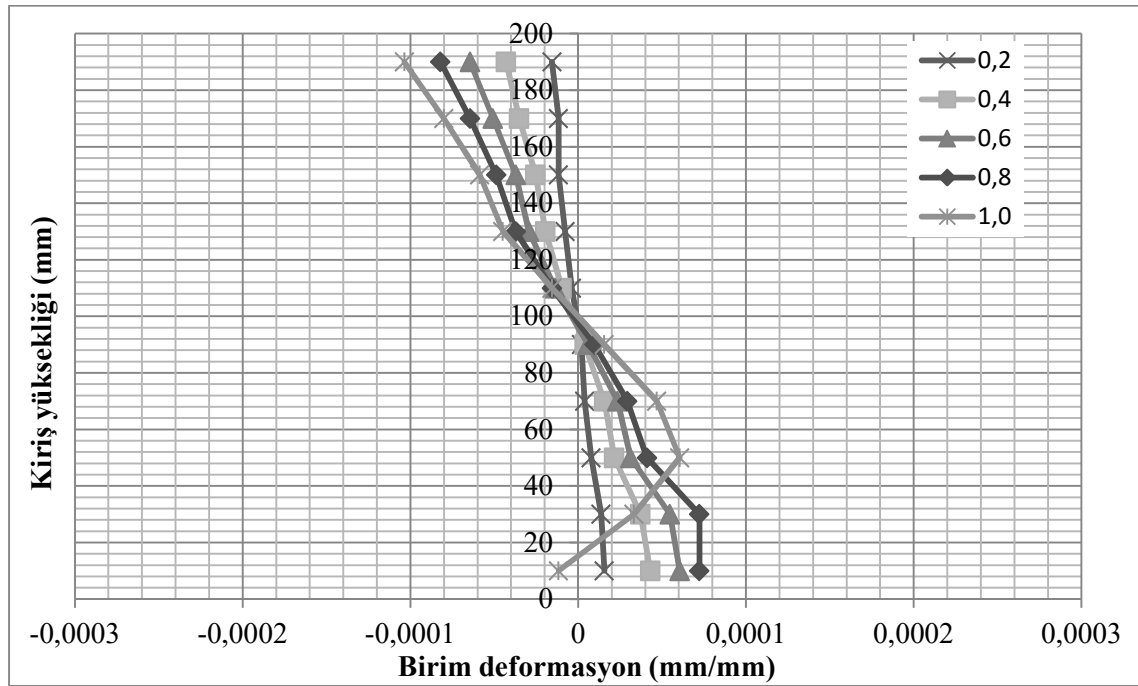
(a)



(b)

Şekil 7.30. SF A1 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği

Kiriş yüzünde oluşan birim deformasyon değerleri ilk kırılma yükünün belirli değerleri için aşağıdaki Şekil 7.31’de verilmiştir. Elde edilen verilerden, beton içerisinde karbon lif kullanımının betonun basınç bölgesindeki birim deformasyon değişimini lineer hale dönüştürdüğü görülmüştür. Artan yükte beraber kirişin tarafsız ekseninin konumunda bir değişme olmamıştır. Eğilmeye neden olan ve giderek artan yükün, kiriş tarafından artan deformasyonlarla karşılanmaya çalışıldığı görülmüştür.



Şekil 7.31. SF A1 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği

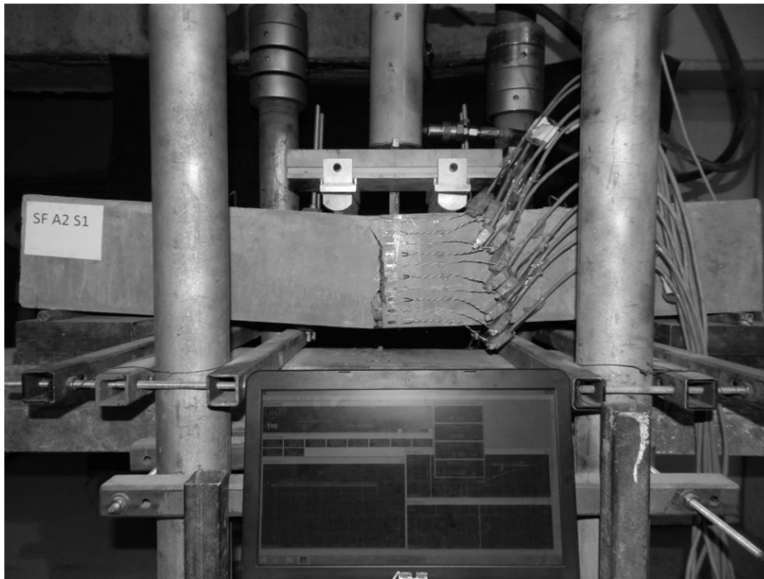
Kiriş üzerindeki yük değeri 17,43 kN değerine ulaştığında, elemanın çekme bölgesinde eğilme çatlakları oluşmaya başlamıştır. Elemanda çekme çatlaklarının oluştuğu noktada kiriş üzerindeki düşey deplasman değeri 0,05 mm iken, eğrilik değeri 0,00115 olarak ölçüldü. Kesit çatlama yüküne ulaştıktan sonra kullanılan çelik liflerin etkisiyle 25,76 kN değerine kadar ulaşmış, ancak donatı miktarının yetersiz olmasından dolayı yük değeri 21,65 kN’a kadar azalmıştır. Kiriş üzerindeki yük 23,79 kN değerine gelmesiyle birlikte donatıda akma gözlenmiştir. Bu akma noktasında elemanın düşey deplasman değeri 0,63 mm iken eğrilik değeri de 0,0147 rad/m olmuştur. Kiriş akma kapasitesine çatlaktan hemen sonra ve elemanda yük azalması oluşmadan ulaşmıştır. Lif içermeyen tek donatılı elemana göre çatlama yükünde 5 kN azalma olmasına rağmen akma değeri ve 20 mm deplasmana karşılık gelen yük değerinde 5 kN artma görüldü. Deney sonunda 31,13 kN yük değerine ulaşan elemanın eğrilik değeri 0,220 rad/m olarak ölçüldü.



Resim 7.15. SF A1 S1 elemanında eğilme çatlağı

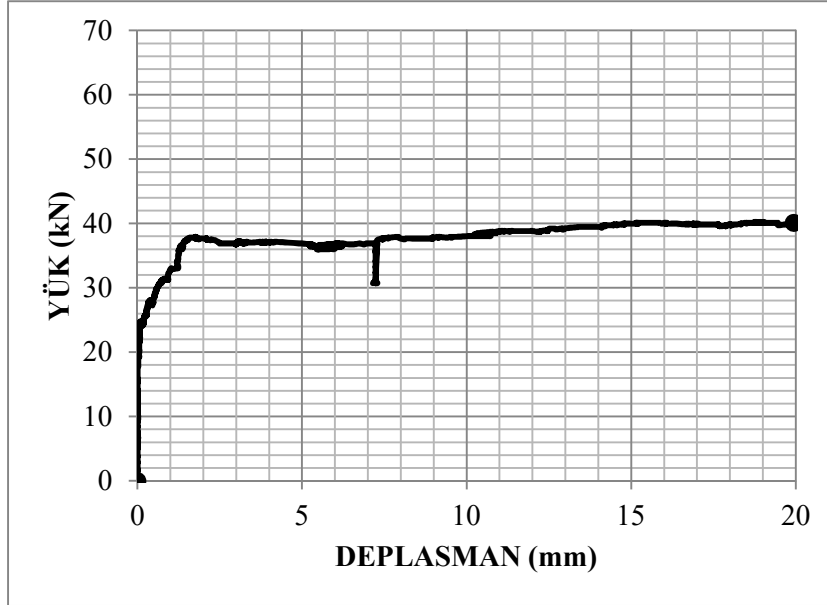
7.4.11. SF A2 S1

%0,33 oranında çelik lif içeren karışımdan üretilen ve 2Ø8 eğilme donatısına sahip olan eleman üzerinde 4 noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Üst ve alt kiriş yüzü seviyesinden 1 cm mesafe bırakılarak, 2 cm arayla yerleştirilen 10 adet birim deformasyon ölçerler ile kiriş yüzünde eğilmeden kaynaklanan birim deformasyonlar ölçüldü. Kiriş orta bölgesine yerleştirilen deplasman ölçerler yardımıyla eğrilik ölçümleri alındı.

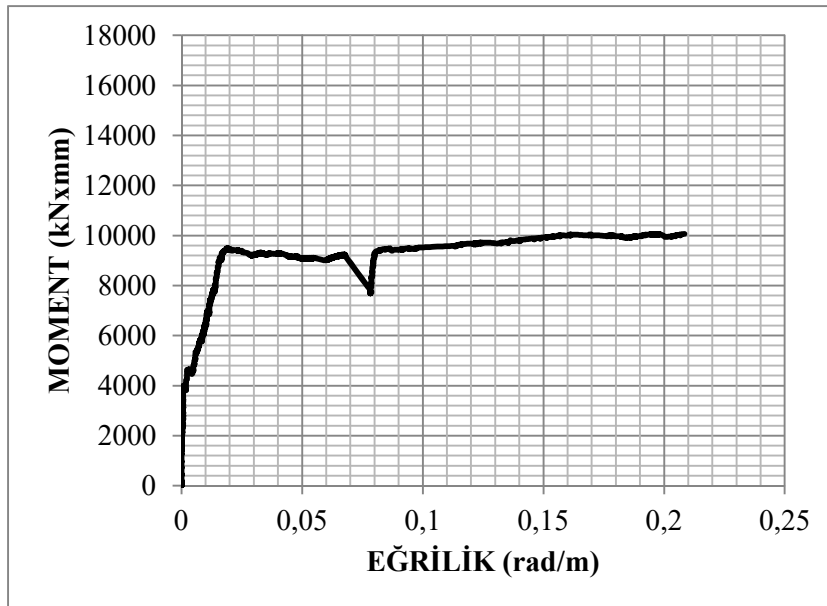


Resim 7.16. SF A2 S1 elemanında eğilme çatlağı

Eğrilik ölçümleri için kiriş orta noktasının 14 cm sol ve 14 cm sağ tarafında, kirişin hem alt hem de üst yüzey seviyesine yatay LVDT'ler yerleştirildi. Kirişin üst ve alt lif hizasına yerleştirilen elektronik deformasyon ölçerler aracılığıyla elde edilen verilerden, moment-eğrilik grafiği Şekil 7.32-b'de, yük-deplasman grafiği ise Şekil 7.32-a'da verilmiştir.



(a)



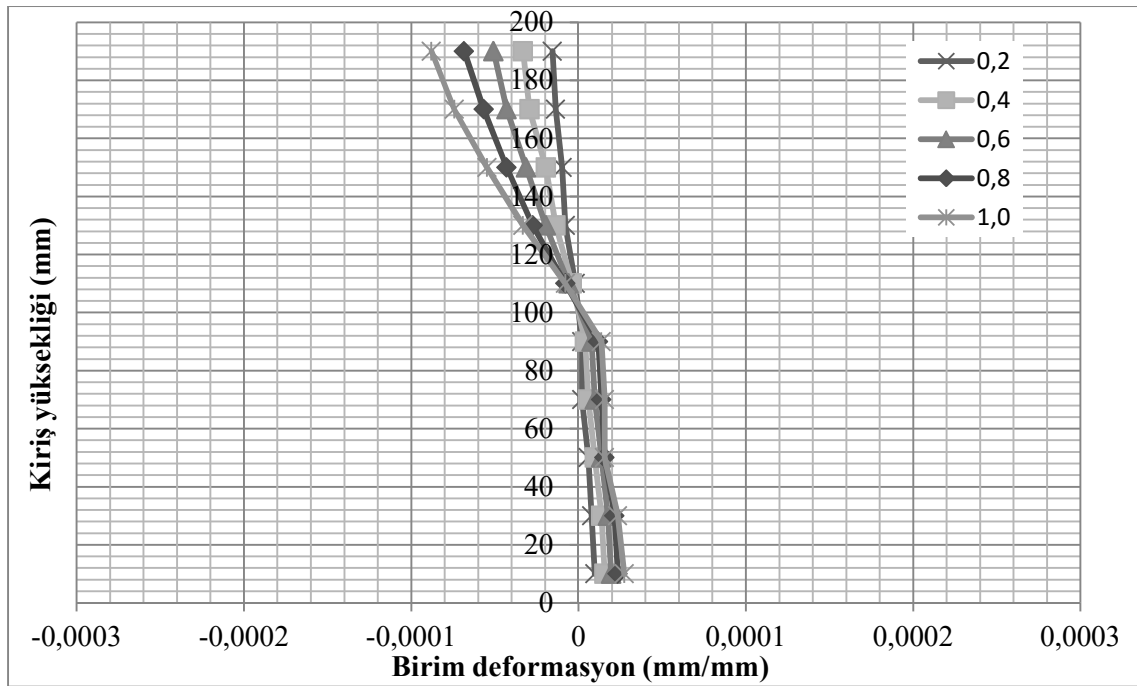
(b)

Şekil 7.32. SF A2 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği

Kiriş üzerindeki yük değeri 18,385 kN değerine ulaştığında elemandaki ilk eğilme çatlağı oluşmuştur. Çatlama dayanımına ulaşıldığında elemanın düşey deplasman değeri 0,025

mm ve eğriliği 0,00347 rad/m olarak ölçüldü. 35,77 kN yük değerine ulaşıldığında elemanın çekme bölgesinde bulunan donatılarda akma meydana gelmiş, bundan dolayı Şekil 7.20’de verilen grafiklerde eğim değişikliği olmuştur. Akma noktasında elemanın düşey deplasman değeri 1,259 mm ve eğriliği 0,0154 rad/m olarak ölçüldü. Deney sonunda kiriş üzerindeki yük 40,6 kN ve bu yük değerindeki eğrilik 0,208 olarak ölçüldü.

Kiriş yüzünde oluşan birim deformasyon değerleri, ilk kırılma yükünün belirli yüzdelerinde aşağıdaki Şekil 7.33’de verilmiştir. Deney elemanı, lif içermeyen ve aynı donatı oranına sahip eleman ile karşılaştırıldığında tek çatlakla göçme durumuna geçtiği görüldü. Ancak çatlama ve akma noktalarında ki eğriliğe bakıldığında %0,33 çelik lif oranına sahip donatılı betonun daha sünek bir davranış sergilediği görüldü. Çatlama dayanımında yaklaşık olarak 3,5 kN azalma olurken, akma dayanımında ise 12,5 kN artma görüldü.

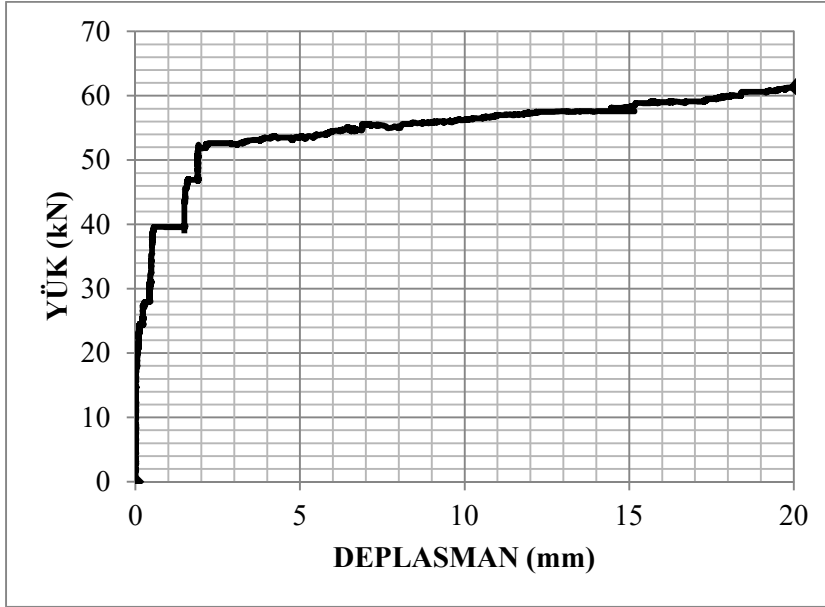


Şekil 7.33. SF A2 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği

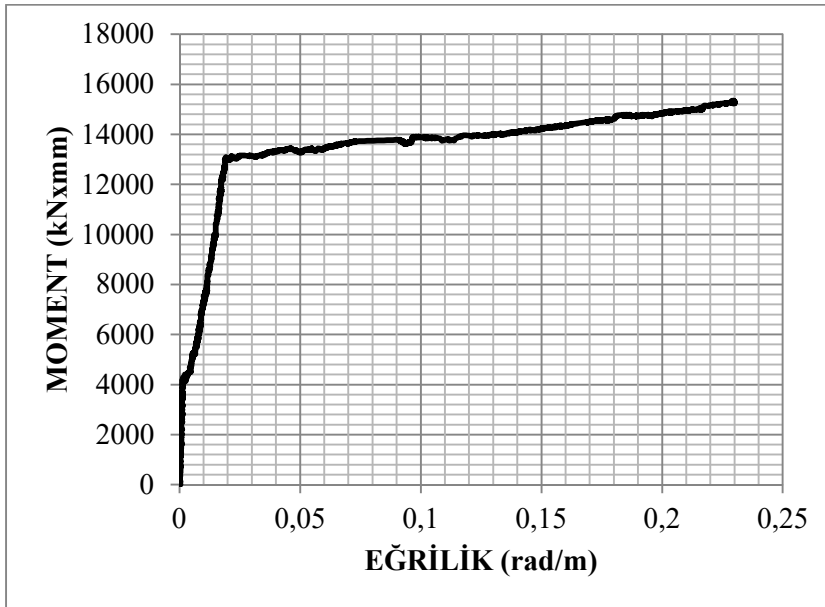
7.4.12. SF A3 S1

%0,33 çelik lif içeren ve 3Ø8 çekme donatısı içeren eleman ile 4 noktalı eğilme deney yapıldı. Deney için 10 adet birim deformasyon ölçer, 2 cm arayla yerleştirildi. Eğrilik ölçümleri için 2 adet 10 cm kapasiteli LVDT, ölçüm noktası ile aralarında 34 cm olacak

şekilde yatay olarak kirişin arka yüzüne yerleştirildi. Düşey deplasman değerini belirlemek için ise 1 adet 10 cm kapasiteli LVDT kiriş orta noktasında düşey olarak yerleştirildi. Deney sonunda elde edilen yük-deplasman ve moment-eğrilik Şekil 7.34’de verildi.



