



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

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT İÇEREN FRP DONATILI**  
**KİRİŞLERİN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**HÜSNE YENER ÜNAL**  
**YÜKSEK LİSANS**



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

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT İÇEREN FRP DONATILI**  
**KİRİŞLERİN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**HÜSNE YENER ÜNAL**  
**YÜKSEK LİSANS**

**DANIŞMAN**  
**PROF. DR. SERKAN TOKGÖZ**

**ADANA 2022**



Bu tezde yer alan tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik davranışa uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, bu kuralların ve davranışların gerektirdiği şekilde bu çalışmaya özgün olmayan tüm bilgiler için atıf verdiğimi ve kaynak gösterdiğimi beyan ederim.

[İmza]

Hüsne YENER ÜNAL

# ÖZET

## ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT İÇEREN FRP DONATILI KİRİŞLERİN DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Hüsne YENER ÜNAL

Yüksek Lisans, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Serkan TOKGÖZ

Aralık 2022, 106 sayfa

Beton, basınç dayanımının artması ile gevrek davranış sergilemektedir. Bu olumsuzluğu gidermek ve sünek davranış elde etmek için betonarme elemanların yapımında farklı tipte lifler kullanılmaktadır. Tasarlanmış çimento esaslı kompozit (ECC), yüksek çekme sünekliği ve mikro çatlak genişliği özellikleri nedeniyle betonarme yapılar için çok faydalı bir malzemedir. Ayrıca, Fiber Takviyeli Polimerler (FRP) yüksek korozyon direnci, yüksek çekme dayanımı, hafifliği ve kimyasal reaksiyonlara karşı yüksek direnci gibi özelliklerinden dolayı, çelik donatılara karşı alternatif malzemedir. FRP donatının gevrek davranışı, FRP ile donatılandırılmış yapıların sünekliğini azaltır. Son zamanlarda, elemanların sünekliğini arttırmak ve FRP donatının yüksek dayanım özelliğini korumak için yapılarda geleneksel Portland çimentolu beton yerine ECC malzemesi kullanılmaktadır.

Sunulan tezde, ECC ve beton malzeme içeren FRP takviyeli kirişler hazırlanmıştır. Kirişler, yapısal davranışı belirlemek için dört noktalı statik yük altında test edilmiştir. Deneysel çalışmada, kirişlerin yük-deplasman eğrileri ve FRP donatıların yük-gerinim diyagramları elde edilmiştir. Testlerde, kirişler için iyi derecede deplasman kapasitesi görülmüştür. Artan ECC derinliği ile kirişlerin yük taşıma kapasitesinde ve kiriş orta deplasmanında artış gözlenmiştir. Ayrıca, artan ECC derinliği ile daha fazla gerinim kapasitesi elde edildiği görülmüştür. Çalışmada, beton ve ECC malzemesi içeren FRP donatılı kirişlerin taşıma gücü kapasitesi ve yük-deplasman eğrilerini elde etmek için beton ve ECC malzemesinin doğrusal olmayan davranışını esas alan teorik bir yöntem geliştirilmiştir. Test edilen kirişlerin deplasmanları ACI 440.1R-15 Standardı ve Sinüs Eğrisi Yöntemi esas alınarak belirlenmiştir. Elde edilen teorik yük-deplasman eğrileri deneysel eğrilerle karşılaştırılmıştır. Çalışmada, deneysel ve teorik sonuçlar arasında iyi derecede uyum elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** ECC, çimento esaslı kompozit, fiber takviyeli polimer, çelik, beton, kiriş

# **ABSTRACT**

## **INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF FRP REINFORCED BEAMS CONTAINING ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE**

Hüsne YENER ÜNAL

M.Sc., Department of Civil Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Serkan TOKGÖZ

December 2022, 106 pages

Concrete exhibits brittle behaviour with increasing compressive strength, so different types of fibers are used in the construction of reinforced concrete members to improve this disadvantage and to obtain ductile behaviour. Engineered cementitious composite (ECC) is a very useful material for reinforced concrete structures due to its high tensile ductility and micro crack wideness features. Besides, Fiber Reinforced Polymers (FRP) are good alternative materials to steel reinforcements due to its features such as, high corrosion resistance, high tensile strength, lightweight and high resistance to the chemical reactions. Brittle behaviour of FRP reinforcement, decreases the ductility of FRP reinforced structures. Recently, ECC material has been used in the structures instead of ordinary Portland cement concrete to increase ductility of members and to maintain high strength property of FRP reinforcement.

In the presented thesis, FRP reinforced beams having ECC and concrete material were prepared. The beams were tested under four-point static load to determine the structural behaviour. In the experimental study, load-deflection curves of beams and load-strain diagrams of FRP reinforcements have been obtained. In the tests, good degree of deflection capacity was seen for the beams. An increase was observed in load carrying capacity and midspan deflection of the beams with increasing ECC deepness. In addition, it was seen that more strain capacity obtained with increasing ECC deepness. In the study, a theoretical method was developed considering nonlinear behaviour of the concrete and ECC material to obtain the ultimate load capacity and load-deflection curves of FRP reinforced beams having concrete and ECC material. The deflections of the tested beams were determined on the basis of ACI 440.1R-15 Code and Sine Curve Method. The obtained theoretical load-deflection curves have been compared with experimental curves. In the study, good degree of agreement has been attained between the experimental and theoretical results.

**Keywords:** ECC, Engineered cementitious composite, fiber reinforced polymer, steel, concrete, beam



## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez programımın yürütülmesi esnasında; tez konumun seçiminde öneride bulunan, deneysel çalışmalarında bana her türlü desteği veren, çalışmalarına yön vererek değerli bilgi ve yardımlarıyla her zaman yanımda olan sayın hocam Prof. Dr. Serkan TOKGÖZ'e teşekkür ederim.

Tez ve laboratuvar çalışmalarında ilgi ve yardımlarını esirgemeyen, değerli tecrübeleri ile destek veren Arş. Gör. Sedat KARAAHMETLİ'ye teşekkür ederim. Laboratuvar çalışmalarım sırasında yaptığı özverili yardımlarından dolayı Hasan DAŞ'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarına yaptıkları ürün desteklerinden dolayı Forta Dış Tic.İnş.Taah.A.Ş., ve Master Builders Solutions Yapı Kimyasalları San. ve Tic. Ltd. Şti. firmalarına teşekkür ederim.

Mensubu olmaktan gurur duyduğum Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü 6.Bölge Müdürlüğü'nde görev yapan, çalışmalarım süresince beni destekleyen amirlerim, Proje İnşaat Şube Müdürü Sayın Agah SİNEREN, İçme suyu ve Atıksu Şube Müdürü Sayın Duran GÜNEŞ ve meslektaşım Faris ARSLAN'a teşekkür ederim.

Desteklerini ve ilgilerini hiçbir zaman eksik etmeyen, tez çalışmam boyunca beni devamlı motive eden annem Eflatun YENER, babam Mehmet YENER, kardeşlerim Hakan YENER ve Merve ÇALĞAN'a sabır ve anlayışlarından dolayı teşekkür ederim. En büyük destekçim eşim Ebubekir ÜNAL ve canım kızım Melisa ÜNAL'a gösterdikleri sonsuz sevgi, hoşgörü ve destekleri için çok teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                                   |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ÖZET .....                                                                                        | iv   |
| ABSTRACT .....                                                                                    | v    |
| TEŞEKKÜR .....                                                                                    | vii  |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                                  | viii |
| ŞEKİLLER LİSTESİ.....                                                                             | xi   |
| TABLolar LİSTESİ .....                                                                            | xv   |
| KISALTMALAR .....                                                                                 | xvi  |
| 1. GİRİŞ .....                                                                                    | 1    |
| 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....                                                                         | 6    |
| 2.1. ECC İçeren Kirişlerin Yapısal Davranışı Üzerine Yapılan Önceki Çalışmalar .....              | 6    |
| 2.2. FRP Donatılı Kirişlerin Yapısal Davranışı Üzerine Yapılan Önceki Çalışmalar.....             | 11   |
| 2.3. ECC İçeren FRP Donatılı Kirişlerin Yapısal Davranışı Üzerine Yapılan Önceki Çalışmalar ..... | 14   |
| 3. MALZEME VE YÖNTEM.....                                                                         | 18   |
| 3.1. Deneysel Çalışma .....                                                                       | 18   |
| 3.1.1. Malzemeler .....                                                                           | 18   |
| 3.1.1.1. Agregat .....                                                                            | 19   |
| 3.1.1.2. Çimento .....                                                                            | 19   |
| 3.1.1.3. Silis Kumu .....                                                                         | 19   |
| 3.1.1.4. Uçucu Kül .....                                                                          | 20   |
| 3.1.1.5. Polipropilen Lif (PP).....                                                               | 20   |
| 3.1.1.6. Süper akışkanlaştırıcı .....                                                             | 21   |
| 3.1.1.8. Donatı.....                                                                              | 22   |
| 3.1.2. Kiriş Numunelerinin Üretilmesi.....                                                        | 22   |
| 3.1.2.1. Karışım Oranlarının Belirlenmesi .....                                                   | 22   |
| 3.1.2.2. Deney Numuneleri, Boyutları ve Donatı Düzeni.....                                        | 23   |
| 3.1.2.3. Kiriş Numunelerin Hazırlığı .....                                                        | 25   |
| 3.1.2.4. ECC ve Normal Beton Üretimi.....                                                         | 28   |
| 3.1.3. Deney yöntemi .....                                                                        | 31   |
| 3.1.3.1. Basınç Dayanımı Deneyi .....                                                             | 31   |
| 3.1.3.2. Eğilme Dayanımı Deneyi.....                                                              | 32   |

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.3.3. Eksenel Çekme Deneyi .....                                           | 32 |
| 3.1.3.4. Kiriş Eğilme Deneyi.....                                             | 33 |
| 3.2. Analitik Çalışma .....                                                   | 36 |
| 3.2.1. Yöntemde esas alınan temel varsayımlar .....                           | 36 |
| 3.2.2. ECC için gerilme-birim deformasyon modeli .....                        | 37 |
| 3.2.3. Normal beton için gerilme-birim deformasyon modeli.....                | 38 |
| 3.2.4. FRP için gerilme-birim deformasyon modeli.....                         | 39 |
| 3.2.5. Çelik donatı için gerilme-birim deformasyon modeli .....               | 40 |
| 3.2.6. Analiz yöntemi formülasyonu .....                                      | 40 |
| 3.2.7. Temel denge denklemleri .....                                          | 42 |
| 3.2.8. Deplasman Hesabı .....                                                 | 43 |
| 3.2.8.1. Sinüs Eğrisi Yöntemi ile Kiriş Yük -Deplasman Eğrisinin Tayini ..... | 45 |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....                                                 | 47 |
| 4.1. Deney Bulguları.....                                                     | 47 |
| 4.1.1. Silindir Numune Deneyleri.....                                         | 47 |
| 4.1.2. Prizma Numune Deneyleri .....                                          | 49 |
| 4.1.3. Eksenel Çekme Deneyi.....                                              | 50 |
| 4.1.4. Kiriş Numune Deneyleri.....                                            | 52 |
| 4.1.4.1. RCB-1 Kiriş Numunesi.....                                            | 52 |
| 4.1.4.2. CB-1 Kiriş Numunesi .....                                            | 56 |
| 4.1.4.3. ECCB-1 Kiriş Numunesi .....                                          | 61 |
| 4.1.4.4. ECCB-2 Kiriş Numunesi .....                                          | 65 |
| 4.1.4.5. ECCB-3 Kiriş Numunesi .....                                          | 71 |
| 4.1.4.6. ECCB-4 Kiriş Numunesi .....                                          | 76 |
| 4.2. Analitik Bulgular .....                                                  | 89 |
| 4.2.1. Kiriş Taşıma Gücü Momenti ve Kırılma Yüğü.....                         | 89 |
| 4.2.2. Kiriş Deplasmanı .....                                                 | 91 |
| 4.2.2.1. RCB-1 Kiriş Numunesi.....                                            | 91 |
| 4.2.2.2. CB-1 Kiriş Numunesi .....                                            | 92 |
| 4.2.2.3. ECCB-1 Kiriş Numunesi .....                                          | 93 |
| 4.2.2.4. ECCB-2 Kiriş Numunesi .....                                          | 94 |
| 4.2.2.5. ECCB-3 Kiriş Numunesi .....                                          | 95 |
| 4.2.2.6. ECCB-4 Kiriş Numunesi .....                                          | 96 |

|                   |     |
|-------------------|-----|
| 5. SONUÇLAR ..... | 97  |
| 6. ÖNERİLER ..... | 99  |
| KAYNAKLAR.....    | 100 |
| ÖZGEÇMİŞ .....    | 106 |



## ŞEKİLLER LİSTESİ

|             |                                                                                                                                                                                                                  |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1.  | ECC üretiminde kullanılan polipropilen lif .....                                                                                                                                                                 | 21 |
| Şekil 3.2.  | Kiriş boyutları ve kesit detayları.....                                                                                                                                                                          | 24 |
| Şekil 3.3.  | Kiriş donatı hazırlığı .....                                                                                                                                                                                     | 25 |
| Şekil 3.4.  | GFRP donatıya gerinim ölçer yerleştirilmesi .....                                                                                                                                                                | 26 |
| Şekil 3.5.  | Kalıplara donatının yerleştirilmesi.....                                                                                                                                                                         | 27 |
| Şekil 3.6.  | Karışıma giren malzemelerin hazırlanması .....                                                                                                                                                                   | 27 |
| Şekil 3.7.  | ECC üretim aşamaları .....                                                                                                                                                                                       | 28 |
| Şekil 3.8.  | Silindir numune, prizma numune ve dog-bone numune kalıpları .....                                                                                                                                                | 29 |
| Şekil 3.9.  | Silindir numune, prizma numune ve dog-bone numune alımı.....                                                                                                                                                     | 29 |
| Şekil 3.10. | ECC ve normal beton içeren kirişlerin hazırlanması aşamaları.....                                                                                                                                                | 30 |
| Şekil 3.11. | Beton basınç deneyi .....                                                                                                                                                                                        | 31 |
| Şekil 3.12. | Dört nokta eğilme deneyi.....                                                                                                                                                                                    | 32 |
| Şekil 3.13. | Eksenel çekme deneyi.....                                                                                                                                                                                        | 33 |
| Şekil 3.14. | Kiriş eğilme deneyinde kullanılan (a) eğilme test cihazı, (b) deplasman ölçer, (c) GFRP donatı için FLAB-5-11-3LJC-F gerinim ölçer (e) normal beton ve ECC için PL-60-11 gerinim ölçer, (f) veri toplayıcı ..... | 34 |
| Şekil 3.15. | Kiriş dört nokta eğilme deney düzeneği resim olarak gösterimi .....                                                                                                                                              | 34 |
| Şekil 3.16. | Kiriş dört nokta eğilme deney düzeneği şematik olarak gösterimi.....                                                                                                                                             | 35 |
| Şekil 3.17. | ECCB-4 kirişinde gözlenen sünek davranış .....                                                                                                                                                                   | 36 |
| Şekil 3.18. | ECC için (a) basınç (b) çekme modeli.....                                                                                                                                                                        | 37 |
| Şekil 3.19. | Hognestad modeli .....                                                                                                                                                                                           | 38 |
| Şekil 3.20. | FRP donatı için gerilme-birim deformasyon ilişkisi .....                                                                                                                                                         | 39 |
| Şekil 3.21. | Çelik donatı için gerilme-birim deformasyon ilişkisi .....                                                                                                                                                       | 40 |
| Şekil 3.22. | Çatlama durumu birim deformasyon ve gerilme dağılımı.....                                                                                                                                                        | 41 |
| Şekil 3.23. | Taşıma gücü durumu birim deformasyon ve gerilme dağılımı .....                                                                                                                                                   | 41 |
| Şekil 3.24. | Eğilmiş betonarme kiriş .....                                                                                                                                                                                    | 45 |
| Şekil 4.1.  | (a) ECCB-2 ve ECC-3 kirişi ECC, (b) ECCB-2 ve ECC-3 kirişi normal beton silindir numunelere ait gerilme-birim kısalma eğrileri. ....                                                                             | 48 |
| Şekil 4.2.  | (a) Normal beton (b) ECC silindir numunelerin basınç deneyi sonrası durumu .....                                                                                                                                 | 49 |