(a)

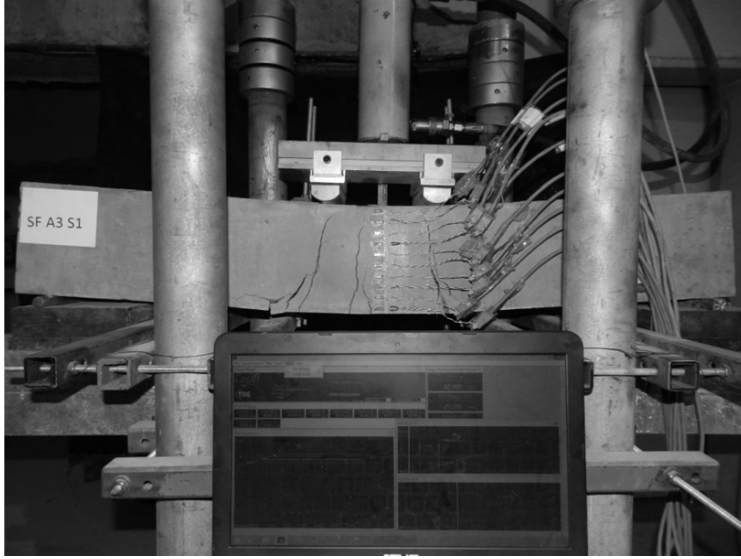


(b)

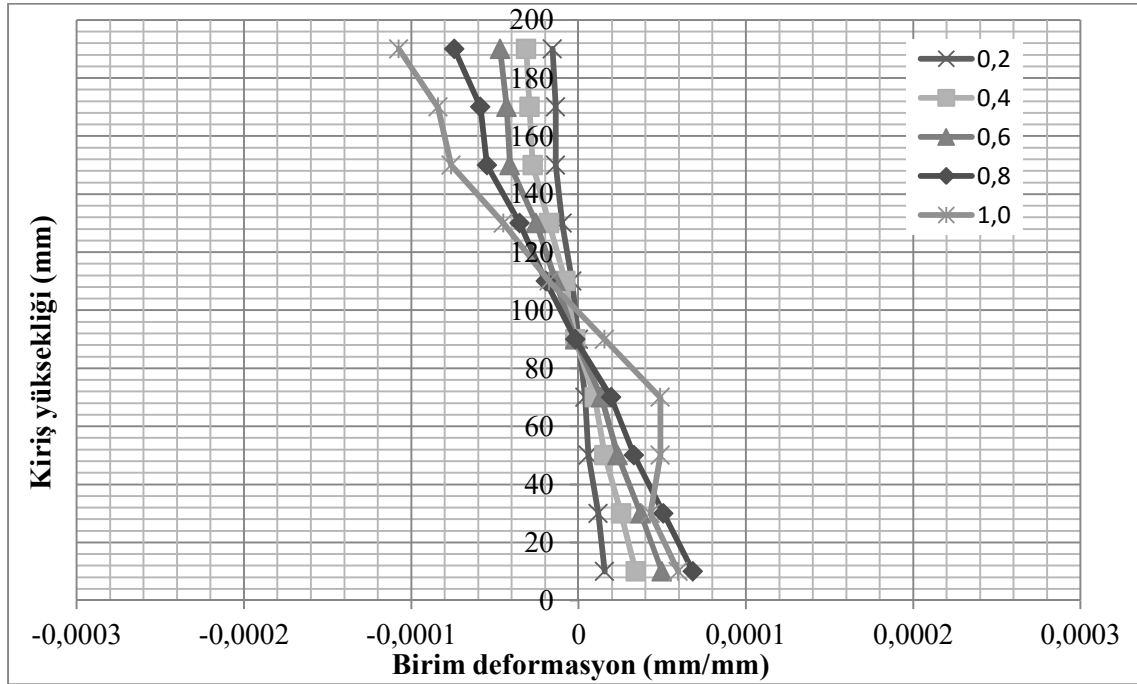
Şekil 7.34. SF A3 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği

Kiriş yükü 17,375 kN değerine ulaştığında, elemandaki ilk eğilme çatlakları oluşmaya başladı. Bu yük değerinde düşey deplasman değeri 0,025 mm ve eğrilik değeri de 0,00307 rad/m olarak tespit edildi. Donatı akma yükü 44,634 kN olarak bulunurken, bu yük

değerinde elemanın orta noktasındaki çökme ve eğrilik değerleri de sırasıyla 1,511 mm ve 0,0162 rad/m olarak belirlendi. Düşey deplasman değeri yaklaşık olarak 20 mm değerine geldiğinde, eleman üzerindeki yük 61,36 kN ve eğrilik 0,229 rad/m olarak ölçüldü. Kiriş yüzünde oluşan birim deformasyon değerleri, ilk kırılma yükünün belirli yüzdelerinde aşağıdaki Şekil 7.35’de verilmiştir. Kirişte oluşan eğilme çatlaklarının, elemanın donatı oranıyla birlikte arttığı görüldü.



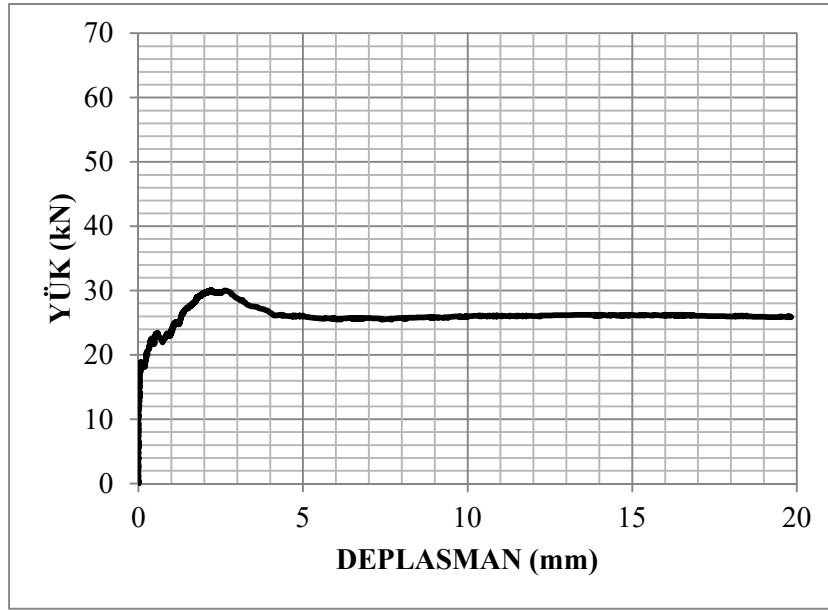
Resim 7.17. SF A3 S1 elemanında eğilme çatlağı



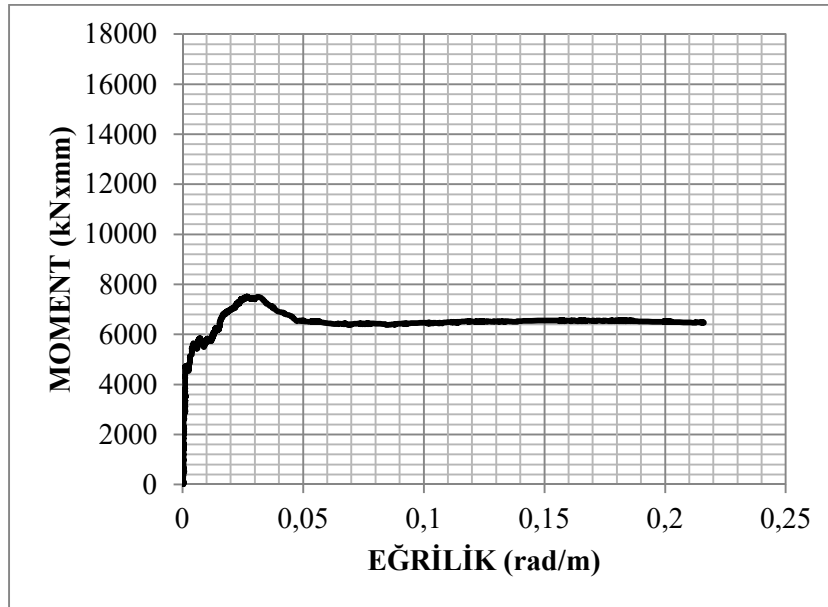
Şekil 7.35. SF A3 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği

7.4.13. SF B1 S1

Karışımında hacimce %0,66 oranında karbon lif içeren betondan üretilen ve 1Ø8 donatı bulunduran betonarme kiriş ile yapılan 4 noktalı eğilme deneyi sonucunda, yük-deplasman, moment eğrilik ve yük-birim deformasyon eğrileri Şekil 7.36'da olduğu gibi elde edilmiştir. Birim şekil değiştirme ölçümleri için 10 adet birim deformasyon ölçer, eğrilik ölçümleri için 2 adet LVDT ve düşey deplasman ölçümleri için ise 1 adet LVDT kullanıldı



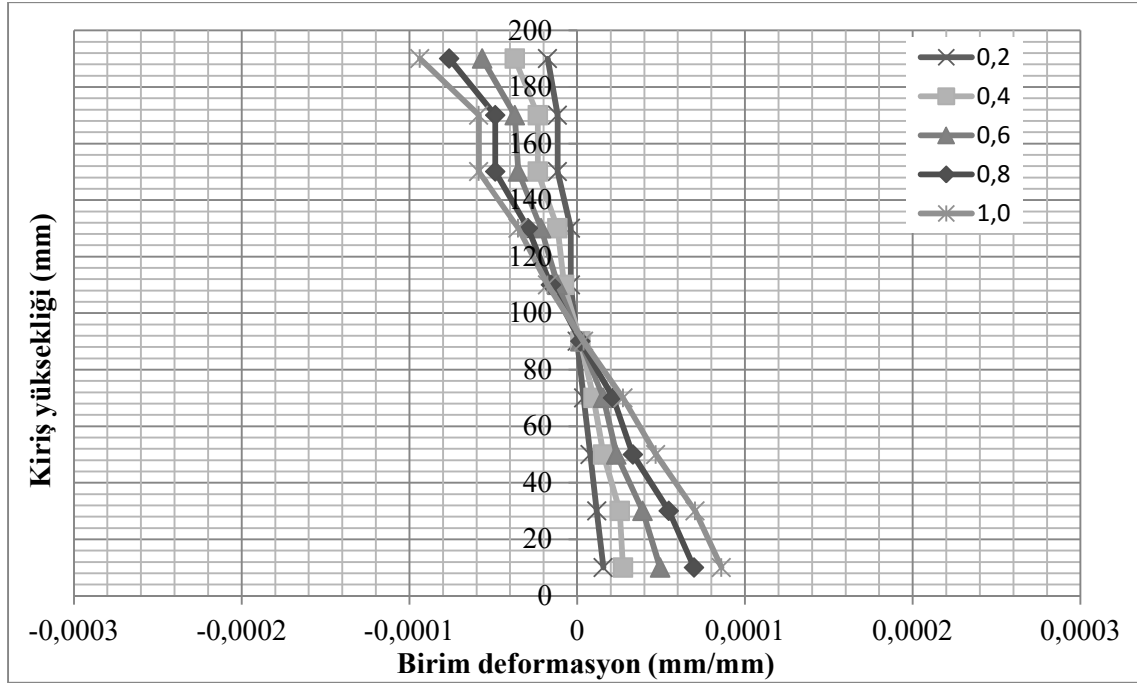
(a)



(b)

Şekil 7.36. SF B1 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği

Kiriş üzerindeki yük değeri 18,76 kN değerine ulaştığında, elemanın çekme bölgesinde eğilme çatlakları oluşmaya başlamıştır. Elemanda çekme çatlaklarının oluştuğu noktada kiriş üzerindeki düşey deplasman değeri 0,101 mm iken, eğrilik değeri 0,00115 olarak ölçüldü. Kesit çatlama yüküne ulaştıktan sonra kullanılan çelik liflerin etkisiyle 30,013 kN değerine kadar ulaşmış, ancak donatı miktarının yetersiz olmasından dolayı yük değeri tekrar 25,623 kN'a kadar azalmıştır. Kiriş üzerindeki yük 25,013 kN değerine gelmesiyle birlikte donatıda akma gözlenmiştir. Bu akma noktasında elemanın düşey deplasman değeri 1,165 mm iken eğrilik değeri de 0,0143 rad/m olarak belirlenmiştir. Deney sonunda ise kiriş yükü 25,867 kN ve eğrilik 0,216 rad/m değerlerine ulaşmıştır.



Şekil 7.37. SF A1 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği

Kiriş yüzünde oluşan birim deformasyon değerleri, ilk kırılma yükünün belirli yüzdelerinde aşağıdaki Şekil 7.37'de verilmiştir. Artan yüklerle beraber kirişin tarafsız ekseninin konumunda bir değişim olmamıştır. Eğilmeye neden olan ve giderek artan yükün, kiriş tarafından artan deformasyonlarla karşılanmaya çalışıldığı görülmüştür. Kiriş üzerindeki yükün artmasıyla birlikte, hem çekme bölgesinde hem de basınç bölgesinde, deformasyon değişimlerinin benzer olduğu görüldü.

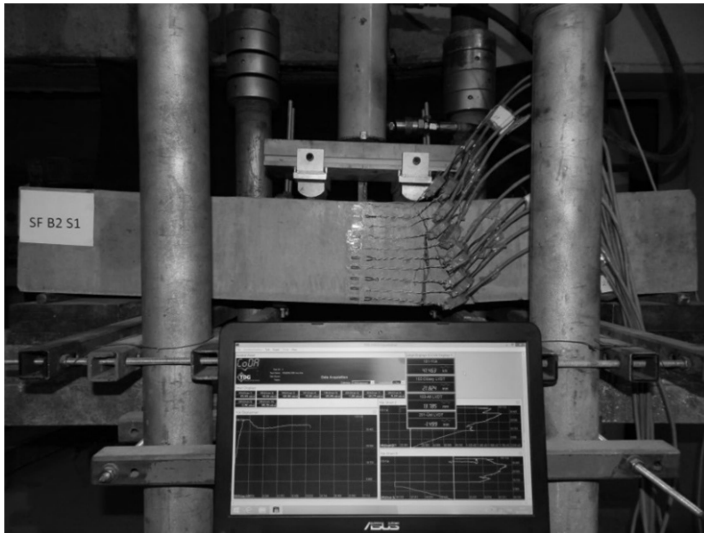
Kirişin deney sonundaki çatlak geometrisi ve yörüngesi Resim 7.18'de verilmiştir. Tek çatlakla göçme durumuna geçen elemanda gevrek davranış görülmüştür.



Resim 7.18. SF B1 S1 elemanında eğilme çatlağı

7.4.14. SF B2 S1

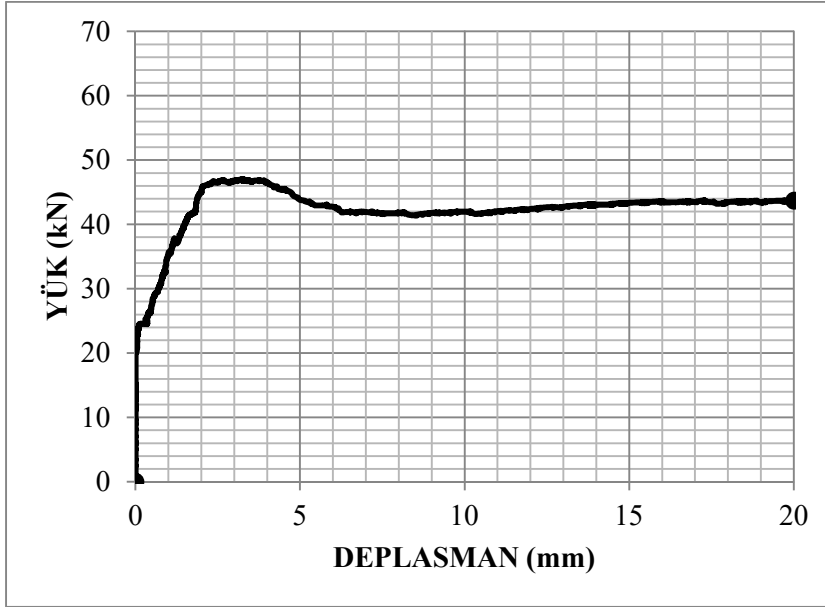
Hacimce %0,66 çelik lif içeren beton karışımından üretilen ve 2Ø8 donatı bulunduran eğilme elemanı ile 4 noktalı basit eğilme deneyi yapıldı. Üst ve alt kiriş yüzü seviyesinden 1 cm mesafe bırakılmış, 2 cm arayla yerleştirilmek üzere 10 adet birim deformasyon ölçer kullanılmıştır. Eğrilik ölçümleri kirişin arka yüzünden, alt ve üst lif seviyesinde yatay olarak yerleştirilen LVDT'ler yardımıyla yapıldı.