|                    |                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.3.</b>  | Dört nokta eğilme deneyi sonrası (a) normal beton numeleri ve (b) ECC numuneleri .....                                                                                                   | 50 |
| <b>Şekil 4.4.</b>  | Eksenel çekme deneyi sonrası (a) ECCB-1 ve ECCB-4 kirişleri ECC karışımına ait (b) ECCB-2 ve ECCB-3 kirişleri ECC karışımına ait dog-bone numuneler.....                                 | 50 |
| <b>Şekil 4.5.</b>  | (a) ECCB-1 ve ECCB-4 kirişleri ECC karışımına ait (b) ECCB-2 ve ECCB-3 kirişleri ECC karışımına ait dog-bone numunelerin eksenel çekme deneyi sonrası gerilme–birim uzama eğrileri ..... | 52 |
| <b>Şekil 4.6.</b>  | RCB-1 kirişi çatlak gelişimi .....                                                                                                                                                       | 53 |
| <b>Şekil 4.7.</b>  | RCB-1 kirişi çatlak gelişimi (diğer yüz).....                                                                                                                                            | 54 |
| <b>Şekil 4.8.</b>  | RCB-1 kirişi çatlak gelişimi şematik görünümü.....                                                                                                                                       | 55 |
| <b>Şekil 4.9.</b>  | RCB-1 kirişine ait yük-deplasman eğrisi.....                                                                                                                                             | 56 |
| <b>Şekil 4.10.</b> | CB-1 kirişi çatlak gelişimi .....                                                                                                                                                        | 57 |
| <b>Şekil 4.11.</b> | CB-1 kirişi çatlak gelişimi (diğer yüz) .....                                                                                                                                            | 58 |
| <b>Şekil 4.12.</b> | CB-1 kirişi çatlak gelişimi şematik görünümü .....                                                                                                                                       | 59 |
| <b>Şekil 4.13.</b> | CB-1 kirişine ait yük-deplasman eğrisi .....                                                                                                                                             | 60 |
| <b>Şekil 4.14.</b> | CB-1 kirişine ait donatı yük-birim uzama eğrisi .....                                                                                                                                    | 60 |
| <b>Şekil 4.15.</b> | ECCB-1 kirişi çatlak gelişimi.....                                                                                                                                                       | 62 |
| <b>Şekil 4.16.</b> | ECCB-1 kirişi çatlak gelişimi detay görünümü.....                                                                                                                                        | 62 |
| <b>Şekil 4.17.</b> | ECCB-1 kirişi çatlak gelişimi şematik görünümü .....                                                                                                                                     | 63 |
| <b>Şekil 4.18.</b> | ECCB-1 kirişine ait yük-deplasman eğrisi .....                                                                                                                                           | 64 |
| <b>Şekil 4.19.</b> | ECCB-1 kirişine ait donatı yük birim-deformasyon eğrisi.....                                                                                                                             | 64 |
| <b>Şekil 4.20.</b> | ECCB-2 kirişi çatlak gelişimi.....                                                                                                                                                       | 67 |
| <b>Şekil 4.21.</b> | ECCB-2 kirişi çatlak gelişimi detay görünümü.....                                                                                                                                        | 67 |
| <b>Şekil 4.22.</b> | ECCB-2 kirişi çatlak gelişimi (diğer yüz) .....                                                                                                                                          | 68 |
| <b>Şekil 4.23.</b> | ECCB-2 kirişi çatlak gelişimi şematik görünümü.....                                                                                                                                      | 69 |
| <b>Şekil 4.24.</b> | ECCB-2 kirişine ait yük-deplasman eğrisi .....                                                                                                                                           | 70 |
| <b>Şekil 4.25.</b> | ECCB-1 kirişine ait donatı yük-birim uzama eğrisi .....                                                                                                                                  | 70 |
| <b>Şekil 4.26.</b> | ECCB-3 kirişi çatlak gelişimi .....                                                                                                                                                      | 72 |
| <b>Şekil 4.27.</b> | ECCB-3 kirişi iki yük arası eğilme bölgesi çatlak gelişimi detay görünümü .....                                                                                                          | 72 |
| <b>Şekil 4.28.</b> | ECCB-3 kirişi yük dışı eğilme bölgesi çatlak gelişimi detay görünümü...                                                                                                                  | 73 |
| <b>Şekil 4.29.</b> | ECCB-3 kirişi çatlak gelişimi (diğer yüz) .....                                                                                                                                          | 73 |

|                    |                                                                                         |    |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.30.</b> | ECCB-3 kirişi çatlak gelişimi şematik görünümü .....                                    | 74 |
| <b>Şekil 4.31.</b> | ECCB-3 kirişine ait yük-deplasman eğrisi .....                                          | 75 |
| <b>Şekil 4.32.</b> | ECCB-3 kirişine ait donatı yük birim-uzama eğrisi .....                                 | 75 |
| <b>Şekil 4.33.</b> | ECCB-4 kirişi çatlak gelişimi .....                                                     | 78 |
| <b>Şekil 4.34.</b> | ECCB-4 kirişi çatlak gelişimi detay görünümü.....                                       | 78 |
| <b>Şekil 4.35.</b> | ECCB-4 kirişi çatlak gelişimi (diğer yüz) .....                                         | 79 |
| <b>Şekil 4.36.</b> | ECCB-3 kirişi çatlak gelişimi şematik görünümü .....                                    | 80 |
| <b>Şekil 4.37.</b> | ECCB-4 kirişine ait yük-deplasman eğrisi .....                                          | 81 |
| <b>Şekil 4.38.</b> | ECCB-4 kirişine ait donatı yük birim-uzama eğrisi .....                                 | 81 |
| <b>Şekil 4.39.</b> | RCB-1 ve CB-1 kirişine ait yük-deplasman eğrileri.....                                  | 82 |
| <b>Şekil 4.40.</b> | CB-1 ve ECCB-4 kirişine ait yük-deplasman eğrileri .....                                | 83 |
| <b>Şekil 4.41.</b> | (a) ECCB-4 (b) CB-1 kirişine ait basınç bölgesi ezilmesi görünümü .....                 | 83 |
| <b>Şekil 4.42.</b> | ECCB-1,ECCB-2 ve ECCB-4 kirişine ait yük-deplasman eğrileri .....                       | 84 |
| <b>Şekil 4.43.</b> | ECCB-1,ECCB-2 ve ECCB-4 kirişine ait donatı yük-birim uzama eğrileri .....              | 85 |
| <b>Şekil 4.44.</b> | ECCB-2 ve ECCB-3 kirişine ait yük-deplasman eğrileri .....                              | 86 |
| <b>Şekil 4.45.</b> | Kirişlere ait yük-deplasman eğrileri .....                                              | 86 |
| <b>Şekil 4.46.</b> | Kirişlere ait donatı yük-birim uzama eğrileri .....                                     | 87 |
| <b>Şekil 4.47.</b> | Kiriş numunelere ait moment diyagramı .....                                             | 88 |
| <b>Şekil 4.48.</b> | ECCB-4 kirişi silindir numune deneysel gerilme-birim deformasyon eğrisi .....           | 89 |
| <b>Şekil 4.49.</b> | RCB-1 kirişinde deneysel ve teorik sonuçlardan elde edilen yük–deplasman eğrileri.....  | 91 |
| <b>Şekil 4.50.</b> | CB-1 kirişinde deneysel ve teorik sonuçlardan elde edilen yük–deplasman eğrileri.....   | 92 |
| <b>Şekil 4.51.</b> | ECCB-1 kirişinde deneysel ve teorik sonuçlardan elde edilen yük–deplasman eğrileri..... | 93 |
| <b>Şekil 4.52.</b> | ECCB-2 kirişinde deneysel ve teorik sonuçlardan elde edilen yük–deplasman eğrileri..... | 94 |
| <b>Şekil 4.53.</b> | ECCB-3 kirişinde deneysel ve teorik sonuçlardan elde edilen yük–deplasman eğrileri..... | 95 |
| <b>Şekil 4.54.</b> | ECCB-4 kirişinde deneysel ve teorik sonuçlardan elde edilen yük–deplasman eğrileri..... | 96 |



## TABLolar LİSTESİ

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 3.1.</b> Silis kumu kimyasal özellikleri.....                                           | 19 |
| <b>Tablo 3.2.</b> Uçucu küle ait kimyasal ve fiziksel özellikler .....                           | 20 |
| <b>Tablo 3.3.</b> Polipropilen life ait teknik özellikler.....                                   | 20 |
| <b>Tablo 3.4.</b> Süperakışkanlaştırıcıya ait teknik özellikler .....                            | 21 |
| <b>Tablo 3.5.</b> GFRP donatıya ait teknik özellikler.....                                       | 22 |
| <b>Tablo 3.6.</b> Normal beton karışımının bileşen oranları (kg/m <sup>3</sup> ).....            | 22 |
| <b>Tablo 3.7.</b> ECC karışımının bileşen oranları (kg/m <sup>3</sup> ).....                     | 23 |
| <b>Tablo 3.8.</b> Kirişlere ait matris tipi,donatı tipi ve oranı .....                           | 23 |
| <b>Tablo 4.1.</b> Beton basınç dayanımları.....                                                  | 47 |
| <b>Tablo 4.2.</b> Eğilme dayanımları .....                                                       | 49 |
| <b>Tablo 4.3.</b> Kirişlere ait deneysel sonuçlar .....                                          | 88 |
| <b>Tablo 4.4.</b> Kirişlere ait teorik sonuçlar.....                                             | 90 |
| <b>Tablo 4.5.</b> Kirişlerden elde edilen deneysel ve teorik sonuçlar ile oransal değerler ..... | 90 |

## KISALTMALAR

|           |                                                             |
|-----------|-------------------------------------------------------------|
| ACI       | : American Concrete Institute                               |
| $A_f$     | : FRP donatı alanı                                          |
| AFRP      | : Aramid elyaf takviyeli polimer                            |
| $b$       | : Kesit genişliği                                           |
| BISE      | : British Institution of Structural Engineers               |
| BFRP      | : Bazalt elyaf takviyeli polimer                            |
| $c$       | : Tarafsız eksen derinliği                                  |
| CSA       | : Canadian Standards Association                            |
| CFRP      | : Karbon elyaf takviyeli polimer                            |
| $d$       | : Faydalı yükseklik                                         |
| $d'$      | : Paspayı                                                   |
| $E_f$     | : FRP donatı elastisite modülü                              |
| $E_c$     | : Beton elastisite modülü                                   |
| $E_s$     | : Çeliğin elastisite modülü                                 |
| $f'_c$    | : Beton basınç dayanımı                                     |
| $f_{ecp}$ | : ECC maksimum basınç dayanımı                              |
| $f_{ccu}$ | : ECC ezilme basınç dayanımı                                |
| $f_{etc}$ | : ECC'nin çatlamada çekme dayanımı                          |
| $f_{ctu}$ | : ECC kopma çekme dayanımı                                  |
| $f_{fu}$  | : FRP donatı kopma dayanımı                                 |
| $f_y$     | : Çelik akma dayanımı                                       |
| FRC       | : Lif takviyeli beton                                       |
| FRP       | : Lif takviyeli polimer                                     |
| ECC       | : Tasarlanmış çimento esaslı kompozit                       |
| GFRP      | : Cam elyaf takviyeli polimer                               |
| $h$       | : Kesit yüksekliği                                          |
| HPFRCC    | : Yüksek performanslı lif takviyeli çimento esaslı kompozit |

|               |                                                                                                                     |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $I_{cr}$      | : Çatlamış kesit atalet momenti                                                                                     |
| $I_e$         | : Etkin atalet momenti                                                                                              |
| $I_g$         | : Brüt atalet momenti                                                                                               |
| JSCE          | : Japan Society of Civil Engineers                                                                                  |
| $k$           | : Tarafsız eksen derinliğinin donatı derinliğine oranı                                                              |
| $L$           | : Mesnetler arası açıklık                                                                                           |
| $M$           | : Moment                                                                                                            |
| $M_a$         | : Kesitte oluşan servis yükü momenti                                                                                |
| $M_{cr}$      | : Çatlama momenti                                                                                                   |
| $M_d$         | : Deneysel moment kapasitesi                                                                                        |
| $M_n$         | : Nominal moment kapasitesi                                                                                         |
| $M_t$         | : Teorik moment kapasitesi                                                                                          |
| $N$           | : Kuvvet                                                                                                            |
| $n_f$         | : FRP donatı elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranı                                                 |
| $P$           | : Yük                                                                                                               |
| $P_{cr}$      | : Çatlama yükü                                                                                                      |
| $P_d$         | : Deneysel yük taşıma kapasitesi                                                                                    |
| $P_n$         | : Nominal yük taşıma kapasitesi                                                                                     |
| $P_t$         | : Teorik yük taşıma kapasitesi                                                                                      |
| PE            | : Polietilen                                                                                                        |
| PP            | : Polipropilen                                                                                                      |
| PVA           | : Polivinil alkol                                                                                                   |
| R/C           | : Donatılı beton                                                                                                    |
| R/ECC         | : Donatılı ECC                                                                                                      |
| $x_{ci}$      | : Basınç bölgesindeki ECC veya normal beton şeritin ağırlık merkezinin basınç bölgesi en dış life olan dik uzaklığı |
| $x_{cj}$      | : Çekme bölgesindeki ECC şeritin ağırlık merkezinin basınç bölgesi en dış life olan dik uzaklığı                    |
| $y_t$         | : Kesit merkezinden çekme bölgesi dış yüzeyine olan mesafe                                                          |
| $\sigma_c$    | : Betondaki basınç gerilmesi                                                                                        |
| $\sigma_{ec}$ | : ECC basınç gerilmesi                                                                                              |
| $\sigma_{et}$ | : ECC çekme gerilmesi                                                                                               |
| $\sigma_f$    | : FRP donatı gerilmesi                                                                                              |

|                  |                                                                            |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| $\sigma_s$       | : Çelik gerilmesi                                                          |
| $\epsilon_c$     | : Beton basınç birim kısalması                                             |
| $\epsilon_{ci}$  | : Basınç bölgesinde herhangi bir noktadaki şekil değiştirme                |
| $\epsilon_{cj}$  | : Çekme bölgesinde herhangi bir noktadaki şekil değiştirme                 |
| $\epsilon_{co}$  | : Beton maksimum dayanıma denk gelen basınç birim kısalması                |
| $\epsilon_{cu}$  | : Beton ezilme birim kısalması                                             |
| $\epsilon_{ec}$  | : ECC basınç birim şekil değiştirmesi                                      |
| $\epsilon_{ecu}$ | : ECC ezilme birim kısalması                                               |
| $\epsilon_{ecp}$ | : ECC maksimum basınç dayanımına denk gelen birim şekil değiştirme         |
| $\epsilon_{et}$  | : ECC çekme birim şekil değiştirmesi                                       |
| $\epsilon_{etc}$ | : ECC'nin çatlama çekme dayanımına karşılık gelen birim şekil değiştirmesi |
| $\epsilon_{etu}$ | : ECC kopma birim uzaması                                                  |
| $\epsilon_f$     | : FRP donatı birim deformasyonu                                            |
| $\epsilon_s$     | : Çelik birim deformasyonu                                                 |
| $\rho_f$         | : FRP çekme donatısı oranı                                                 |
| $\Delta$         | : Maksimum yüke karşılık gelen deplasman                                   |
| $\Delta_{cr}$    | : Çatlama yüküne karşılık gelen deplasman                                  |
| $\Psi$           | : Eğrilik                                                                  |

# 1. GİRİŞ

Betonun yüksek basınç dayanımı, yapısal elemanlarda gösterdiği olumlu mekanik özellikler ve kalıplarda istenilen şekli alabilmesi gibi avantajlarından dolayı beton inşaat sektöründe kullanılan temel yapı malzemesi olma özelliğini sürdürmektedir. Son yıllarda beton teknolojisinde yaşanan gelişmeler dayanım açısından daha yüksek performanslı beton üretilmesine olanak sağlamaktadır. Ancak artan basınç dayanımıyla birlikte beton gevrek davranış sergilemektedir (Taşdemir ve Bayramov, 2002). Geleneksel betonarme yapı tasarımında betonun en önemli özelliği basınç dayanımıdır, betonun çekme dayanımı çok düşük olduğundan genellikle hesaplarda dikkate alınmaz. Yapısal dayanım ve performansın genellikle malzeme dayanımı tarafından kontrol edildiği kabul edilmektedir. Bu durum daha yüksek basınç dayanımının daha yüksek yapısal dayanıma yol açmasının beklendiği anlamına gelmektedir. Ancak, bu durum betonun yüksek dayanım sonucu ortaya çıkabilecek gevrek davranışının, malzeme dayanımı ile yönetilmesiyle geçerli olacaktır. Çekme gerilmeleri dolayısı ile kırılma meydana gelmesi durumunda yüksek basınç dayanımı yapısal dayanımı temsil edemez, böyle bir durumda yüksek çekme sünekliği yapısal nihai sınır durumun geliştirilmesinde büyük önem taşır (Li, 2003). Bundan dolayı betonun düşük çekme dayanımı, zayıf çatlama direnci ve gevreklik gibi zayıf yönlerini iyileştirip mekanik performansını arttırarak sünek davranış elde etmek için günümüzde birtakım önlemler alınmaktadır (Qin ve diğerleri, 2020).

Artan basınç dayanımıyla gevrek davranış sergileyen betonun bu zayıf özelliğini iyileştirip sünek bir yapı elde etmek için günümüzde birtakım lifler kullanılmaktadır. Betonun çekme dayanımını, sünekliğini, enerji yutma kapasitesini ve çatlak gelişim özelliklerini geliştirmek için üretilen lifli betonlar, normal veya yüksek dayanımlı betonlara lif eklenmesiyle elde edilen kompozit malzemelerdir. Lifli betonlar üzerine ilk çalışmalar çelik lif kullanılarak 1960'lerde Romualdi tarafından yapılmıştır (Mansour, Parniani ve Ibrahim, 2011). Daha sonra yapılan çalışmaların artarak devam etmesi sonucu lif takviyeli betonun (FRC) yapısal tasarım tavsiyeleri RILEM TC 162-TDF'de toplanmıştır (Vandewalle ve diğerleri, 2003). Bu belgenin dikkat çektiği konu FRC'nin deformasyon yumuşaması göstererek yarı gevrek bir davranış sergilemesidir. 1970-1980'lerde betonda daha sünek davranış öneren başarılı girişimler olmuştur. FRC'ye göre deformasyon sertleşmesi göstererek daha sünek davranış sergileyen bu

malzemeler yüksek performanslı lif takviyeli çimento esaslı kompozit (HPFRCC) olarak sınıflandırılmaktadır. HPFRCC'nin özel bir türü olan tasarlanmış çimento esaslı kompozit (ECC) Amerika'da Michigan Üniversitesinde Victor Li ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir (Li, 1993,2007).