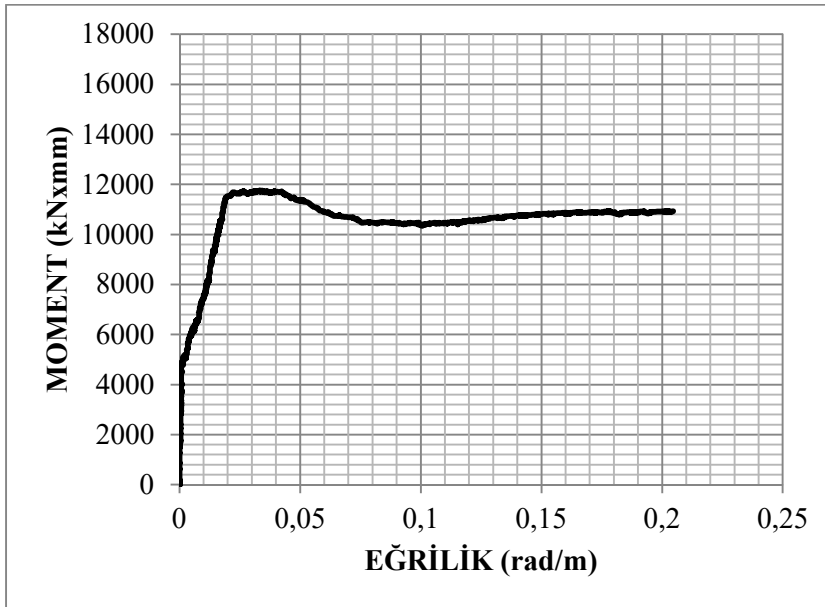
Resim 7.19. SF B2 S1 elemanında eğilme çatlağı

Düşey deplasman ölçümü için kiriş ortasına, kiriş eksenine dik olarak yerleştirilen 1 adet LVDT kullanıldı. Deney sonuçlarından alınan veriler tük-deplasman ve moment-eğrilik

grafikleri Şekil 7.38’de verilmiştir. Elemanın taşıdığı yük değerinin 20,03 kN değerine ulaşmasıyla kiriş çatlama dayanımına ulaştı ve bu noktada düşey deplasman 0,025 mm iken eğrilik 0,00193 olarak kaydedildi.



(a)



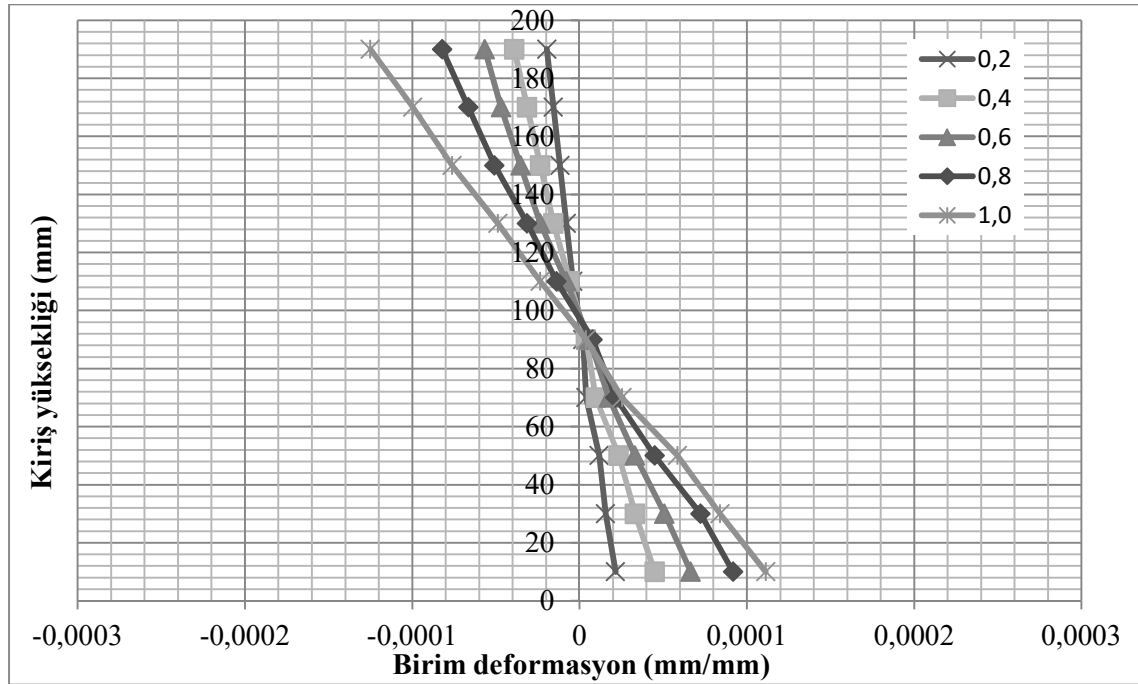
(b)

Şekil 7.38. SF B2 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği

Beton karışımında bulunan çelik lif sayesinde, elemanın taşıma yükü 46,87 kN değerine kadar yükselmiş ancak liflerdeki sıyrılma ve donatı oranının sınırdaki olası nedeniyle elemanın üzerindeki yük 41,5 kN’a kadar düşmüştür. Çekme bölgesinde donatıların

akması, kiriş düşey deplasmanının 1,637 mm olduğu noktada gerçekleşti. Bu akma noktasında kiriş üzerindeki yük 41,51 kN ve eğrilik de 0,0166 rad/m olarak ölçüldü. Elemanın düşey deplasman değeri yaklaşık olarak 20 mm ulaşmasıyla deneye son verildi. Bu noktadaki yük 43,70 kN ve eğrilik de 0,205 rad/m olarak ölçüldü.

Kiriş yüzünde oluşan birim deformasyon değerleri, ilk kırılma yükünün belirli yüzdelerinde aşağıdaki Şekil 7.39’de verilmiştir. Elemanın yükleme altında kırıldığı andaki görünümü Resim 7.19’da verildi. Deney sırasında artan yük ve deformasyonlarla beraber, kiriş üzerinde kılcal eğilme çatlaklarının oluştuğu görüldü. Kullanılan çelik liflerle tutulan bu kılcal çatlaklardan bir tanesi gelişerek elemanın göçme durumuna geçmesine neden oldu.

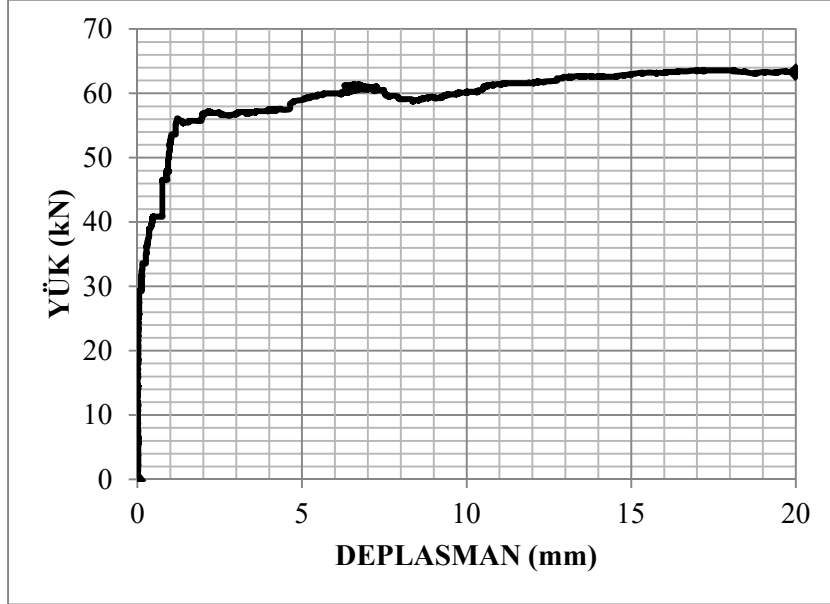


Şekil 7.39. SF B2 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği

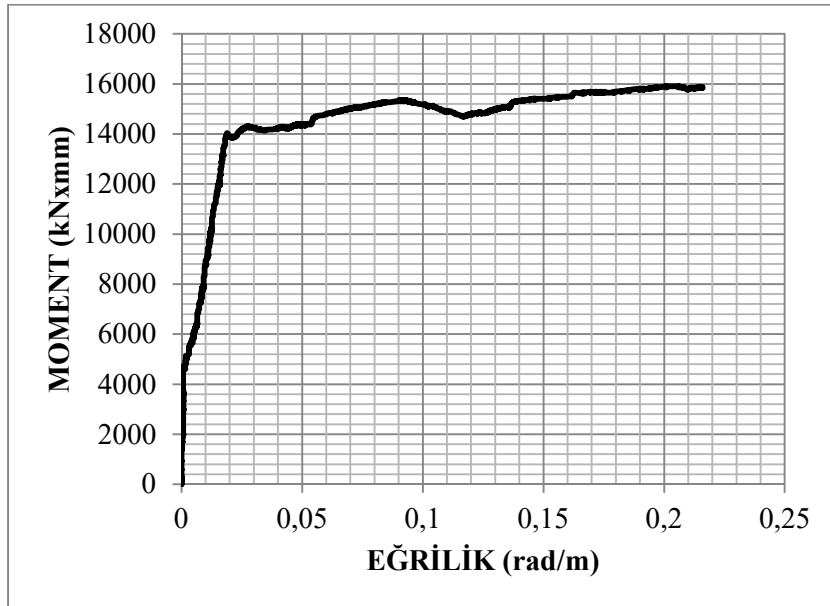
7.4.15. SF B3 S1

%0,66 oranında çelik lif içeren karışımdan üretilen eleman 3Ø8 çekme donatısı bulundurmaktadır. Elemanın eğilme deneyinde eğrilik ölçümleri için 2 ve düşey deplasman ölçümü için ise bir adet 10 cm kapasiteli LVDT kullanıldı. Ayrıca kiriş yüzeyinde meydana gelen birim şekil değiştirmelerin ölçümleri için ise kiriş yüzüne birim deformasyonlar yerleştirildi. Test cihazlarından alınan verilerle çizilen yük-deplasman ve

moment eğrilik grafikleri Şekil 7.40’da verildi. Kirişin deney sonundaki çatlaklı görünümü Resim 7.20 de verildi.



(a)



(b)

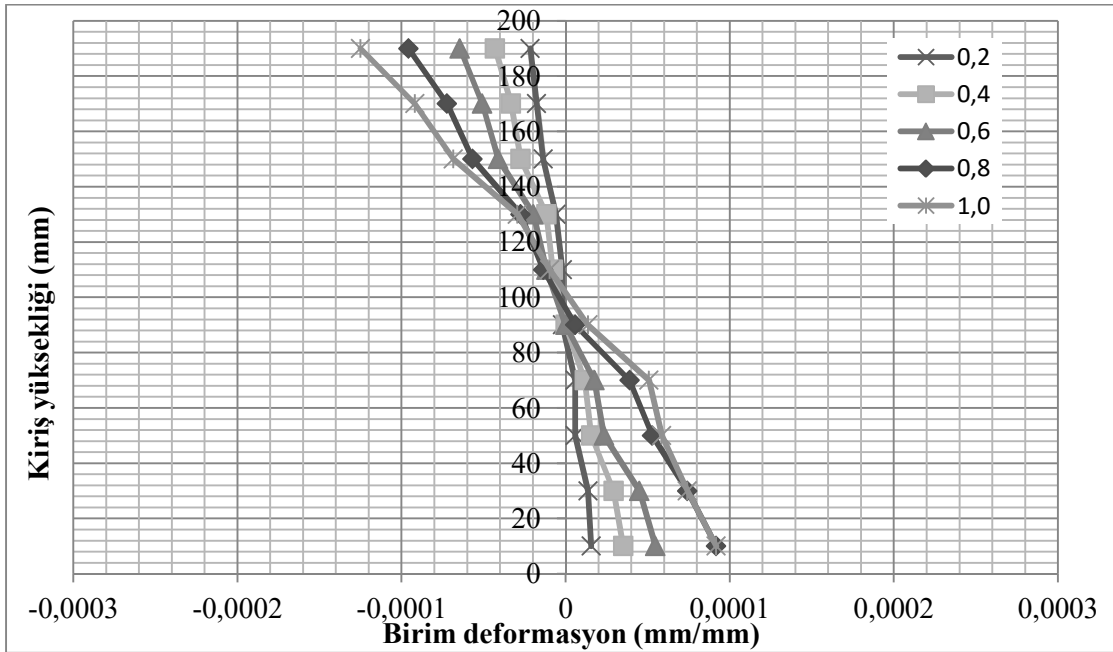
Şekil 7.40. SF B3 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği

Kiriş üzerindeki yük değeri 18,77 kN değerine ulaştığında kirişin çekme bölgesinde eğilme çatlakları oluşmaya başladı. Çekme dayanımına ulaşıldığı anda kirişin düşey deplasman değeri 0,025 mm ve eğriliği 0,00153 rad/m olarak ölçüldü. Aynı lif oranına sahip diğer donatılı elamanlarla karşılaştırıldığında kirişin yük kapasitesinde bir azalma görülmedi.

Kiriş yükü 49,294 kN değerine ulaştığında ise donatıda akma olmaya başladı. Bu akma noktasında düşey deplasman 0,932 mm ve eğrilik 0,0158 rad/m olarak ölçüldü. deney sonunda düşey deplasmanın 20 mm değere ulaşmasıyla deneye son verildi. Deney durdurulduğunda kiriş üzerindeki yük 63,36 kN ve eğrilik 0,216 rad/m olarak ölçüldü. Kiriş yüzünde oluşan birim deformasyon değerleri, ilk kırılma yükünün belirli yüzdelerinde aşağıdaki Şekil 7.41’de verilmiştir. Kirişte oluşan eğilme çatlaklarının, elemanın donatı oranıyla birlikte arttığı görüldü. Kiriş üzerinde oluşan bir deformasyonların değişiminin çekme ve basınç bölgesinde benzer olduğu görüldü.



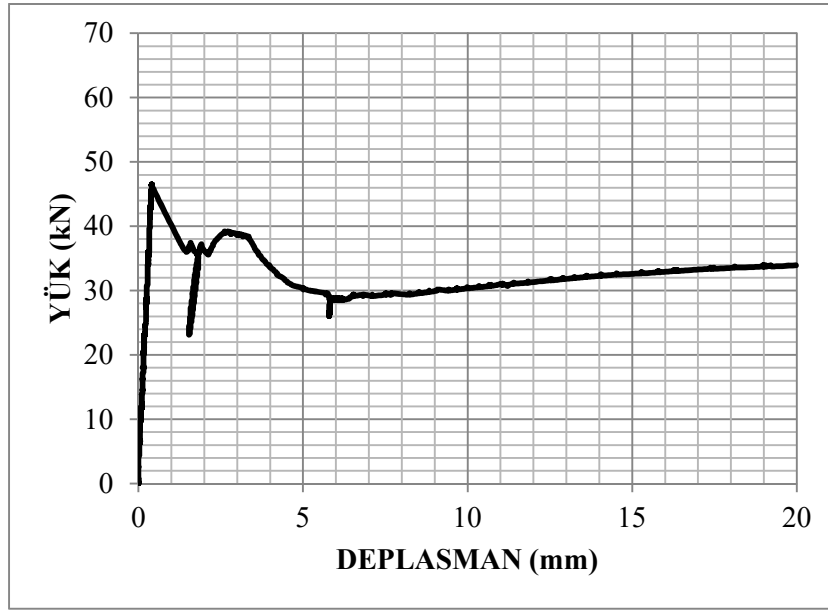
Resim 7.20. SF B3 S1 elemanında eğilme çatlakları



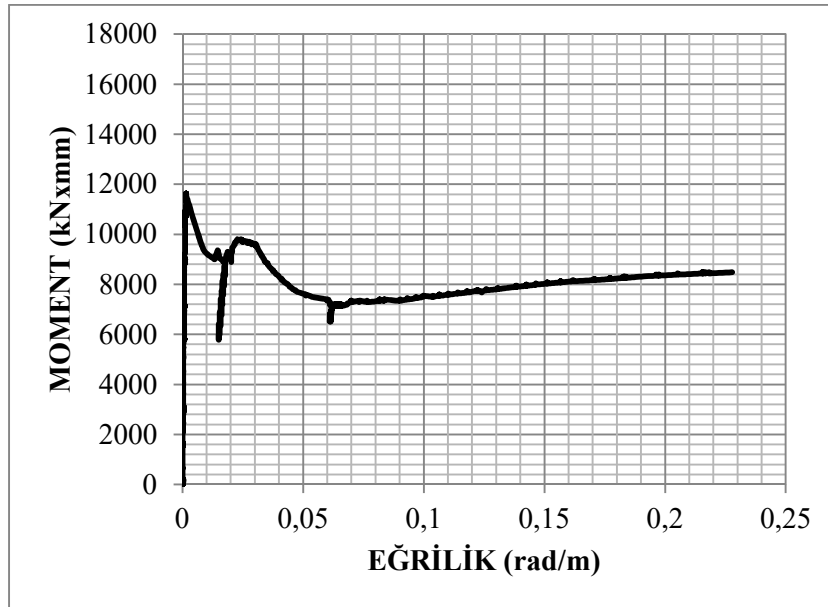
Şekil 7.41. SF B3 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği

7.4.16. SF C1 S1

Karışımında hacimce %0,99 oranında karbon lif içeren betondan üretilen ve 1Ø8 donatı bulunduran betonarme kiriş ile yapılan 4 noktalı eğilme deneyi sonucunda, yük-deplasman, moment eğrilik ve yük-birim deformasyon eğrileri Şekil 7.42’de olduğu gibi elde edilmiştir. Birim şekil değiştirme ölçümleri için 11 adet birim deformasyon ölçer, eğrilik ölçümleri için 2 adet LVDT ve düşey deplasman ölçümleri için ise 1 adet LVDT kullanıldı.