Tasarlanmış çimento esaslı kompozitler mekanik açıdan uyumlu, mikro mekanik prensiplerle minimize edilmiş bir polimerik lif ve matris kullanılarak üretilen, geleneksel betona kıyasla daha sünek ve çoklu çatlak davranışı sergileyen yeni nesil yapı malzemeleridir. Yüksek çekme sünekliği ve sıkı mikro çatlak genişliği elde etmek için mikro mekanik prensipler sayesinde % 2 veya daha az oranda lif kullanımı yeterli olmaktadır. Yapılan çalışmalarda ECC içerisinde polivinil alkol (PVA), polietilen (PE) ve polipropilen (PP) gibi liflerin kullanıldığı görülmektedir (Li ve Kanda, 1998; Li, 2007). ECC, lif takviyeli betonlara benzer bileşenlerden oluşmakta olup çimento, kum, su ve kimyasal katkı maddeleri içermektedir. İri agregalar ECC'nin çekme sünekliğini olumsuz etkilediğinden dolayı kullanımı tavsiye edilmemektedir. ECC birçok bakımdan normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betona benzer özellikler taşımaktadır. Bununla birlikte çekme birim şekil değiştirme kapasitesi istenilen sünekliğe bağlı olarak % 1-8 arasında değişir (Li ve Kanda, 1998). İlk çatlamadan sonra tıpkı bir metal gibi deformasyon sertleşmesi göstererek normal betondan 300-500 kat fazla birim şekil değiştirme kapasitesine ulaşır (Şahmaran ve Li, 2008). ECC'de çekme gerilmeleri altında ilk çatlak sonrası birçok mikro çatlak oluşmakta ve kırılma anına kadar çatlak genişliği düşük düzeyde kalmaktadır. Mikro çatlak oluşumu ECC'nin yüksek çekme sünekliğine ulaşmasını sağlamaktadır. Çekme sünekliği, yapısal güvenlik için önemli olmakta ayrıca çatlak genişliğinin düşük düzeyde olması yapıların dayanıklılığı için önem arz etmektedir ( Liu, Zhang, Li, Su ve Gu, 2017; Şahmaran ve Li, 2008).

Bundan dolayı yüksek çekme sünekliği ve düşük çatlak genişliği kontrolüne sahip olması ECC malzemesini yapılar için ideal bir malzeme haline getirmektedir (Keoleian, Kendal, Lepech ve Li, 2006). Son yıllarda yapısal alanlarda ECC kullanımı giderek artış göstermekte olup yüksek riskli yapılarda, köprülerde, tünellerde, yollarda, açık deniz yapılarında ve çeşitli altyapı çalışmalarında ECC uygulama alanı bulmaktadır (Şahmaran, Özbay, Yücel, Lachemi ve Li, 2012).

Betonarme yapılarda kullanılan donatı çeliğinin korozyona uğraması inşaat sektörünün en önemli problemlerinden biridir. Donatı çeliğinde korozyon oluşumu donatıda kesit kaybına ve dayanıklılık kaybına neden olmaktadır. Korozyon oluşumu yapıların kullanılabilirlik sürelerini kısaltmakta, betonarme yapılarda yüksek maliyet gerektiren bakım, onarım ve güçlendirme çalışmalarına ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır. Korozyon riskine karşı lif takviyeli polimer (FRP) donatılar yüksek korozyon direnci ile donatı çeliğine iyi bir alternatif oluşturmaktadır (Ehsani, Saadatmanesh ve Tao, 1996). Ayrıca FRP donatıların yüksek çekme dayanımına sahip olmaları, hafif olmaları, kimyasal madde etkilerine karşı dirençli olmaları, elektriksel ve manyetik iletkenliğin istenmediği uygulamalar için uygun olmaları gibi avantajlardan dolayı donatı çeliğine alternatif olarak kullanılmalarının diğer sebepleri arasında yer almaktadır (Benmokrane, Chaallal ve Masmoudi, 1995; Triantafillou, Deskovic ve Deuring, 1992).

1960'lı yıllarda beton içerisinde donatı olarak kullanımı düşünülen kompozit malzemeler, genellikle organik reçineli bir matristen ve bu matris içinde yer alan elyaftan oluşmaktadır. Kompozit malzemelerde cam lifi, karbon lifi ve aramid lifleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Fico, 2006). 1980'li yılların sonunda özel performans gereksinimlerinden dolayı dalgakıran yapımı, elektrik ve reaktör ekipmanların altına kaide yapımı, endüstriyel teras döşemeleri ve kimyasal ortamlar için betonarme döşeme yapımı gibi bazı uygulamalarda FRP donatı kullanımı artış göstermiştir. 1986'da Almanya'da dünyanın ilk öngerilmeli - cam elyaf takviyeli (GFRP) otoyol köprüsü yapılmıştır. Sonrasında köprü yapımı Avrupa'da, Kuzey Amerika'da ve Japonya'da artarak devam etmiştir. Ayrıca mevcut köprülerin zaman içerisinde korozyon nedeniyle deforme olması endişe yaratmış olup birçok ülke güçlendirme ve onarım çalışmalarında FRP malzeme kullanmıştır. Amerika ve Kanada hükümetleri halen FRP malzemenin araştırılması ve geliştirilmesi için önemli miktarda yatırım yapmaktadırlar (Rizkalla ve diğerleri, 2003).

FRP malzemeler anizotropiktir ve lif takviyesi doğrultusunda yüksek gerilme mukavemeti sergilemektedirler. Bu anizotropik davranış FRP donatıların kesme dayanımını ve aderans performansını etkilemektedir. FRP donatının mekanik davranışı geleneksel çelik donatının davranışından farklıdır. FRP malzemelerde akma meydana gelmez kopma anına kadar elastik davranış sergilemektedirler. Bu yüzden tasarım prosedürlerinde, FRP donatı kullanılan yapısal elemanlarda süneklik eksikliği hesaba katılmalıdır (ACI 440 1R-15, 2015).

FRP donatıların çekme davranışı kopma anına kadar doğrusal bir gerilme - deformasyon ilişkisi ile karakterize edildiğinden dolayı FRP takviyeli beton kirişler uyarı olmaksızın gevrek bir kırılma sergilemektedir. FRP donatı koptuğunda yapısal elemanda kırılma ani ve şiddetli olmaktadır. Ayrıca düşük elastisite modülü nedeniyle FRP donatılı kirişler, aynı kesite ve donatı detaylarına sahip çelik donatılı kirişlere göre daha büyük deplasmanlar yapmakta ve daha geniş çatlak oluşumu gözlenmektedir. Bundan dolayı FRP donatılı betonarme yapı elemanları genel olarak hizmet verilebilirlik sınır durumu ile tasarlanmaktadır (Ge, Ashour, Cao ve diğerleri 2019). FRP donatılı kirişlerin eğilme kapasitesinin değerlendirilmesinde genellikle betonun ezilerek kırılma olması durumu donatının kopmasından kaynaklı kırılma olması durumuna tercih edilmesi nedeniyle kesitler denge üstü kesit olarak tasarlanmaktadır. Çünkü bu durum daha yüksek derecede deforme olabilirlikle daha az şiddette bir kırılma oluşumuna imkan vermektedir (Kassem, Farghaly ve Benmokrane, 2011).

FRP donatının gevrek yapısı FRP donatılı elemanların sünekliğini büyük ölçüde azaltmaktadır. Bu yüzden sünekliği ve eğilme kapasitesini geliştirmek için birtakım araştırmalar yapılmaktadır. FRP donatılı elemanların eğilme sünekliğini artırmak ve aynı zamanda FRP donatının yüksek dayanım özelliğini korumak için son zamanlarda, FRP ve çelik donatının birlikte kullanıldığı hibrit takviyeli sistemler önerilmiştir (Lau ve Pam, 2010; Ünsal, Tokgöz, Çağatay ve Dündar, 2017; Sun, Wu, Zhang, Zeng, ve Xiao, 2017). Böylece çelik donatının sünekliğinden ve FRP donatının dayanıklılığından bir arada faydalanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda sünekliği artırmak için bir diğer yöntem olarak geleneksel beton yerine ECC kullanımı görülmektedir. FRP donatılı elemanlar genellikle hizmet verilebilirlik sınır durumuna göre tasarlandığından denge üstü donatı tasarımı yapılmaktadır. Betonun ezilmesinin kırılma durumunu yönetmesi halinde kirişlerin sünekliği büyük ölçüde betonun özelliklerine bağlı olmaktadır. (Cai, Pan, ve Zhou, 2017). Betonarme yapısal elemanlarda ECC kullanımının sünekliği geliştirdiği bilinmektedir. ECC, yapısal elemanların deformasyon kabiliyetinde önemli bir gelişme ile birlikte çatlak genişliğinde azalma sağlamaktadır (Y. Zhang, Bai, Q. Zhang, Xie ve X.Zhang, 2015). FRP donatılı betonun, ECC ile ikame edilmesi halinde betonun gevrekliğinden kaynaklı çatlama ve dayanıklılık sorunları önlenabilmektedir. FRP donatılı ECC içeren kirişlerin eğilme davranışlarının araştırıldığı literatür çalışmalarında da görüldüğü üzere, FRP donatılı kirişlerde geleneksel betonun ve FRP'nin gevrek özelliklerinin etkisini azaltmak için betonun ECC ile ikamesiyle kirişlerin çatlama momenti, yük taşıma kapasitesi,

eğilme rijitliği, kesme direnci, sünekliği, hasar toleransı ve enerji sönümlleme gibi özelliklerinde gelişme olduğu tespit edilmiştir (Ge, Ashour, Yu ve diğerleri, 2019; Li ve Wang,2002; Yuan, Pan ve Leung,2013)

ECC içeren FRP donatılı kirişlerin davranışının belirlenmesine yönelik çalışmaların kısıtlı sayıda olduğu bilinmektedir. Sunulan çalışma kapsamında, FRP donatılı ve farklı derinlikte ECC içeren kirişlerin eğilme etkisi altında davranışının belirlenmesi amacıyla kirişler üretilerek dört nokta yüklemesi altında test edilmiştir. Yapılan çalışmada, ECC'nin çoklu çatlak davranışı ve çekme birim şekil değiştirme kapasitesinin kirişlerin eğilme davranışına etkileri araştırılmıştır. FRP donatılı kirişlerde, FRP'nin ve geleneksel betonun gevrek yapısından kaynaklı çatlama ve deplasman problemlerinin çözümü için ECC kullanımının etkilerinin araştırılması ile literatür çalışmalarına katkıda bulunulması amaçlanmaktadır.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

### 2.1. ECC İçeren Kirişlerin Yapısal Davranışı Üzerine Yapılan Önceki Çalışmalar

Sunulan çalışma kapsamında, yapısal elemanlarda tasarlanmış çimento esaslı kompozit malzemenin kullanılması durumunda, çoklu çatlak davranışı ve çekme birim şekil değiştirme kapasitesinin yapısal elemanın davranışına etkileri literatürde yer alan çalışmalar incelenerek araştırılmıştır.