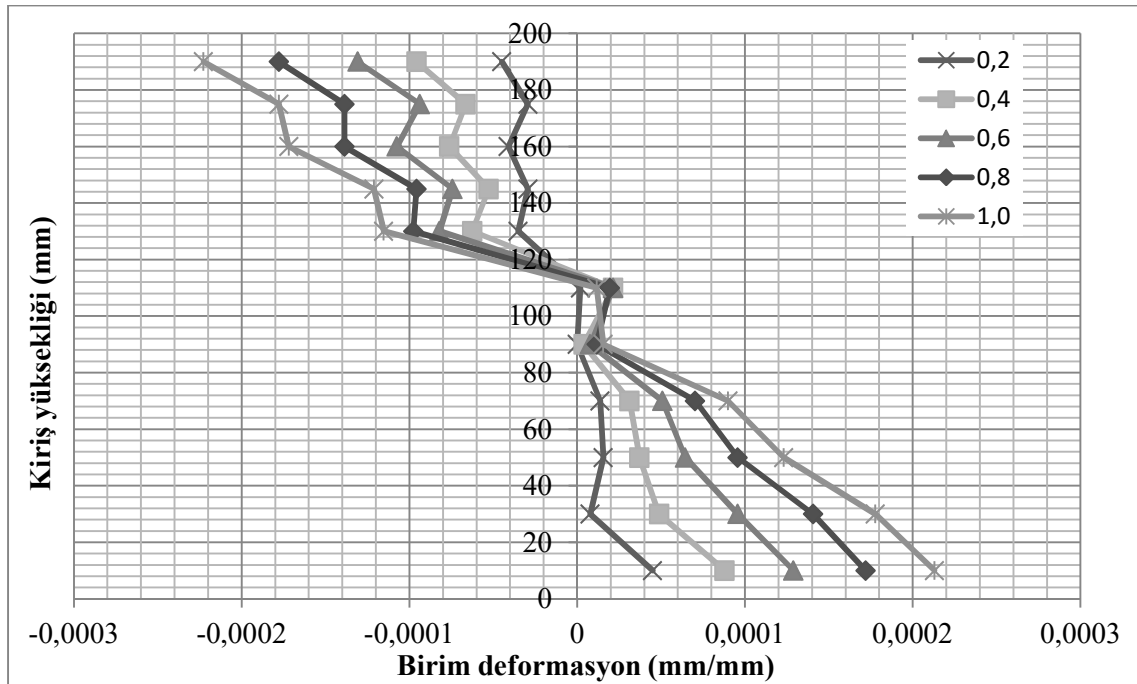
(a)



(b)

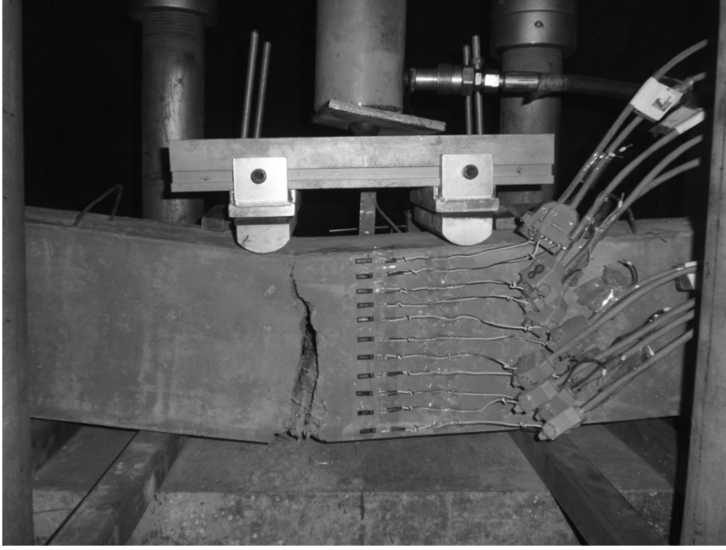
Şekil 7.42. SF C1 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği

Deney sonunda kiriş üzerinde oluşan eğilme çatlağı Resim 7.21’de olduğu gibi gelişmiştir. Eleman çekme dayanımına ulaşınca kadar lineer bir davranış sergilemiştir (Şekil 7.42). Eğilme elemanı, farklı oranlardaki karbon lif içeren ve lif içermeyen diğer tek donatılı kirişlere göre, karışımındaki lif oranının fazla olmasından dolayı daha yüksek kırılma yüküne ulaşmıştır. Düşey deplasman ve yük değerleri sırasıyla 25,46 mm ve 30,54 kN değerlerine ulaştığında donatı kopmuş ve deneye son verilmiştir. Düşey deplasman değeri 20 mm ye ulaştığında kiriş yükü 33,93 kN ve eğrilik de 0,228 rad/m olarak ölçüldü. Kiriş üzerindeki yük değeri 46,48 kN olduğunda kiriş üzerinde ani olarak oluşan tek bir eğilme çatlağı görüldü. Bu yükte kiriş düşey deplasman değeri 0,403 mm ve eğrilik değeri ise 0,00223 olarak ölçüldü. Çekme yüküne ulaşan kirişte, düşey deplasman değerinin artması ile lifler çatlak yüzeyinde sıyrılmaya başlamış böylece yük değerleri 30,18 kN değerine kadar düşmüştür. Düşey deplasman değeri 1,511 mm olduğunda elemanın çekme donatısında akma olmuştur. Akma yükü 36,19 kN olarak belirlenirken bu noktadaki eğrilğin ise 0,0148 rad/m olduğu belirlendi.



Şekil 7.43. SF C1 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği

Kiriş yüzünde oluşan birim deformasyon değerleri ilk kırılma yükünün belirli değerleri için aşağıdaki Şekil 7.43’de verilmiştir. Elde edilen verilerden, beton içerisinde karbon lif kullanımının betonun basınç bölgesindeki birim deformasyon değişimini lineer hale dönüştürdüğü görülmüştür.



Resim 7.21. SF C1 S1 elemanında eğilme çatlağı

7.4.17. SF C2 S1

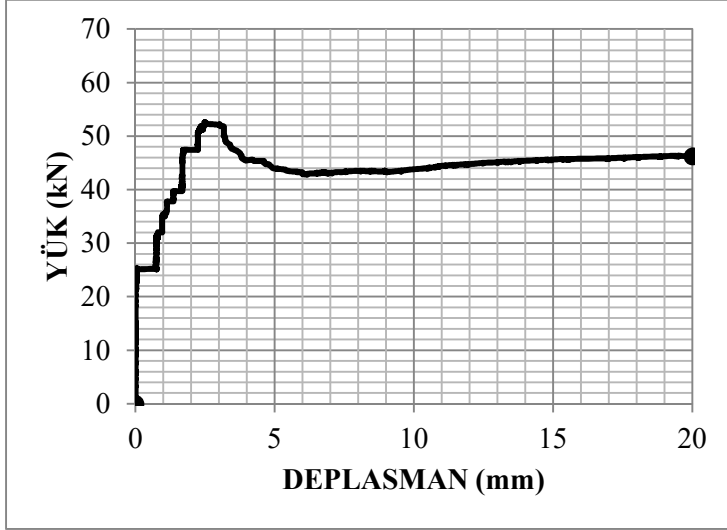
Hacimce %0,99 oranında çelik lif içeren ve 2Ø8 eğilme donatısı bulunduran eleman ile 4 noktalı eğilme deneyi yapıldı. Kiriş yüzündeki şekil değiştirme ölçümleri için, 2 cm arayla yerleştirilen 10 adet birim deformasyon ölçer kullanıldı. Eğrilik ölçümleri için 2 adet LVDT arka yüze yatay ve ölçüm aralığı 34 cm olacak şekilde yerleştirildi.



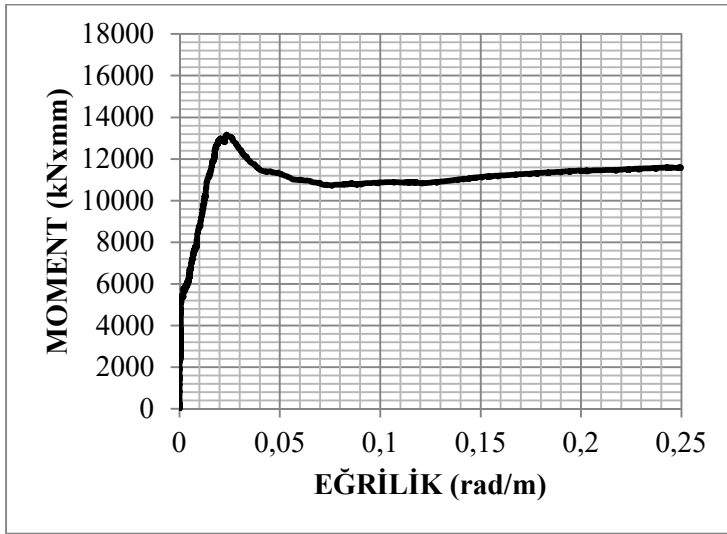
Resim 7.22. SF C2 S1 elemanında eğilme çatlağı

Düşey deplasman ölçümü için 10 cm kapasiteli 1 adet LVDT düşey olarak kullanıldı. Eğilme sonucunda kiriş yüzünde oluşan eğilme çatlağının görünümü ise Resim 7.22’de

verildi. Deney sonucunda elde edilen yük-deplasman ve moment-eğrilik grafikleri Şekil 7.44'de verildi.



(a)



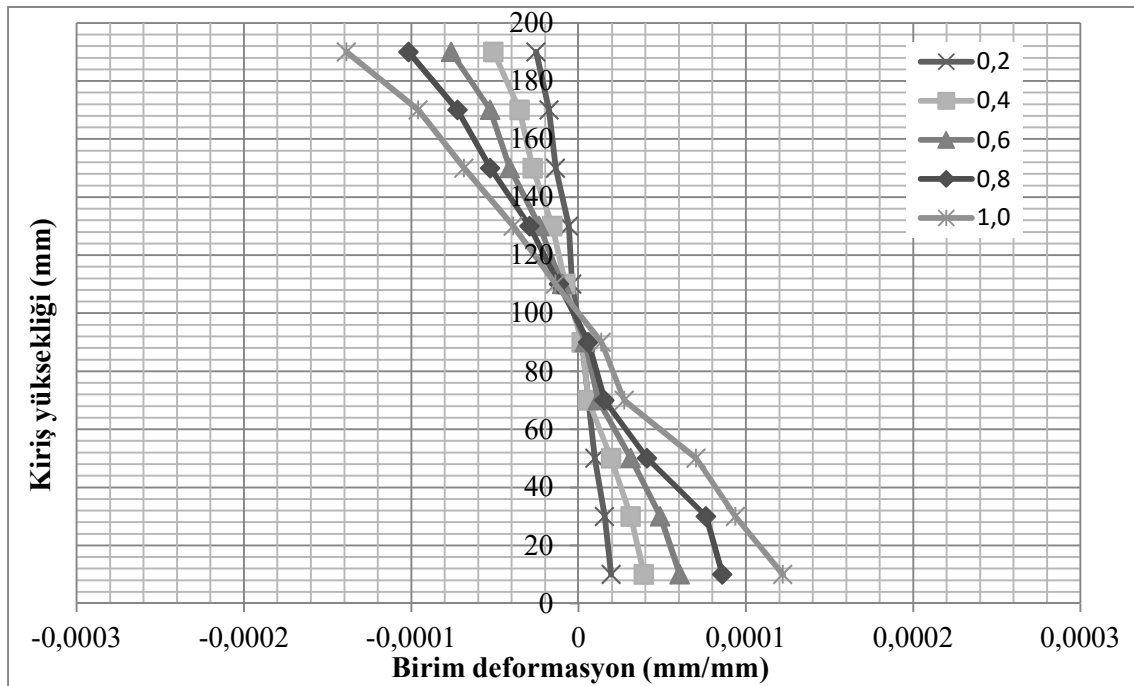
(b)

Şekil 7.44. SF C2 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği

Eğilme elemanı üzerindeki yük 21, 61 kN değerine ulaştığında, kirişin alt yüzünde eğilme çatlakları oluşmaya başladı. Bu noktaya karşılık gelen düşey deplasman 0,025 mm ve eğrilik ise 0,00229 rad/m olarak bulundu. Kirişte çatlakların oluşmasıyla yük-deplasman grafiğinin eğimi değişmiş ve lif etkisiyle eleman 51,27 kN'a kadar yük almaya devam etmiştir. Düşey deplasman değeri 1,713 mm değerine ulaştığında elemanın çekme donatılarında akma meydana gelmiştir. Akmanın olduğu anda yük değeri 47,22 kN ve eğrilik 0,0162 rad/m olarak ölçüldü. Maksimum yüke ulaşılması ve deplasman değerinin

artmasıyla birlikte, kirişin alt yüzünde bulunan kılcal çatlaklardan birisinde çatlak ucu açılmasıyla büyüme olmuştur. Maksimum yükten sonra çelik lifler gelişen çatlakta betondan sıyrılmaya başlamış ve yükte azalma görülmüştür. Düşey deplasman değeri 20 mm değerine ulaştığında deneye son verilmiştir. Deney sonunda kiriş üzerindeki yük değeri 46,25 kN ve eğril ise 0,250 rad/m olarak kaydedildi.

Kiriş yüzünde oluşan birim deformasyon değerleri, ilk kırılma yükünün belirli yüzdelğinde aşağıdaki Şekil 7.45’de verilmiştir. Artan lif içeriği ve donatının yetersiz kalması sonucu elemanda gevrek kırılma görülmüştür. Kiriş yükünün artmasıyla birlikte, birim deformasyon ölçerler tarafından ölçülen şekil değiştirmelerinde yükle orantılı olarak arttığı görüldü. Kiriş üzerindeki yükün artmasına rağmen, kırılma anına kadar tarafsız eksenin konumunda değişiklik olmamıştır.

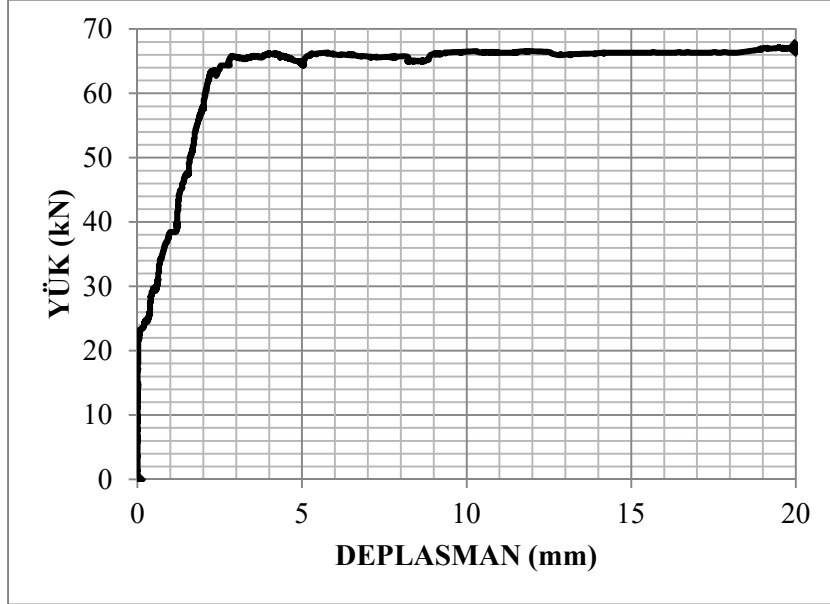


Şekil 7.45. SF C2 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği

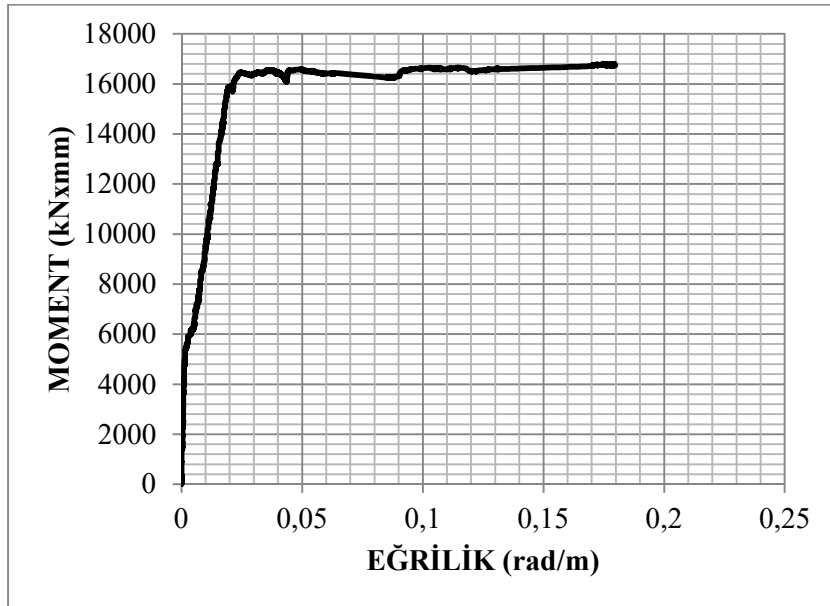
7.4.18. SF C3 S1

Hacimce %,99 oranında karbon lif ve 1Ø8 donatı bulunduran betonarme kiriş ile yapılan 4 noktalı eğilme deneyi sonucunda, yük-deplasman, moment eğrilik ve yük-birim deformasyon eğrileri elde edilmiştir. Birim şekil değiştirme ölçümleri için 10 adet birim deformasyon ölçer, eğrilik ölçümleri için 2 adet LVDT ve düşey deplasman ölçümleri için

ise 1 adet LVDT kullanıldı. Yatay olarak yerleştirilen LVDT'lerden alınan sonuçlar Şekil 7.46'de verilmiştir.



(a)

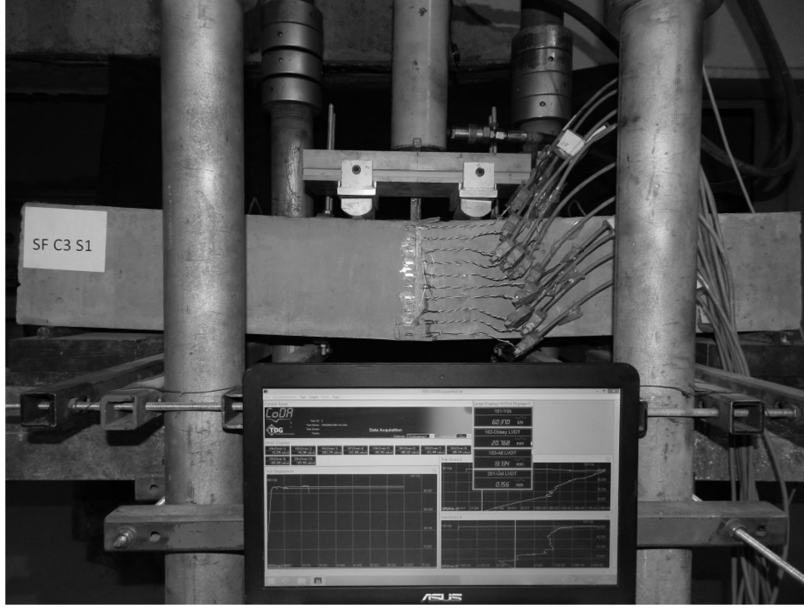


(b)

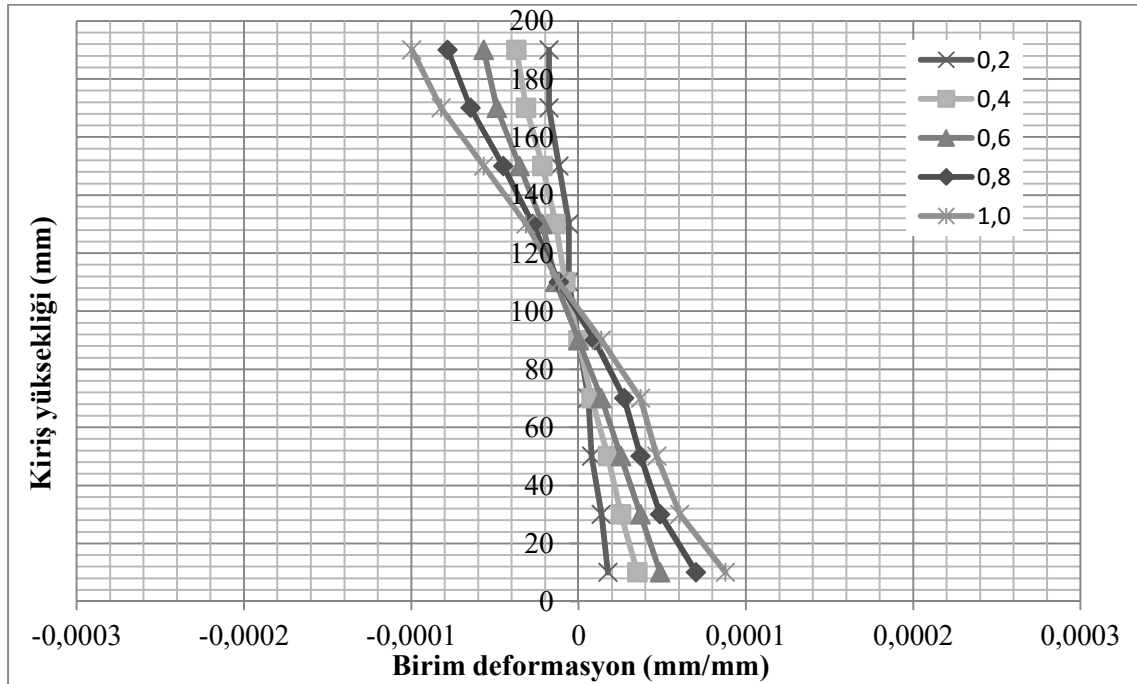
Şekil 7.46. SF C3 S1 elemanının a) yük-deplasman, b) moment-eğrilik grafiği

Eleman üzerindeki yük değeri 21,53 kN değerine ulaştığında, kılcal çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Elemanın çatlama dayanımına ulaştığı noktada düşey deplasman değeri 0,025 mm ve eğrilik 0,00153 rad/m olarak ölçüldü. Çekme bölgesindeki donatılar, giriş üzerindeki yük 55,626 kN olduğunda akmaya başladı. Donatıların akma anında düşey

deplasman 1,839 mm, eğrilik ise 0,0162 rad/m olarak kaydedildi. düşey deplasman değeri 20 mm olunca deneye son verildi. Deney sonunda kiriş yükü 66,972 kN ve eğrilik ise 0,180 rad/m olarak ölçüldü. Kirişin deney sonundaki çatlaklı görünümü Resim 7.23’de verilmiştir. Kiriş yüzünde oluşan birim deformasyon değerleri, ilk kırılma yükünün belirli yüzdelerinde aşağıdaki Şekil 7.47’da verilmiştir.



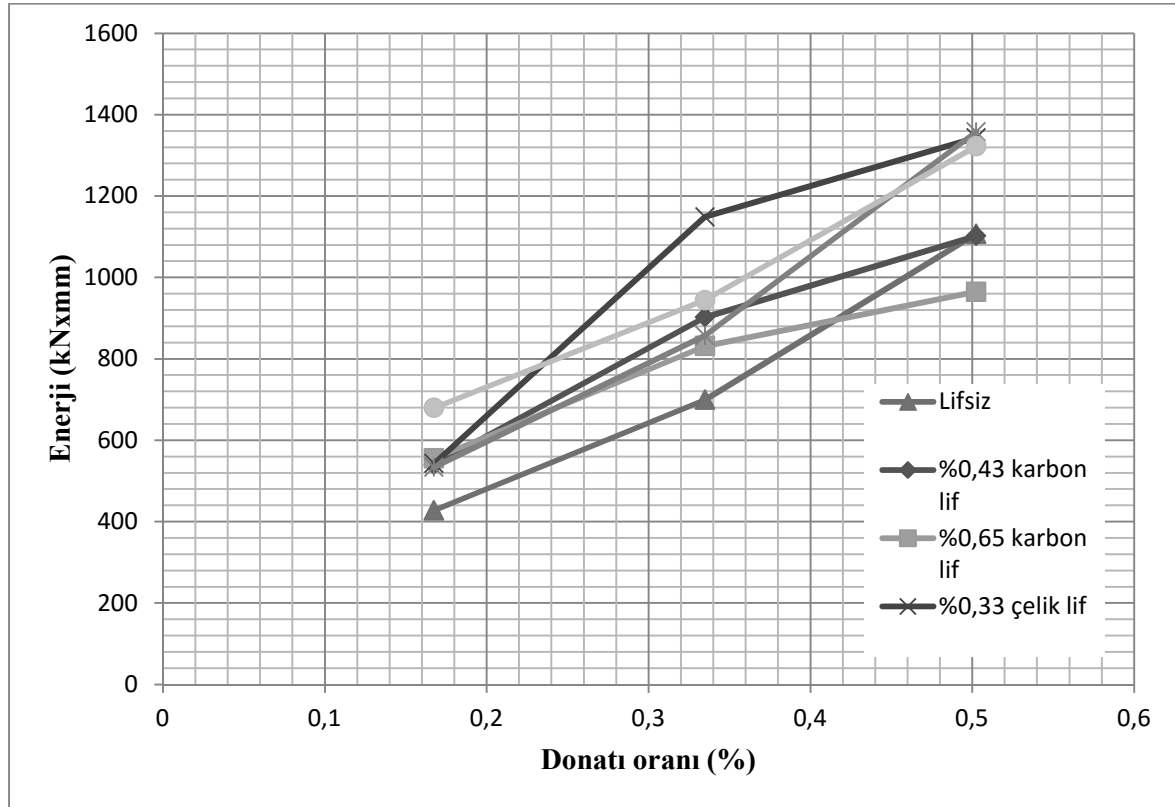
Resim 7.23. SF C3 S1 elemanında eğilme çatlaklı



Şekil 7.47. SF C3 S1 elemanında yük-birim deformasyon grafiği

7.5. Lif Türü ve Oranının Donatılı Kirişlere Etkisi

Farklı oranlarda kullanılan karbon karbon ve çelik liflerin, kirişlerin enerji yutma kapasitelerine olan katkıları Şekil 7.48’de verilmiştir.



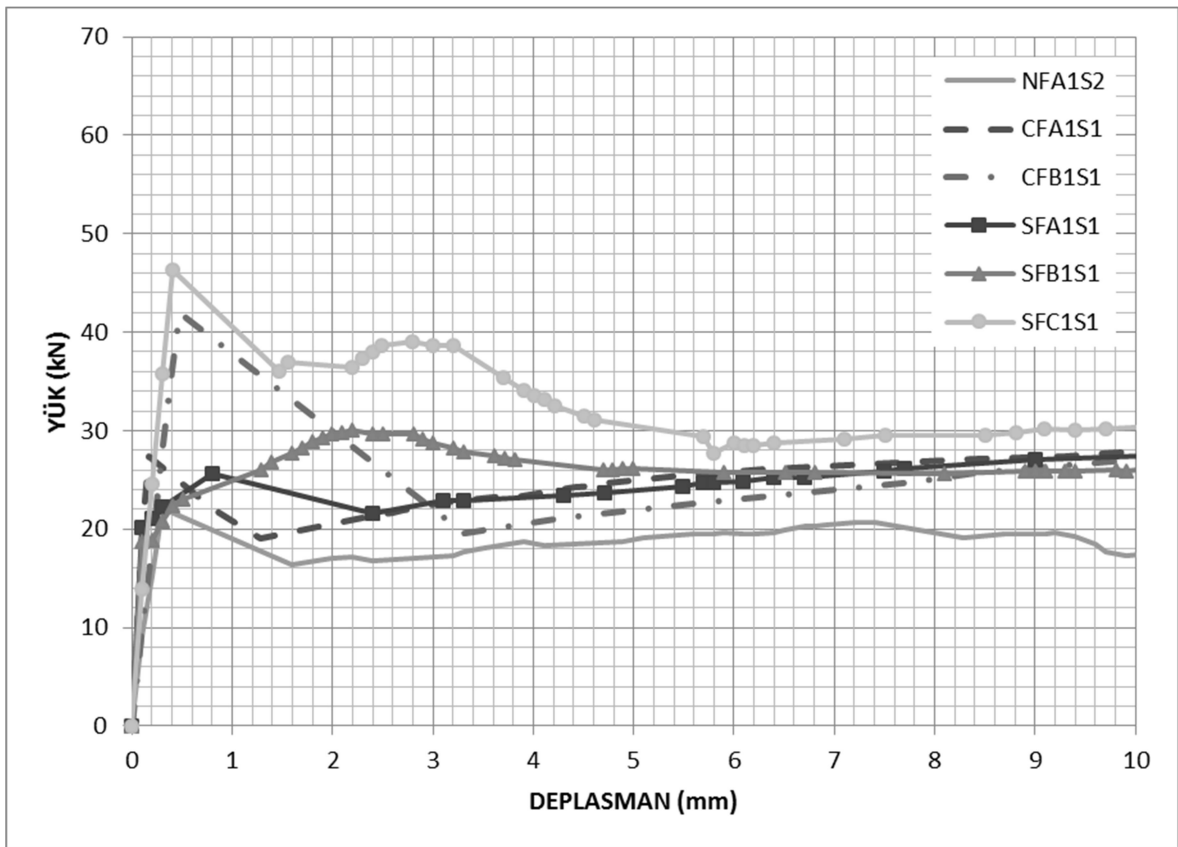
Şekil 7.48. Farklı donatı oranlarına sahip elemanların enerji yutma kapasiteleri

7.5.1. Lif türü ve oranının tek donatılı kirişlere etkisi

Kullanılan farklı oranlardaki liflerin, tek donatılı betonarme kiriş üzerindeki etkilerini görmek amacıyla, deney elemanlarından alınan veriler tek grafikte verilmiştir (Şekil 7.49). Deney elemanlarında kullanılan karbon lif katkısının, eleman davranışı üzerinde etkisi olmamış ancak aynı davranışın daha fazla yük değerlerinde gerçekleşmesini sağlamıştır. Çelik lif ise, karışımdaki orana bağlı olarak yükü artırmış ve eleman davranışını değiştirmiştir. Bütün tek donatılı kiriş deneylerinde, donatılı betonarme kirişler deneyin sonunda donatıların kopmasıyla iki parçaya ayrılmıştır.

Bütün tek donatılı kirişlerde, donatıda pekleşme olmasına rağmen, yalnızca lifsiz kirişte 10 mm düşey deplasman değerinden sonra belirgin olarak görülebilmektedir. Karışımında lif

içermeyen, %0,43 karbon lif, %0,65 karbon lif ve %0,99 çelik lif içeren elemanlarda, beton çekme dayanımına ulaşana kadar ki süreçte lineer elastik davranış görüldü. %0,33 ve %0,66 çelik lif katkılı betonlarda ise elastik davranışın değiştiği ortalama yükün 18 kN olduğu görüldü. Kullanılan lif çelik lif ve karbon lif oranının artmasıyla orantılı olarak elemanların çatlama yükünde de artış oluşmuştur. Eğilme elemanlarında çatlama yüküne ulaşılmasından sonra gevrek kırılma oluşmasıyla birlikte ani yük düşüşü oldu. Maksimum çatlama yükünden sonra gelişen tek çatlak ve betondaki ani yük kaybı, donatıların yetersiz olduğunu göstermektedir.



Şekil 7.49. Tek donatılı betonarme kirişlerin yük-deplasman grafikleri

Tek donatılı elemanlarda %0,65 oranında karbon lif kullanılması, diğer çelik lif katkılı betonlara göre kırılma yüküne kadar olan davranışı daha sünek hale getirmesine rağmen, kırılma sonrası en büyük yük kaybı yaşayan eleman olmuştur. Deney sonrası elemanlarda çatlak oluşumu incelendiğinde, lifsiz kirişte 2 adet diğerlerinde ise tek eğilme çatlak oluşumu görüldü. Kullanılan liflerin çatlak oluşumunu köprüleme yaparak engellemesi sonucu elemanlar daha büyük yük değerine ulaşmışlardır. Ancak kopma yüküne

ulaşmalarıyla birlikte eleman üzerindeki en zayıf kesitte oluşan çatlak gelişmiş ve elemanın gmesine neden olmuştur.

Çatlama yk ve bu ykteki eleman eğrilikleri arasında farklılıklar olmasına rağmen, deney sonundaki eleman eğrilikleri ve yk taşıma değerleri arasında çok fark yoktur. Lif içermeyen betonda pekleşmenin belirgin olarak görülmesi ve elemanların deney sonundaki yk değerlerinin yakın olmasıyla, yetersiz donatılı elemanlarda kullanılan liflerin çekme donatısını daha erken pekleştirdiği sonucu çıkarılmıştır.

Donatıların akma anında elik lifli kirişler lif içermeyen şahit elemana göre daha yksek yk değerine sahip olmasına rağmen, daha küçük eğrilik ve düşey deplasman değerlerine sahiptir. Tek donatılı elemanlarda kullanılan elik lifler, elemanın enerji yutma kapasitelerini artırırken, tıpkı aşırı donatılı kiriş gibi elemanın gevrekliğini de artırmıştır. Bu nedenle yetersiz donatılı elemanlarda lif kullanımı, elemanın sahip olduğu donatı miktarıyla orantılı olarak sınırlandırılmalıdır.