Qin ve diğerleri, (2020) kiriş çekme bölgesinde farklı derinliklerde ECC kullanarak kirişleri dört nokta eğilme deneyine tabi tutmuş, eğilme davranışını incelemişlerdir. Çalışma kapsamında 7 adet aynı en kesit alanına sahip (200 mm×300 mm) kiriş hazırlanmış olup kirişlerden birisi kontrol numunesi olarak sadece normal beton içermektedir. Test değişkeni olarak ECC derinliği ve boyuna donatı oranı seçilmiş olup kiriş çekme bölgesinde 30 mm, 60 mm, 90 mm ve 120 mm derinliğinde ECC uygulanmıştır. 60 mm ECC içeren numunelerden farklı boyuna donatı oranına sahip 3 adet kiriş hazırlanmıştır. Kullanılan ECC yüksek dayanımlı ultra yüksek süneklikli olup ortalama basınç dayanımı 79 MPa, çekme dayanımı 10.03 MPa, maksimum çekme birim deformasyon değeri % 7.18'dir. Kullanılan normal betonun ortalama basınç dayanımı 52.4 MPa'dır. Test sonuçları değerlendirildiğinde, ECC'nin betonarme kirişlerin eğilme performansını iyileştirmek için ideal bir yapı malzemesi olabileceğini göstermiştir. Kırılma durumunda, ECC tabakalı kirişlerde nihai yüklemeye ulaşıldığında bile lokal çatlaklar gözlenmeyip bunun yerine ECC'nin yüksek sünekliği nedeniyle kirişlerin çekme bölgesinde çoklu mikro çatlaklar oluşmuştur. Sadece normal beton içeren kirişin ECC tabakalarla güçlendirilmesiyle eğilme davranışı açısından sadece çatlama yükü, akma yükü ve nihai yükte değil aynı zamanda süneklik ve enerji yutma kapasitesinde de gelişmeler elde edilmiştir. Çalışma kapsamında eksenel kuvvet ve eğilme momenti arasındaki denge durumuna bağlı olarak eğilme kapasitesini tahmin etmek için basitleştirilmiş bir yöntem ele alınmış, deneysel verilerle uyumu % 94 olarak bulunmuştur.

Shanour, Said, Arafa ve Maher (2018) farklı derinliklerde ECC içeren kirişlerin eğilme davranışını araştırdıkları çalışma kapsamında, 12 adet aynı en kesit alanına (115mm×280 mm) sahip kirişi 4 nokta eğilme deneyine tabi tutmuşlardır. Test değişkeni olarak kiriş içerisindeki ECC derinliği, boyuna donatı oranı ve lif çeşidi seçilmiştir. ECC karışımında toplamda %1 veya

%2 oranında PP lif ve PVA lif ayrı veya hibrit olarak kullanılmıştır. Farklı boyuna donatı oranına sahip sadece normal beton içeren 2 adet kontrol numunesi kiriş hazırlanmıştır. Test sonuçları değerlendirildiğinde, ECC içeren kirişlerde ECC'nin deformasyon sertleşmesi ve çoklu mikro çatlama özelliğinden dolayı yük taşıma kapasitesinde artış olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlar PVA lif kullanımının PP lif kullanımına göre yük taşıma kapasitesini daha çok geliştirdiğini göstermektedir. Ayrıca lif hacminin artışı da kirişlerin yük taşıma kapasitesini artırmıştır. %1 PVA lif içeren kiriş kontrol numunesine göre %20, %2 PVA lif içeren kiriş ise %34 daha fazla yük taşımaktadır. %2 (PP+PVA) hibrit lif kullanımında artış %24 olmuştur. Sonuçlar değerlendirildiğinde, ECC malzemenin düşük donatı oranına sahip kirişlerde davranışı daha belirgin iyileştirdiği söylenebilir. Diğer bir değişken olan ECC derinliğinin etkisi incelendiğinde, ECC kalınlığının artması yük taşıma kapasitesini olumlu etkilemiş, çekme bölgesinde en az ECC içeren kirişte dahi kayda değer bir artış elde edilmiştir. ECC malzeme sünek davranışta gelişme sağlamış olup süneklik faktörleri değerlendirildiğinde %1 PVA lif içeren kirişte kontrol numunesine göre %30, %2 PVA lif içeren kirişte ise %45'lik bir artış oluşmuştur.

Yuan, Pan, Dong ve Leung (2014) ECC malzemenin sismik direncini araştırmak için ECC ve ECC / normal beton içeren kirişlerin tekrarlı yükleme altında mekanik davranışını incelemişlerdir. Kesme açıklığı / derinlik oranı, kiriş içerisindeki ECC derinliği ve etriye oranı test değişkeni olarak seçilmiştir. Bütün kirişler 200 mm×300 mm aynı en kesit boyutlarına ve boyuna donatı oranına sahip olup 2 seri halinde toplam 6 adet kiriş üretilmiştir. 1.serideki 3 adet kirişin boyu 2350 mm olup çekmede kırılacak şekilde tasarlanmıştır. 2.seri kirişlerin boyu 1750 mm olup kesmede kırılacak şekilde tasarlanmıştır. Her seri kendi içinde sadece normal beton içeren kontrol numunesine sahiptir. Test sonuçları değerlendirildiğinde, ECC içeren kirişler yük taşıma kapasitesinde, nihai deformasyonda ve enerji sönümlemede normal beton içeren kirişlere göre performansta gelişim sergilemişlerdir. Kesme kırılması olan kirişlerde çekme kırılması olanlara göre gelişmenin daha önemli düzeyde olduğu görülmektedir. Kesmede kırılan ECC içeren kiriş, normal beton içeren kirişe göre yük taşıma kapasitesinde % 46.2 enerji sönümlemede % 400 artış sağlamıştır. Ayrıca etriye içermeyen ECC kirişin performansı etriyeli normal beton içeren kirişe göre daha üstün olup ECC'nin deformasyon sertleşmesi özelliğinden dolayı kesme kırılması sünek bir biçimde gerçekleşmiştir. Bu da ECC kullanımının kesme kapasitesini etkili bir şekilde artırabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, ECC'nin kullanılması yük taşıma kapasitesi, deformasyon yeteneği, kesme direnci, hasar toleransı ve

enerji yutma kapasitesi açısından kirişlerin sismik performansını arttırmada etkili olduğu ortaya konulmuştur.

Meng, Lee ve Zhang (2017) donatılı ve donatısız ECC kirişlerin eğilme ve kesme davranışını inceledikleri çalışma kapsamında 100×200×2200 mm boyutlarında ECC ve normal beton içeren kirişleri dört nokta eğilme deneyine tabi tutmuşlardır. 5 çeşit kiriş numune tasarlanmış olup her birinden iki adet olmak üzere toplam 10 adet kiriş üretilmiştir. Test değişkeni olarak matris tipi, kesme donatısı ve boyuna donatı içeriği seçilmiştir. Normal beton ve ECC içeren kirişler hem etriyeli olarak hem de etriyesiz olarak üretilmiştir. Ayrıca ECC kirişin bir çeşidi etriye ve boyuna donatı kullanılmadan hazırlanmıştır. Test sonuçları değerlendirildiğinde, etriyeli ECC kirişler etriyeli normal beton içeren kirişlere göre yük taşıma kapasitesinde %14.8 orta nokta deplasmanında %103.6 gelişme sağlanmıştır. Etriyesiz normal beton içeren kirişlerde tipik kesme kırılması gözlenirken etriyesiz ECC kirişlerde boyuna donatının kopmasından dolayı eğilme kırılması gözlenmiştir. Etriyesiz ECC kirişlerin kesme direnci, etriyesiz normal beton içeren kirişlerden 1.5 kat fazla bulunmuştur. Etriyesiz ECC kirişler etriyeli ECC kirişlere benzer yük-deplasman davranışı, moment-eğrilik ilişkisi ve çatlak dağılımı sergilemiş olup normal betonun ECC ile ikamesiyle kirişlerde etriye sayısının azaltılabileceği ifade edilmiştir. Etriye ve boyuna donatı içermeyen ECC kiriş boyuna donatının eğilme davranışı üzerindeki etkisini görmek açısından etriyesiz ECC kirişle kıyaslamak için tasarlanmıştır. Bu kirişler karşılaştırıldığında, etriyesiz ECC kirişin eğilme davranışını boyuna donatının iyileştirmiş olduğu, yük taşıma kapasitesinde 5.5 kat, orta nokta deplasmanında 4 kat fazla gelişim sağladığı görülmüştür.