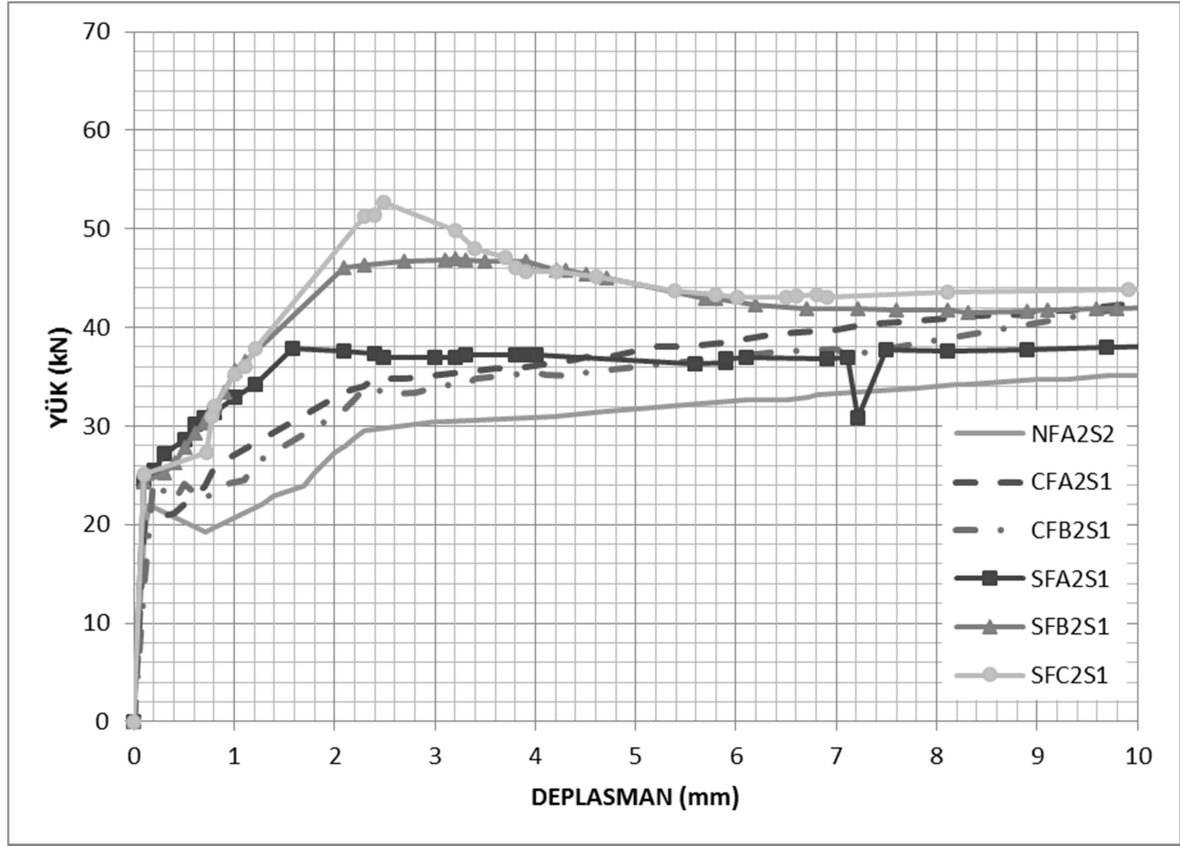
7.5.2. Lif türü ve oranının iki donatılı kirişlere etkisi

Deneylere, 20 mm düşey deplasman değerine son verildiğinden dolayı elemanlarda pekleşme görülmemiştir. Tıpkı tek donatılı elemanlarda olduğu gibi, karışımda kullanılan karbon lifler elemanın davranışını değiştirmeden elemanın yk kapasitesini artırmıştır (şekil 7.50). elik lifli elemanlarda çatlama yknden sonra herhangi bir azalma görülmezken, lifsiz ve karbon lifli elemanlarda sınırlı bir azalma görülmüştür.

Lif içermeyen eğilme elemanında, çatlama yknden sonra bir miktar yk kaybı olmuştur. Ancak yk değerinde tekrar artış olmadan hemen önce, elemanın çekme donatısında akma olmuştur. Deney sonuna kadar elemanın yk kapasitesinde artış görülmüş ve deney sonunda lifsiz elemanın yk kapasitesi %0,33 oranında elik lif içeren elemanın üzerine çıkmıştır.

%0,43 ve %0,65 oranında karbon lif içeren elemanların davranışı da lif içermeyen elemana benzemektedir. Ancak sahip oldukları lif içeriğinden dolayı, çatlama yknden sonra sabit yk farkı deney sonunda kadar devam etmiştir. Deney sonuna kadar yk kapasitesi sabit bir eğimle artan karbon lifli elemanlar, deney sonunda elik lifli kirişlere göre daha yksek

yük değerine ulaşmışlardır. Deney sonunda elemanların çatlak durumu incelendiğinde eğilme bölgesinde çok sayıda eğilme çatlakları oluştuğu, çatlak miktarının karbon lif oranıyla arttığı görüldü.



Şekil 7.50. Çift donatılı betonarme kirişlerin yük-deplasman grafikleri

Karışımında %0,66 ve %0,99 oranında çelik lif içeren elemanlarda yük önce maksimum tepe noktasına ulaşmış daha sonra liflerin sıyrılmasıyla yavaşça azalarak deneyin sonuna kadar sabit kalmıştır. Ancak %0,33 oranında çelik lif içeren elemanda, diğer çelik lifli elemanlarda görülen tepe noktası görülmemiştir. Çatlama yükünden sonra elemanlarda çok sayıda eğilme çatlakları oluştuğu ancak, deneylerin sonunda elemanlarda sadece bir tane eğilme çatlaklarının gelişerek elemanları göçmeye zorladığı görüldü.

Deneylerin sonunda elde edilen yük-deplasman grafikleri ve çatlak durumundan, karbon liflerin elemanın sünekliğini şahit elemana göre artırdığı görüldü. Kullanılan çelik lif miktarının ise fazla olduğu, bundan dolayı çatlak miktarının dağılmadan, elemanın tek çatlakla göçme durumuna ulaştığı görüldü.

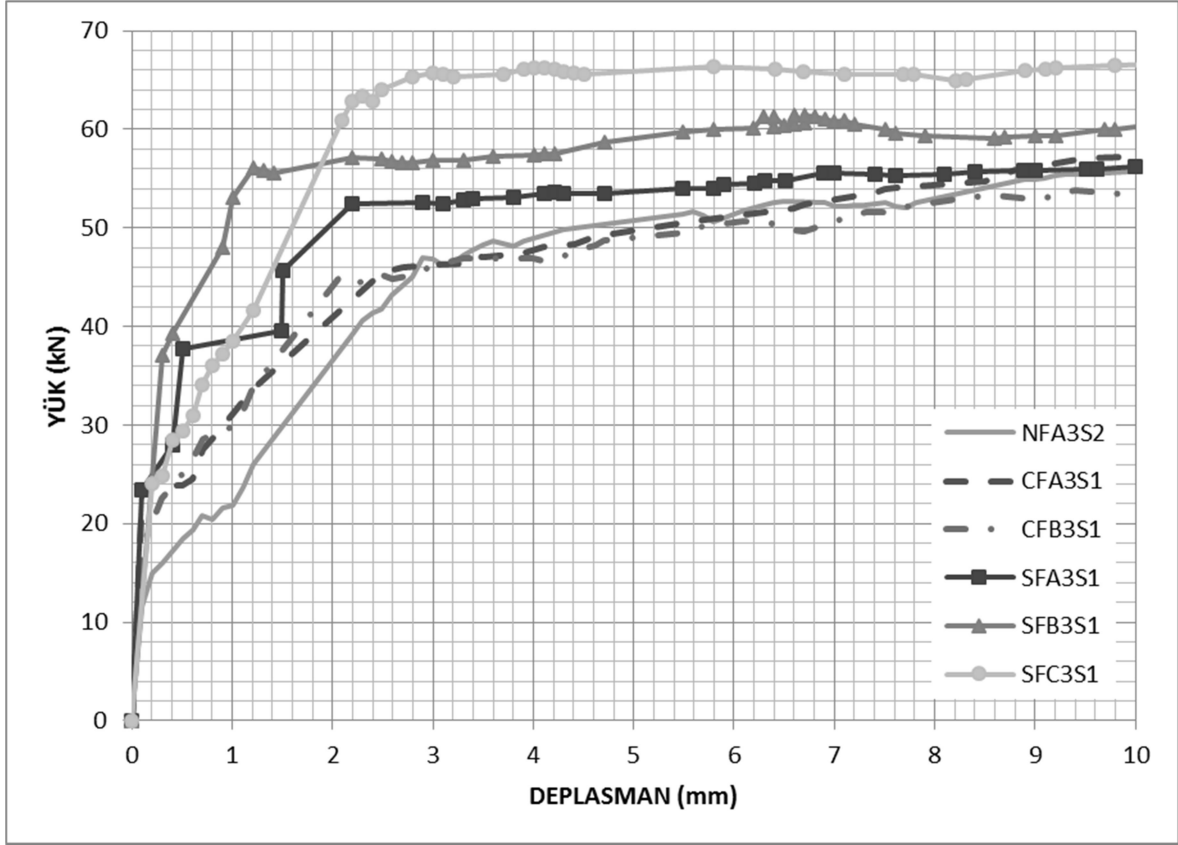
7.5.3. Lif türü ve oranının üç donatılı kirişlere etkisi

Üç donatılı kirişlerde donatı miktarı artırıldığından dolayı, deney sonuna kadar elemanlarda pekleşme görülmemiştir. Sadece %0,99 oranında çelik lif içeren eleman hariç, diğer eleman davranışları lifsiz eleman davranışına benzemektedir. Kullanılan çelik lifler elemanın davranışını değiştirmeden taşıma yükünü artırmış ancak, karbon liflerin etkisi belirgin olarak görülmemiştir. (Şekil 7.51).

Elemanların hiç birisinde çatlama yükünden sonra yük kaybı görülmemiştir. Eleman davranışları genel olarak üç kısımdan oluşmaktadır. Bunlar çatlama yüküne kadar elastik davranış, çatlama yükünden sonra akmaya kadar lineer davranış ve donatı akmasından sonraki daha az eğimli lineer artıştır.

%0,65 oranında karbon lif kullanılması sonucunda elemanda yaklaşık 62 kN yük değerinde kesme çatlağı olmuş ve göçeme durumuna geçmiştir. Karbon lif kullanılması durumunda elemanların akma yüküne ulaşması daha kısa süre almıştır. Ancak lif oranlarının yetersiz olmasından dolayı, akma yükünden sonra yük miktarında şahit numuneye göre bir değişiklik görülmemektedir. Deney sonuna doğru lifsiz ve karbon lifli elemanların üzerindeki yük değerlerinin arttığı, %0,33 ve %0,66 oranında çelik lif içeren kiriş yüklerinin üzerine çıktığı görüldü. Ayrıca deney sonunda, eğilme çatlağı sayısında kullanılan karbon lif oranıyla orantılı olarak artış görüldü.

%0,33, %0,66 ve %0,99 oranlarında çelik lif kullanılması durumunda, elemanların akma yükünde lifsiz ve karbon lifli elemana göre artış gözlenmiştir. %0,33 ve %0,66 oranlarında lif kullanımı elemanın davranışını değiştirmeden eleman üzerindeki yükü 10 mm düşey deplasmana kadar artırırken, %0,99 oranında çelik lif kullanımı akma yükünü artırmış ve daha sonra yük değeri sabit kalmıştır. Deney sonunda kiriş üzerindeki çatlak durumu incelendiğinde, %0,33 ve %0,66 oranında çelik lif içeren elemanlarda 3 tane eğilme çatlağı görülürken, %0,99 oranında çelik lif içeren elemanda ise sadece bir adet eğilme çatlağı olduğu görüldü. %0,33 ve %0,66 oranlarında çelik lif oranlarının 3Ø8 donatı oranında kullanım sınırında olduğu, %0,99 oranında çelik lifin ise gerekli lif miktarından fazla olduğu görüldü.



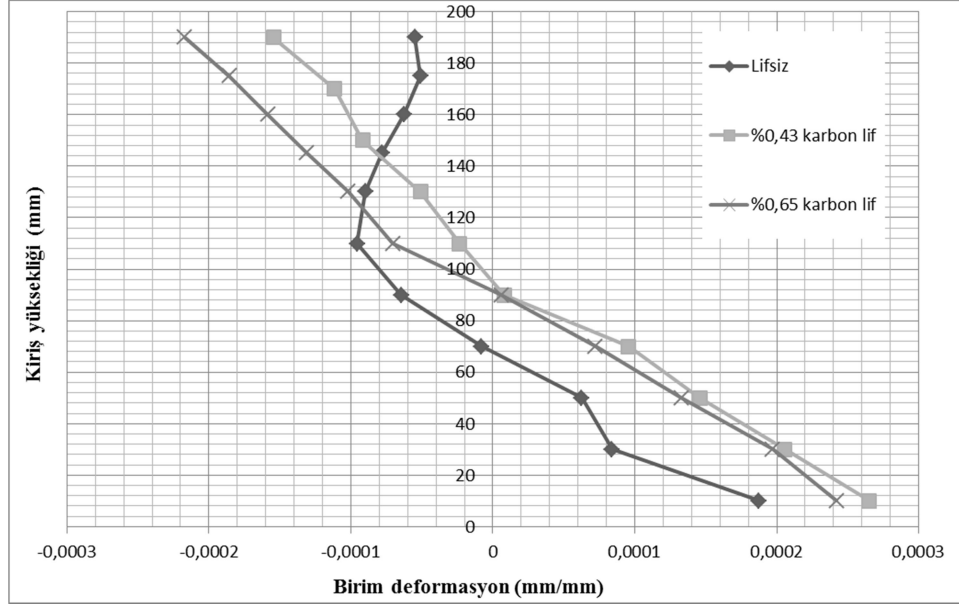
Şekil 7.51. Üç donatılı betonarme kirişlerin yük-deplasman grafikleri

7.6. Kiriş Yüzünde Oluşan Birim Deformasyonlar

Deney sırasında kiriş yüzeyinde oluşan birim deformasyon değişimlerini belirlemek amacıyla kiriş yüzeyine belirli aralıklarla birim deformasyon ölçerler yapıştırılmıştır. Kirişin üzerindeki deformasyon değerlerinin kullanılan lif içeriği ve donatı oranlarından ne derece etkilendiği belirlenmiştir.

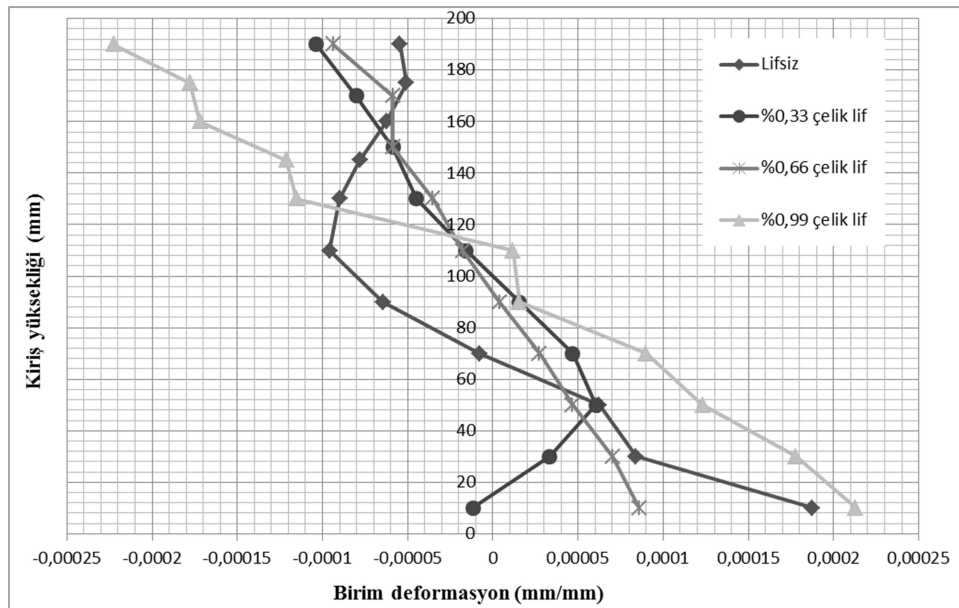
Betonarme kirişlerde çatlakları köprülemek ve böylece kirişin taşıma yükünü kapasitesini artırmak amacıyla çeşitli lifler kullanılmaktadır. Bu kapasite artışının betonda nasıl gerçekleştiği Şekil 7.52’de görülmektedir. Lifli betonlarda çatlama yükünde oluşan birim deformasyon değişimi %0,43 ve %0,65 karbon lif oranlarında benzerlik göstermektedir. Karışım içerisine katılan karbon lifler betonun çekme dayanımını artırırken aynı zamanda tarafsız eksen derinliğini de artırmıştır. Ayrıca basınç bölgesindeki birim şekil değişiminde görülen eğriliğin, karbon lif kullanımıyla birlikte lineerliğe yaklaştığı görülmüştür. Kiriş yükleme mesnetleri arasındaki mesafenin dar olmasından dolayı bu bölgede çekme

gerilmeleri oluşmaktadır. Kullanılan lifler bu çekme gerilmelerini karşılayarak betonun basınç bölgesinde üniform gerilme dağılımı oluşturmaktadırlar.