Rana, Lee, Al-Deen ve Zhang (2018) beton kaplı çelik profil kirişlerde geleneksel beton yerine ECC kullanarak hazırladıkları kirişleri dört nokta eğilme deneyine tabi tutarak ECC kalınlığının maksimum yük taşıma kapasitesine ve kırılma biçimine etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalar için 4 adet kiriş üretilmiş olup kirişlerden biri kontrol numunesi olarak sadece geleneksel beton, diğer üç kiriş ise farklı yüksekliklerde ECC içermektedir. Kirişlerden bir tanesi tamamen ECC ile hazırlanmıştır. Diğer ikisi ise sandviç şeklinde kiriş kesitinin orta kısmında hafif beton, çekme ve basınç bölgesinde ECC olacak şekilde tasarlanmış olup %50 ve %75 ECC içermektedirler. Test sonuçları değerlendirildiğinde, bütün numunelerde kırılma çeliğin akmasından sonra geleneksel beton veya ECC üst tabakasında ezilme görülmesi şeklinde olmuştur. Geleneksel beton kaplı kiriş, beton üst tabakasının ezilmesiyle gevrek bir

tepki göstermiş ve yük ani olarak düşmüştür. ECC içeren kirişlerde, ECC üst tabakası ezildiğinde bu kirişler kontrol numunesine göre daha sünek bir davranış sergilediği, yükte ani bir düşüş olmadığı ortaya konulmuştur. ECC içeren kirişlerde kullanılan ECC basınç dayanımı normal betonun %63'ü olduğu halde, minimum ECC kalınlığında bile maksimum yük taşıma kapasitesi ve süneklik açısından performans iyileşmesi elde edildiği belirtilmiştir.

Ge, Ashour, Ji, Cai, ve Cao (2018) ECC/RC kirişlerin çatlama momenti, akma momenti ve nihai moment değerlerini ve deplasmanı hesaplamak için oluşturdukları basitleştirilmiş analitik formüllerin kapsamlı bir parametrik çalışma için kullanılmasından önce gerçek verilerle uyumunu karşılaştırmak için R/ECC kirişlerin eğilme davranışı üzerine deneysel çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında aynı kesit alanına sahip (150 mm×200 mm) 1500 mm boyundaki 11 adet kirişin eğilme etkisi altındaki davranışını incelenmişlerdir. Kiriş numunelerinde boyuna donatı dayanımı ve ECC yüksekliği değişkenlik göstermektedir. Kirişler üç gruba ayrılmış olup her grupta farklı dayanıma sahip donatı kullanılmıştır. İlk 2 grup farklı ECC yüksekliğine sahip dörder kirişten, 3.grup ise üç kirişten oluşmaktadır. Test sonuçları değerlendirildiğinde, önerilen formüllerle hesaplanan moment değerlerinin deneysel sonuçlarla uyumlu olduğunu göstermişlerdir. Parametrik çalışma kapsamında kiriş içerisindeki ECC yüksekliği, boyuna donatı oranı, boyuna donatı, normal beton ve ECC dayanımları değişken olarak seçilmiş, bir parametre değiştirildiğinde diğer temel parametreler belirlenen değerlerde sabit tutulmuştur. Parametrik analiz sonuçlarına göre basınç kırılması durumunda beton dayanımının artmasıyla birlikte akma ve nihai moment değerlerinin arttığı, ancak çekme kırılması durumunda değişmeden kaldığı belirtilmiştir. Çekme direncinin artırılmasıyla, örneğin kiriş içerisindeki ECC yüksekliğinin, donatı oranının, ECC ve donatı dayanımının artırılmasıyla çekme kırılması durumunda nihai eğrilik ve enerji emiliminde artış olurken basınç kırılması durumunda azalış olduğu belirtilmiştir. Diğer yandan, donatı oranının ve dayanımının artmasıyla birlikte süneklik ve enerji yutma kapasitesi azalırken, ECC yüksekliğinin ve dayanımının artmasıyla değişmeden kaldığı gösterilmiştir.

Ali ve Khan (2017) yaptıkları çalışma kapsamında ECC içeren kirişlerin eğilme davranışını incelemişlerdir. Çalışma kapsamında 225×300×2400 mm ölçülerinde 6 adet kiriş üç nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Kontrol numunesi olarak normal beton içeren kirişle beraber tamamı ECC içeren ve %75'i ECC içeren kirişlerden ikişer adet bulunmaktadır. Test sonuçları değerlendirildiğinde, ECC kalınlığının artmasıyla ortalama çatlama yükünün arttığı

görülmektedir. Kontrol kirişi ile karşılaştırınca ilk çatlama yükü %75 ECC içeren kirişte %32, %100 ECC içeren kirişte ise %70 artış olduğu gösterilmiştir. Aynı zamanda akma yükünde de kontrol kirişine göre sırasıyla %11 ve %19 artış olduğu belirtilmiştir. Ayrıca çatlama yükü ve akma yükünde kirişlerin orta açıklık deplasmanının arttığı görülmektedir. İlave olarak, ECC içeren kirişlerde ECC kalınlığının artması ile yük taşıma kapasitesinde artış olduğu tespit edilmiştir.

Siva, Sasikumar, Aravind Raj ve Divahar (2020) sundukları deneysel çalışma kapsamında kiriş çekme bölgesinde kiriş derinliğinin 1/3'ü kadar ECC içeren kirişlerin eğilme davranışını incelemişlerdir. Çalışma kapsamında 3 adet kiriş hazırlanmış olup bir tanesi kontrol numunesi olarak geleneksel beton içermektedir. Kirişlerin 1 tanesinde %2 PVA lif içeren ECC diğerinde ise %2 PP lif içeren ECC kullanılmıştır. Deney sonucu PVA-ECC kirişin yük taşıma kapasitesinin; kontrol numunesinden %16.7, PP-ECC kirişten ise %3.63 daha fazla olduğu bulunmuştur. PVA-ECC kirişin deplasmanı kontrol numunesinden ve PP-ECC kirişten daha az olduğu görülmektedir. Ayrıca PP-ECC kompozit kirişin rijitliğinin çatlama öncesi aşamada PVA-ECC kompozit kirişten daha üstün olduğu bulunmuştur. Yapılan çalışmada PVA-ECC kirişin PP-ECC kirişe göre nispeten daha iyi performans göstermekte olduğu belirtilmiş olup, ayrıca çekme bölgesinde ECC kullanımının kirişlerin eğilme davranışını ve sünekliğini iyileştirdiği ortaya konulmuştur.

Kanda, Watanabe ve Li (1998) %2 PVA lif içeren kirişlerin tekrarlı yükler altında yapısal dayanım ve sünekliğini araştırmışlardır. Kiriş boyutları 150 mm × 200 mm × 1500 mm olup 6 adet kiriş numunesi üretilmiş bunlardan 2 tanesi geleneksel beton ile kontrol numunesi olarak hazırlanmıştır. ECC ve normal beton yaklaşık aynı basınç dayanımı değerine sahip olup test değişkeni olarak matris türü, kesme açıklığı/derinlik oranı ve kesme donatısı miktarı seçilmiştir. Test sonuçları değerlendirildiğinde, donatılı ECC kirişlerde (R/ECC) donatılı beton kirişlere (R/C) göre yaklaşık 4 kat fazla çatlak yoğunluğu tespit edildiği ve hemen hemen tüm çatlakların genişliği 0.1mm 'den daha az olduğu belirlenmiştir.

Kirişlerin matris türüne göre karşılaştırılmasına bakıldığında;

\*Kesme açıklığı/derinlik oranı 1 olan etriyesiz ECC ve normal beton içeren kirişler karşılaştırıldığında ECC içeren kirişlerde normal beton içeren kirişlere göre yük taşıma kapasitesinde yaklaşık %50 artış gözlenirken nihai yer değiştirmede %200'ün üzerinde artış tespit edilmiştir.

\*Kesme açıklığı/derinlik oranı 1 olan etriyeli ECC ve normal beton içeren kirişler karşılaştırıldığında ECC içeren kirişlerde normal beton içeren kirişlere göre yük taşıma kapasitesinde %50 artış gözlenirken nihai yer değiştirme hemen hemen aynı olduğu belirlenmiştir.

ECC kirişlerde test değişkeni olarak kesme donatısı miktarı incelendiğinde, kesme dayanımını kapasitesinde %36-108 artış görülürken nihai yer değiştirmede önemli bir değişiklik olmamıştır. Kesme donatısı içermeyen ECC kirişler de sünek davranış sergilediği gösterilmiştir.

ECC kirişlerde test değişkeni olarak kesme açıklığı/derinlik oranı incelendiğinde, oranın 0.5 olduğu kirişlerde söz konusu oranın 1 olduğu kirişlere göre kesme kapasitesinde % 41-116 artış olduğu ortaya konulmuştur. Genellikle kısa açıklıklı (kesme açıklığı/derinlik oranı>1) kirişlerin gevrek davranış sergilediği, bu tür kirişlerde etriye kullanmadan bile ECC kullanımının gevrek kesme kırılmasını önlemede etkili bir yöntem olabileceği ifade edilmiştir.