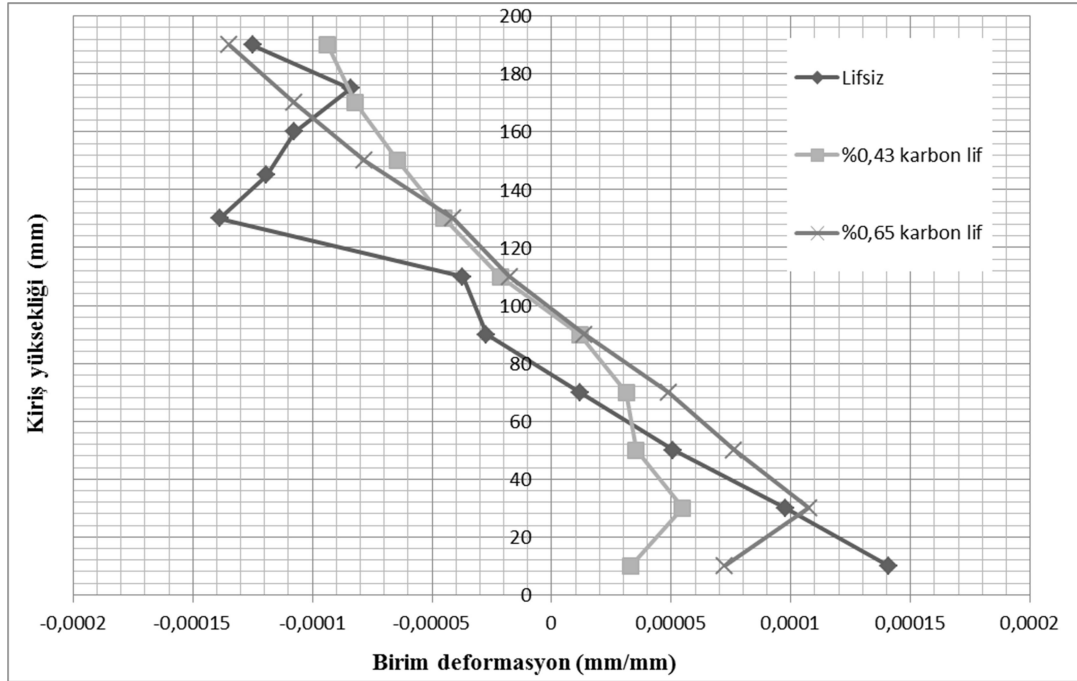


Şekil 7.52. Karbon lifli tek donatılı kirişlerde kırılma yükündeki birim deformasyonlar

Karbon liflerin tek donatılı betona etkisinin benzeri, çelik lif kullanılması durumunda da gözlenmiştir (Şekil 7.53). Çelik liflerin betonu çekme gerilmeleri üzerindeki etkileri karbon liflerle benzerlik göstermektedir. Ancak çelik lif kullanılması tarafsız eksenini daha da yukarıya çıkararak kirişin taşıma gücünü artırmıştır.

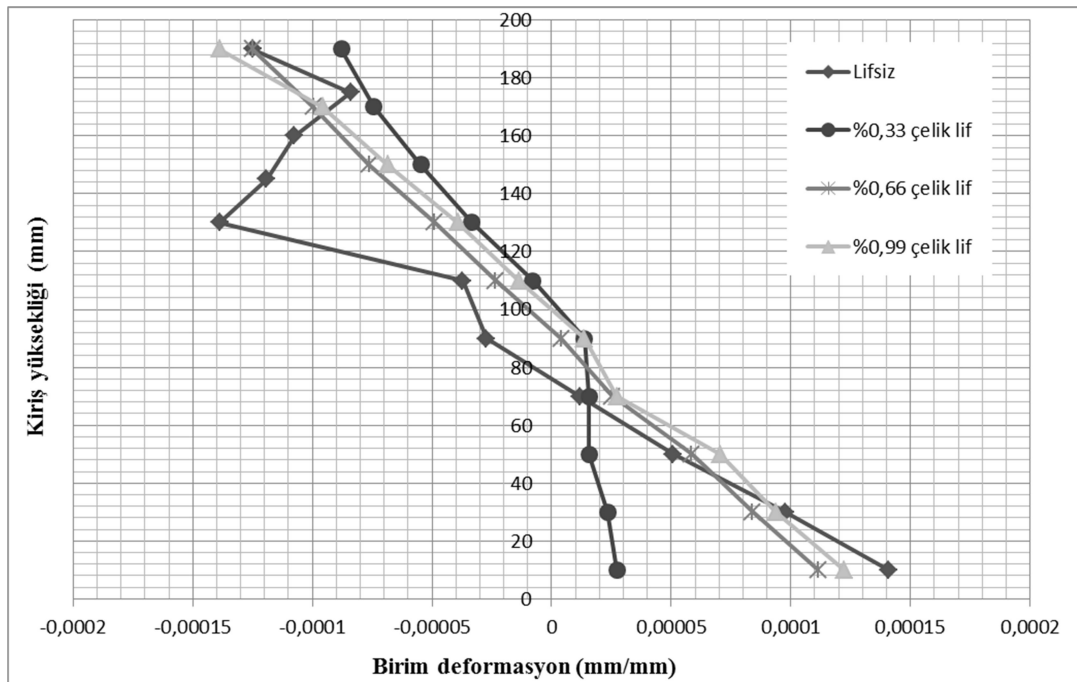


Şekil 7.53. Çelik lifli tek donatılı kirişlerde kırılma yükündeki birim deformasyonlar

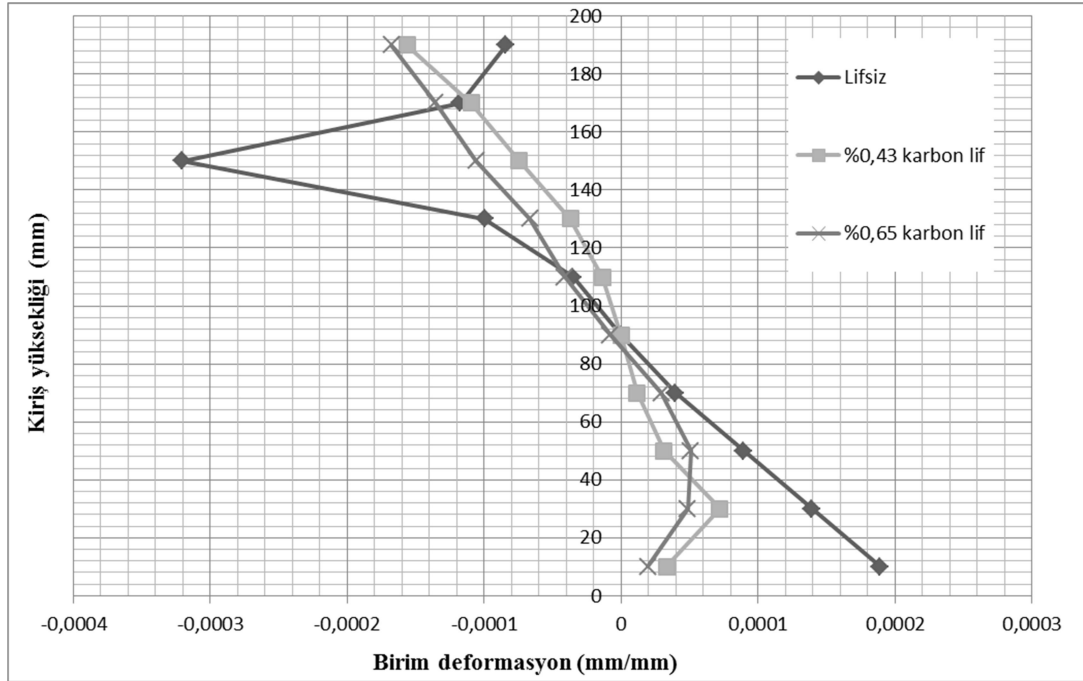


Şekil 7.54. Karbon lifli çift donatılı kirişlerde kırılma yükündeki birim deformasyonlar

Kirişlerde donatı oranı artışıyla birlikte çatlama dayanımında düşüş görülmüştür. Kiriş yüzeyindeki gerilme dağılımı incelendiğinde, yüzeyde oluşan gerilmelerin tek donatılı kirişlerde nazaran daha küçük olması çatlama yükünde azalmaya neden olmuştur (Şekil 7.55).

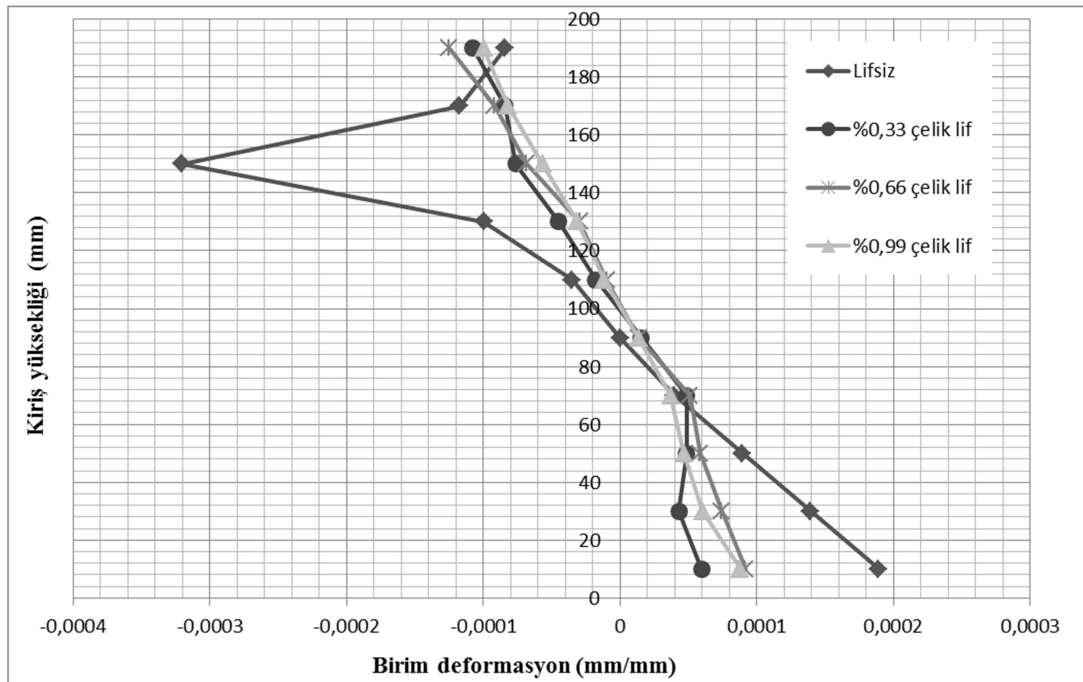


Şekil 7.55. Çelik lifli çift donatılı kirişlerde kırılma yükündeki birim deformasyonlar



Şekil 7.56. Karbon lifli üç donatılı kirişlerde kırılma yükündeki birim deformasyonlar

Üç donatılı kirişlerde karbon lif kullanılması, çelik life göre daha fazla gerilme oluşmasına neden olur. Buna rağmen çelik lifli betonlarda tarafsız eksenin konumunun daha yukarıda olduğu görüldü.



Şekil 7.57. Çelik lifli üç donatılı kirişlerde kırılma yükündeki birim deformasyonlar

7.7. Yüksek Performanslı Betonlarda Minimum Donatı Oranı

Eurocode 2’de betonarme kirişlerde kullanılması gereken minimum donatı miktarı Eş. 7.3’ te verilmiştir.

$$A_{s,min} = 0,26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} bd \quad (7.3)$$

Eşitlikteki f_{ctm} , f_{yk} , b ve d sırasıyla betonun çatlama dayanımını, donatının karakteristik akma dayanımını, kiriş genişliği ve kiriş yüksekliğini göstermektedir.

Carpinteri ve Corrado (2011) kırılma mekaniği yaklaşımı kullanarak yaptıkları çalışmalarında, kirişler için minimum donatı sınırını Eş. 7.4’ de olduğu gibi ifade etmişlerdir.

$$Q_{s,min} = 0,26 \frac{\sigma_u^{0,71} K_{IC}^{0,29}}{\sigma_y h^{0,15}} \quad (7.4)$$

Eşitlikteki σ_u , σ_y , K_{IC} ve h sırasıyla betonun çekme dayanımını, donatının akma dayanımını, kritik gerilme şiddet faktörü ve kesit yüksekliğini göstermektedir. Ancak tasarım sırasında lifli betonlar için gerekli minimum donatı oranını hızlı bir şekilde hesaplamak zaman tasarrufu açısından önemlidir. Bu nedenle, eşitlikteki kırılma parametresini modifiye etmek gerekmektedir. $K_{IC}=(ExG_f)^{0,5}$, $G_f=0,13xe^{3V_f}$ ve $\sigma_u=6,82e^{0,87V_f}$ ifadelerini Eş. 7.4’ te yerine yazarak aşağıdaki Eş. 7.5 denklemi elde edilir.

$$Q_{s,min} = 3,52 \frac{e^{1,05V_f}}{\sigma_y h^{0,15}} K \quad (7.5)$$

Eşitlikteki V_f , σ_y ve K ifadeleri sırasıyla betona eklenen lif hacminin oranı (%) ve donatının karakteristik akma dayanımını ve deney parametresini ifade etmektedir.

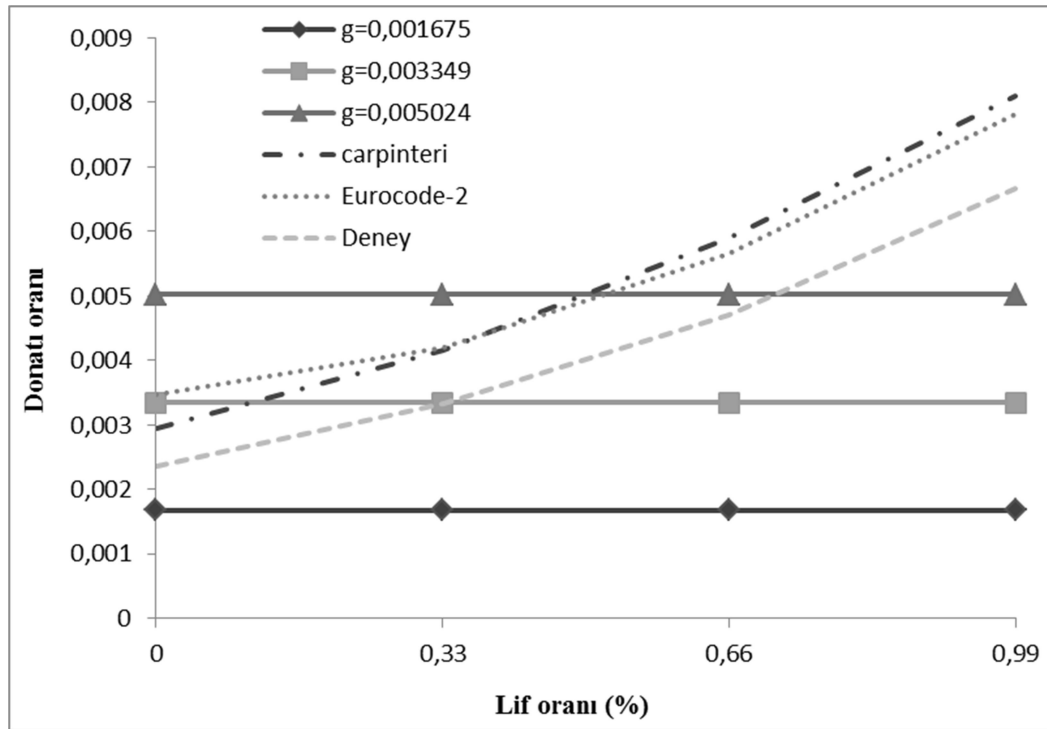
Yukarıdaki denklemde yüksek performanslı betonlar için gerekli minimum donatı oranı, betonun çekme dayanımı ve gerilme şiddet faktörü gibi detaylı bilgiler yerine karışımdaki lif içeriğine bağlı olarak ifade edilmiştir. %0,33 oranında çelik lif içeren çift donatılı kirişin (SFA2S1) davranışı incelendiğinde maksimum yük seviyesinin deney sonuna kadar sabit

olduğu görülmüştür. Minimum donatı oranını kirişin donatı oranına eşitlediğimizde K katsayısını 0,82 olarak buluruz. K parametresini de ilave ettiğimizde minimum donatı oranını Eş.7.6' da olduğu şekilde elde ederiz.

$$Q_{s,min} = 2,87 \frac{e^{1,05} f}{\sigma_y h^{0,15}} \quad (7.6)$$

Yüksek dayanımlı betonlar için Carpinteri ve Eurocode tarafından önerilen ifadeler, yüksek performanslı betonlara uygulanabilir hale dönüştürülmüştür. Deneylerden elde edilen Eş. 7.6 ile Eurocode 2 ve Carpinteri tarafından önerilen eşitlikler (Eş. 7.3 ve Eş. 7.4) Şekil 7.58' de karşılaştırılmıştır. Carpinteri ve Eurocode tarafından önerilen ifadelerin daha korumacı olduğu bu yüzden daha çok donatı alanı gerektirdiği görülmüştür.

Lif oranının artmasıyla birlikte minimum donatı miktarının da arttığı görülmektedir. Buna göre tek donatılı betonarme elemanların hepsi gerekli donatı alanının altında olduğundan dolayı, bu elemanlarda gevrek kırılma gözlenmiştir. Benzer şekilde, %0,99 oranında çelik lif içeren elemanlarda, %0,66 oranında çelik lif içeren tek donatılı ($\rho=0,001675$) ve çift donatılı ($\rho=0,003349$) elemanlarda da gevrek kırılma gözlenmiştir.



Şekil 7.58. Minimum donatı oranlarının karşılaştırması

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneylerden elde edilen bulgular malzeme deneyleri ve betonarme kiriş deneyleri olmak üzere iki ayrı başlık altında verilmiştir.

8.1. Malzeme Deney Sonuçları

Malzemenin bazı mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla farklı oranlarda lif katkısı içeren betonlardan alınan elemanlar üzerinde basınç, yarma ve çentikli elemanlar üzerinde 3 noktalı eğilme testleri yapıldı. Ayrıca donatıların akma dayanımlarını belirlemek amacıyla, donatılar üzerinde çekme testi yapıldı. 3 noktalı eğilme testlerinde, stroke kontrollü yükleme yapabilen 1000 kN kapasiteli Shimadzu marka test cihazı kullanılmıştır. Deney hızları, deney süresince sabit olup malzeme lif türüne göre değişmektedir. Basınç ve yarma deneyleri ise 2000 kN kapasiteli hidrolik yükleme cihazında 9 kN/saniye hızda yükleme yapılarak kırıldı.

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Beton karışımında karbon lif kullanılması durumunda, basınç dayanımı kullanılan lif miktarıyla birlikte artmıştır. Ancak lif oranıyla dayanım artışı arasında lineer bir orantı yoktur.
- Betonda çelik lif kullanımı beton basınç dayanımını lifsiz betona göre %3,20 ile %19,70 arasında değişen oranlarda artırmıştır. Ancak kullanılan lif oranıyla artarken basınç dayanımında azalma görülmüştür.
- Karışımında lif kullanımı, betonun çekme dayanımı üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu, kullanılan lif oranıyla beraber çekme dayanımlarının arttığı görüldü. Karışımında hacimce %0,43 ve %0,65 oranlarında karbon lif içeren betonalar, hacimce %0,33 ve %0,66 oranında kullanılan çelik lifli betonlar ile benzer çekme dayanımına sahiptir.
- Beton karışımında kullanılan karbon lif oranının armasıyla orantılı olarak, 3 noktalı eğilme deneylerinde benzer karışıma sahip elemanların deney sonuçları birbirine daha yakın çıkmıştır. Ancak lif oranlarının düşük olmasında dolayı, karbon lifli

betonlarda lif içermeyen elemanlara göre neredeyse hiç deplasman artışı görülemedi.

- Çelik lifli betonla yapılan çentikli elemanların 3 noktalı eğilme deneylerindeki deplasman değeri ve kırılma enerjileri, karbon lifli elemanların deplasman ve kırılma enerjileri değerlerinden sırasıyla ortalama 20 kat ve 15 kat daha fazladır.
- Hacimce %0,33 oranında çelik lif kullanılan elemanlara göre, %0,99 oranında çelik lif kullanımı kırılma enerjisini artırmış, ancak %0,66 oranında çelik lif kullanımı kırılma enerjisini azaltmıştır.

8.2. Betonarme Kiriş Deney Sonuçları

Yüksek performanslı betonlarda, farklı oranlarda karbon ve çelik lif kullanılmasının minimum donatı oranı üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla, farklı özellikteki 18 adet betonarme kiriş üzerinde deneysel bir çalışma yapılmıştır. Eurocode-2 de belirtilen minimum donatı oranı dikkate alınarak, 3 farklı oranda donatılandırılan kirişler üzerinde 4 noktalı eğilme testi yapıldı.

Betonarme kirişlerin 4 noktalı eğilme deneyi sırasında kirişlerden eğrilik ölçümü, yük ölçümü, düşey deplasman ölçümü ve kiriş yüzüne yapıştırılan birim deformasyon ölçerlerden alınan veriler yardımıyla da birim şekil değiştirmeler ölçümleri yapıldı. Elemanların düşey deplasman değeri 20 mm değerine ulaşınca kadar deneylere devam edildi.

Deney sonuçlarından bazı önemli noktalar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Kirişlerin donatı oranının artmasıyla birlikte, çatlama dayanımlarında genellikle azalma görüldü. Beton dayanımı oldukça yüksek ve donatı oranları da az olduğundan dolayı, donatıların akma anında betonun basınç dayanımına ulaşamamıştır. Bu nedenle elemanın donatı oranı artarken akma dayanımlarında da artış görülmüştür.
- Beton karışımında karbon lifin düşük oranda kullanılmasından dolayı, her 3 farklı donatı oranında da elemanın davranışı lif içermeyen şahit betona göre değişmemiş, ancak 3Ø8 donatılı eleman hariç yük kapasiteleri artmıştır. 3Ø8 donatılı %0,33 ve

%0,66 çelik lif içeren elemanlar hariç, diğer çelik lifli elemanlarda liflerin eleman davranışını değiştirdiği görülmektedir.

- Tek donatılı elemanlarda, çatlama yüküne kadar genellikle lineer elastik bir davranış görülmüştür. Donatı oranının yetersiz olmasından dolayı elemanlar çatlama dayanımından sonra tıpkı donatısız beton gibi ani olarak gelişen bir adet çatlağın etkisiyle yük kaybına uğramışlardır. Elemanların çatlama yükleri deneydeki maksimum yük kapasiteleri olmuştur.
- İki donatılı elemanlarda deney sonunda, karbon lif kullanılan elemanların üzerindeki yük değerinin çelik lif içeren elemanlara yaklaşık olarak eşit olduğu görüldü. Karbon liflerin eleman üzerindeki çatlakları geniş bir yüzeye yayarak donatının tek bölgede uzamasını engellemiş ve taşıma gücü deney sonuna kadar artmıştır. Çelik lif kullanımında ise kiriş üzerinde çatlaklar dağılamadan liflerle köprülenmiş ve tek çatlak oluşmuştur.
- Kirişlerin betonarme eleman davranışını sağlayabilmesi için gerekli minimum donatı oranının, kullanılan lif türü ve içeriğiyle orantılı olarak değiştiği görüldü. Donatı oranı, minimum donatı oranından büyük olan kirişlerde akma yükünden sonra elemanın üzerindeki yük artmaya devam ederken, donatı oranı minimum donatı oranından az olan kirişlerde eleman üzerindeki yükte azalma görülmüştür.
- Donatı oranının, çekme kırılması olacak şekilde denge altında kalması durumunda, karışımda kullanılan lif oranı çekme donatısı ile sınırlandırılmalıdır. Örneğin donatı oranının 0,00502 olması durumunda %0,33 ve %0,66 çelik lif kullanımı, eleman üzerindeki çatlak sayısını artırmakta ve eğilme bölgesine yaymaktadır. Böylece deney sonuna kadar elemanlarda yük artışı görülmektedir. Ancak %0,99 oranında çelik lif kullanılması durumunda eleman üzerinde tek çatlağın olduğu ve yük değerinin sabit kaldığı görüldü.

KAYNAKLAR

- ACI Committee 234. (1996). *Guide for the use of silica fume in concrete*. ACI 234R-96, May 1996. Farmington Hills: American Concrete Institute, 51.
- Aitcin, P. C., (2000). Cement of yesterday and today concrete of tomorrow. *Cement and Concrete Research*, 30, 1349-1359.
- Arslan, A., ve Aydın, A. C. (1999). Lifli betonların genel özellikleri. *Hazır Beton Dergisi*, 36, 67-75.
- Barenblatt, G. I. (1959). Equilibrium cracks forming during brittle fracture. *Prikladnaya Matematika i Mekhanika*, 23, 434-444.
- Barenblatt, G. I. (1962). The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Advances in Applied Mechanics*, 7, 55-129.
- Barr, B. and Bear, T. (1977). Fracture Toughness. *Concrete*, 11, 30-32.
- Bazant, Z. P. (1984). Size effect in blunt fracture: concrete, rock and metal. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 110, 518-535.
- Bazant, Z. P., Kim, J. K., and Pfeiffer, P. A. (1986). Determination of fracture properties from size effect tests. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 112, 289-307.
- Bazant, Z. P. and Kazemi, M. T. (1990). Determination of fracture energy, process zone length, and brittleness number from size effect with application to rock and concrete. *International Journal of Fracture*, 44, 111-131.
- Bazant, Z. P. and Kazemi, M. T. (1991). Size effect on diagonal, shear failure of concrete beams without stirrups. *ACI Structural Journal*, 88, 268-276.
- Bazant, Z. P. and Becq-Giraudon, E. (2002). Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standart. *Cement and Concrete Research*, 32, 529-556.
- Bentur, A. and Mindess, S. (1990). Fibre reinforced cementitious composites. *Elsiver Applied Science*, 309-377.
- Bosco, C., Carpinteri, A. and Debernardi, P. G. (1990a). Minimum reinforcement in high strength concrete. *Journal of Strauctural Engineering*, 116, 427-437.
- Bosco, C., Carpinteri, A. and Debernardi, P. G. (1990b). Fracture of reinforced concrete: Scale effects and snap-back instability. *Engineering Fracture Mechanics*, 35, 665-677.
- Bosco, C. and Carpinteri, A. (1992). Fracture behaviour of beam cracked across reinforcement. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 17, 61-68.

- Carpinteri, A. (1981). Experimental determination of fracture toughness parameters K_{IC} and J_{IC} for aggregative materials. In D. François (Editor), *Advances in Fracture Research*. Paper presented at The Proceeding of the 5th International Conference On Fracture, Cannes, France, 1491-1498.
- Carpinteri, A. (1982). Notch sensitivity in fracture testing of aggregative materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 16(4), 467–481.
- Carpinteri, A. (1984). Stability of fracturing process in RC beams, *Journal of Structural Engineering*, 110, 544-558.
- Carpinteri, A., Ferro, G. and Ventura, G. (2000). The bridged crack model for the analysis of fiber reinforced composite materials, *Composite Materials and Structures*, 301-310.
- Carpinteri, A. and Corrado, M. (2011). Upper and lower bounds for structural design of RC members with ductile response. *Engineering Structures*, 33, 3432-3441.
- Comité Euro-International du Béton, (2010). *Fib model code 2010*, Germany: Document Competence Center Siegmund Kästl e.K., 318.
- Chen, P. W and Chung, D. D. L. (1995). Concrete reinforced with up to 0.2 vol. % of short carbon fibers, *Composites*, 24(1), 33-52.
- Chung, D.D.L. (2000). Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material, *Composites*, 31,511-526.
- Corrado, M., Cadamuro, M. and Carpinteri, A. (2011). Dimensional analysis approach to study snap back- to softening-to- ductile transition in lightly reinforced quasi brittle materials. *International Journal of Fracture*, 172, 53-63.
- Craig, R.J. (1984). Structural application of reinforced fibrous concrete. *Concrete International*, 6,16-21.
- Dancygier, A. N. and Savir, Z. (2006). Flexural behaviour of HSFRC with low reinforcement ratios, *Engineering Structures*, 28, 1503-1512.
- Dugdale, D. S. (1960). Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8, 100-104.
- Erdoğan, T. Y. (2003). *Beton*. Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş., 741.
- Inglis, C.E. (1913). Stresses in plates due to the presence of crack and sharp corners. *Transaction of the Institute of Naval Architects*, 55, 219-241.
- Irwin, G. R. (1957). Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate, *Journal of Applied Mechanics*, 24, 361-364.
- Ferro, G. (2002). Multilevel bridged crack model for high performance concretes. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 38, 177-190.

- Gani, M. S. J. (1997). Fiber reinforced cement and concrete. *Cement and Concrete*, 128-145.
- Glucklich, J. (1969). The “Yield Point” of Concrete. *Contributions to Mechanics*, 271-286.
- Glucklich, J. (1971). On Crack Stability in some Fracture Tests. *Engineering Fracture Mechanics*, 3(3), 333-344.
- Griffith, A. A. (1920). The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 221, 163-198.
- Hillerborg, A. (1976). Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research*, 6, 773-781.
- Jansen, D. C., Shah, S. P. and Rossow, E. (1995). Stress-strain results of concrete from circumferential strain feedback control testing, *ACI Materials Journal*, 92, 419-428.
- Jenq, Y. and Shah, S. P. (1985). Two parameter fracture model for concrete, *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 11(10), 1227-1241.
- Kaplan, M. F. (1961). Crack propagation and the fracture of concrete. *Journal of ACI*, 58, 591-610.
- Karihaloo, B., L. (2014). A new philosophy for the design of RC structures based on concepts of fracture mechanics. *Procedia Materials Science*, 3, 369-377.
- Lee, H. G., Kim, S. S. and Lee, D. G. (2006). Effect of compacted wear debris on the tribological behaviour of carbon/epoxy composites. *Composite Structures*, 74, 136-144.
- Martin, J., Stanton, J., Mitra, N. and Lowes, L. N. (2007). Experimental testing to determine concrete fracture energy using simple laboratory test setup. *ACI Materials Journal*, 104, 575-584.
- Matte, V. and Moranville, M. (1999). Durability of reactive powder composites: influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes. *Cement and Concrete Composites*, 21, 1-9.
- Mindess, S., Nadeau, J. S. and Hay J. M. (1974). Effect of different curing conditions on slow crack growth in cement paste. *Cement and Concrete Research*, 4, 953-965.
- Mindess, S., Lawrence, J. and Kesler, C. F. (1977). The J integral as a fracture criterion for fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 7, 731-742.
- Mindess, S. (1984). Rate of loading effects on the fracture of cementitious material. *Applications of Fracture Mechanics to Cementitious Composite*, 94, 617-636.

- Naus, D. J. and Lott, J. L. (1969). Fracture toughness of portland cement concrete. *Journal of ACI*, 66, 481-489.
- Okamura, P. L., Watanabe, K. and Takano, T. (1975). Deformation and strength of cracked member under bending moment and axial force. *Engineering Fracture Mechanics*, 7, 531-539.
- Özyurt, N. (2000). *Ultra yüksek dayanımlı çimento esaslı kompozit malzemelerin mekanik davranışı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Raouf, Z. A. (1975). *Dynamic mechanical properties of fiber reinforced cement Composites*, Ph. D. Thesis, University of Manchester, England.
- Rice, J. R. (1968). A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *Journal of Applied Mechanics*, 35, 379-386.
- Richard, P. and Cheyrezy, M. H. (1994). Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength, *Internal Report*, Bouygues, 15.
- RILEM Technical Committee 50-FCM (1985). Draft recommendation: determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bent test on notched beams. *Materials and Structures*, 106, 285-290.
- Topçu, İ. B., Canbaz, M. ve Karakurt, C. (2006). Beton üretiminde kimyasal katkı kullanımı. *Politeknik Dergisi*, 9(1), 59-63.
- Veubeke, B. F. D. (1974). Variational principles and the patch test. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 8, 783-801.
- Wills, G.I. (1967). A comparison of the fracture criteria of Griffith and Barenblatt. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 15, 151-162.
- Yaprak, H. (2002). *Beton kaplamalı kanallarda malzeme ve dayanıklılığını artırma olanakları*, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Yayla, P. (2007). *Kırılma Mekaniği*. Türkiye: Çağlayan Kitapevi, 229.
- Yeğinobalı, A. (2009). *Silis dumanı ve çimento ile betonda kullanımı* (Altıncı Baskı). Ankara: Fersa Matbaacılık, 66.
- Zener, C. and Holloman, J. H. (1944). Effect of strain rate upon plastic flow of steel. *Journal of Applied Physics*, 15, 22-32.
- Zheng, Q. and Chung, D. D. L. (1989) Carbon fiber reinforced cement composites improved by using chemical agents. *Cement and Concrete Research*, 19, 25-41.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı :GÜMÜŞ, Muhammed
Uyruğu :T.C.
Doğum tarihi ve yeri :11.09.1990, Afyonkarahisar
Medeni hali :Evli
Telefon :0(541)618 76 28
Faks :-
e-mail :muhammedgumus@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi/İnşaat Müh.	Devam Ediyor
Lisans	Yıldız Teknik Üniversitesi/İnş. Müh. Böl.	2012
Lise	Karaman Fen Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

-

Hobiler

Yüzme, Trekking

DİZİN

A

açılma modu · 21, 26
 agrega · 1, 5, 7, 23, 24, 25, 30, 37
 Akışkanlaştırıcı · 11, 12, 40
 akma dayanımı · 31, 34, 69

B

Basınç Dayanımı · 5
 Blain · 13

C

çatlak · 7, 8, 9, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 31, 32, 33, 60, 62, 64, 78, 97, 100, 104, 106, 107, 117
 çekme dayanımı · 49
 çelik lif · 48, 49, 50, 53, 56, 57, 58, 59, 82, 84, 86, 91, 92, 93, 98, 104, 105, 106, 107, 115, 116, 117
 çimento · 1, 2, 4, 5, 7, 8, 11, 12, 13, 24, 25, 26, 37, 40, 122

D

deplasman · 25, 28, 29, 32, 42, 43, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 73, 74, 75, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 85, 87, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 103, 104, 105, 106, 108, 115, 116

E

Eğilme Dayanımı · 5
 eğrilik · 31, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 99, 100, 101, 105, 116
 Elastisite modülü · 39

G

geometrik fonksiyon · 33
 gevreklik numarası · 18, 32

H

hidratasyon · 4, 11, 13, 37

J

J integrali · 17, 25

K

Karbon lif · 10, 39, 41, 48, 51, 58, 107
 K_{IC} · xix, 25, 28, 31, 120
 Kırılma Enerjisi · 5, 28, 52
 kırılma mekanizmi · v, xix, 2, 16, 17, 18, 24, 25
 Kırılma tokluğu · 21, 22
 küp · 41, 47, 48

L

LEKM · xix, 16, 17, 25
 Load Cell · 42
 LVDT · xix, 42, 44, 59, 60, 63, 70, 72, 74, 75, 77, 80, 82, 85, 86, 89, 91, 93, 96, 98, 100

M

mikro · 2, 4, 24, 25
 Mod I · 26

P

polipropilen · 7, 8

S

silindir · 41, 49, 50
 silis dumanı · 1, 2, 4, 10, 11, 13, 14, 39, 40
 Silis kumu · 37, 38
 strain gauge · 43
 süneklik · 1, 2, 9, 54

V

veri toplayıcı · 43

W

Watson · 43



GAZİ GELECEKTİR..



Gazi gelecektir