## **2.2. FRP Donatılı Kirişlerin Yapısal Davranışı Üzerine Yapılan Önceki Çalışmalar**

FRP donatı kullanılan betonarme elemanlarda geleneksel donatı çeliği kullanılan betonarme elemanlara göre daha fazla eğilme dayanımı elde edileceği, daha büyük çatlak genişliği ve deplasman oluşacağı öngörülmektedir. FRP donatılı betonarme elemanlarda gevrek kırılma beklendiğinden dolayı yapı güvenliğini sağlamak için kullanılabilirlik sınır durumu genellikle belirleyici olmaktadır. FRP donatılı betonarme elemanların eğilme yükleri altında göçmesi betonun ezilmesi veya FRP donatının kopması şeklinde olmaktadır. Göçme durumları gevrek olup, davranışları denge altı donatı oranına sahip betonarme elemanlarınkinden farklıdır. FRP tasarım rehberleri ve yönetmelikleri betonarme tasarım yönetmelikleriyle uyumlu olup dayanım azaltma katsayıları ve malzeme direnç katsayıları düzenlenerek FRP kullanımına uygun duruma getirilebilmektedir (Yavuz, 2011).

Kassem, Farghaly ve Benmokrane (2011), cam elyaf takviyeli polimer donatı (GFRP) , karbon elyaf takviyeli polimer donatı (CFRP) aramid elyaf takviyeli polimer donatı (AFRP) ve çelik donatı kullanarak, hazırladıkları 24 adet kirişi dört noktalı eğilme deneyine tabi tutmuş, eğilme etkisi altında kirişlerin davranışını incelemişlerdir. Bütün kirişler aynı en kesit alanına ve beton basınç dayanımına sahiptir. Denge üstü donatı oranına sahip olan FRP donatılı kirişler betonun ezilmesiyle taşıma gücüne ulaşmıştır. Bu durum ACI 440.1R-06, (2006)'da donatı oranının dengeli donatı oranının 1.4 katından büyük olması durumunda basınç kırılması olur ifadesini

doğrulamaktadır. Deneysel verilerle çıkarılan tarafsız eksen derinliklerinin, çatlamış kesit analizine dayandırılarak elde edilen numerik sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Deneylerden elde edilen kirişlere ait çatlama momenti değerleri incelendiğinde, çatlama momentinin donatı oranı ve tipinden etkilenmediği ifade edilmiştir. Çatlama momenti değerlerinin ACI 440.1R-06 (2006) ve CSA S806-02 (2002) tarafından önerilen hesap yöntemleriyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması yapılmış ve deneysel değerlerin sonuçlarda uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Yavuz (2011), çelik donatı, cam elyaf takviyeli polimer donatı (GFRP) , karbon elyaf takviyeli polimer donatı (CFRP) ve aramid elyaf takviyeli polimer donatı (AFRP) olmak üzere 4 farklı tipte donatı kullanarak aynı kesit boyutuna ve beton basınç dayanımına sahip 4 adet kiriş tasarlamış ve kiriş tasarımı yazılımı kullanarak teorik olarak moment taşıma kapasitesi ve moment-eğrilik diyagramlarını elde ederek sonuçları karşılaştırmıştır. Elde edilen analiz sonucuna göre CFRP donatı içeren kesitte en yüksek moment taşıma kapasitesi bulunurken, çelik donatı içeren kesitte en düşük moment taşıma kapasitesi bulunmuştur. Moment-eğrilik grafiklerinden en sünek davranışı sergileyen kirişin çelik donatılı kiriş olduğu görülürken, kompozit donatılı kirişlerin grafiklerinin doğrusala yakın olduğu tespit edilmiştir.

Ashour (2006), cam elyaf takviyeli polimer donatı (GFRP) içeren 12 adet kiriş numunenin eğilme etkisi altında davranışını incelemiştir. Kayma donatısı ve basınç donatısı içermeyen, farklı derinliğe ve boyuna donatı oranına sahip kirişler, kullanılan beton basınç dayanımına göre 2 grup olarak dört nokta yüklemesi eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Denge altı GFRP donatı oranına sahip kirişlerde boyuna donatının kopmasıyla eğilme kırılması görülürken, denge üstü GFRP donatı oranına sahip kirişlerde kesme kırılması gözlemlenmiştir. GFRP donatı oranının test edilen kirişlerin eğilme rijitliği ve deformasyonunda çok önemli etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. GFRP donatı içeren kirişlerin eğilme kapasitesini tahmin etmek için basitleştirilmiş bir analitik yöntem geliştirilmiş ve bu yöntemle elde edilen sonuçların deneylerden elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu ifade edilmiştir. Kirişlerin kesme kapasitesini tahmin etmek için GFRP donatılı kirişler için literatürde önerilen 4 farklı yöntem kullanılmıştır. Kirişlerin kesme kapasitesinin teorik olarak tahmininde bu yöntemler arasında tutarsızlıklar olduğu tespit edilmiş ve GFRP donatılı kirişlerin kesme kapasitesinin hesabı için daha fazla çalışma yapılarak daha rasyonel bir yöntem bulunması gerektiği vurgulanmıştır.

FRP donatı betonarme elemanlarda donatı çeliği yerine doğrudan kullanılabilir. Ancak FRP donatılar uzama kapasitelerinin sınırlı olmasından dolayı betonarme elemanlarda gevrek davranışa neden olmakta ve çelik donatıya göre betonla aderansının daha düşük olmasından dolayı yükleme durumunda çatlak genişliği yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı FRP içeren betonarme elemanların sünekliliğini arttırmak için FRP donatı ile çeliğin birlikte kullanımı da (hibrit) çalışmalarda görülmektedir (Ünsal, Tokgöz, Çağatay ve Dündar, 2018).

Yinghao ve Yong (2013), ele aldıkları çalışma kapsamında çelik donatı ve cam elyaf takviyeli polimer donatıyı birlikte kullanarak 3 adet hibrit donatılı kiriş ve 1 adet kontrol numunesi olarak GFRP donatılı kiriş hazırlamış, donatı düzenini değiştirerek bunun etkilerini gözlemlemek için kiriş numunelerinin eğilme dayanımlarını, yük-deplasman eğrilerini ve çatlak davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Hibrit donatılı kirişlerde kullanılan donatı miktarı aynı olup, donatı düzeni farklı tasarlanmıştır. Deney sonucunda kontrol numunesinde daha fazla deplasman ve çatlak gözlemlendiği, yük- deplasman eğrisinden hibrit donatılı kirişlerin kontrol numunesine göre daha sünek davrandığının görüldüğü belirtilmiştir. Donatı düzeninin eğilme dayanımı üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Çelik donatının yerinin hibrit donatılı kirişlerin rijitliği üzerinde etkili olduğu, maksimum çatlak genişliğinin çelik donatı tarafından kontrol edildiği, çelik donatının kesit içerisinde derinliği arttıkça çatlak genişliğinin azaldığı ifade edilmiştir.

FRP boyuna donatılı kayma donatısı içermeyen betonarme kirişlerin kesme dayanımı ve davranışı ile ilgili birçok deneysel ve teorik çalışma yapılmış olup hala FRP donatılı kirişlerin kesme dayanımlarının tespit edilmesiyle ilgili bazı belirsizlikler mevcuttur. Yapılan çalışmalar hızla devam etmekte ve ülke yönetmeliklerinde belirtilen hesap yöntemlerine ilave olarak FRP donatılı kirişlerin kesme dayanımı için yeni modeller önerilmektedir (Kara, Cullazoğlu ve Severcan, 2016).

Razaqpur, Isgor, Greenaway ve Selley (2004), yaptıkları deneysel çalışma kapsamında 7 adet FRP donatılı kirişi eğilme deneyine tabi tutarak, kirişlerin kesme dayanımına betonun katkısını incelemişlerdir. Aynı kesit alanına sahip olan kirişlerde sadece CFRP boyuna çekme donatısı kullanılmış olup kayma donatısı kullanılmamıştır. Kesme kırılması olacak şekilde kirişlerin tasarımı yapılmıştır. Test değişkenleri olarak kesme açıklığı/derinlik oranı, boyuna donatı oranı

ve beton basınç dayanımı seçilmiştir. Deney sonuçlarını ve literatürdeki çalışmalardan aldıkları sonuçları birleştirilerek, kirişlere ait kesme dayanımı değerlerini Amerika, Kanada ve Japonya Standartlarında önerilen hesap yöntemleri ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Betonun kesme dayanımına olan katkısı, betonun basınç dayanımının, boyuna donatının eksenel rijitliğinin ve kesme açıklığı/derinlik oranının ( $a/d$ ) bir fonksiyonudur. ( $a/d$ )  $>2.5$  durumu için deneylerle elde edilen sonuçların ve literatürden elde edilen sonuçların Kanada Standardının CSA S806-02 (2002) önerileri ile uyum içinde olduğu görülmüştür. Ayrıca ( $a/d$ )  $<2.5$  durumu için Kanada Standardının CSA S806-02 (2002) ve Japon Standardının JSCE (1997) benzer olduğu ve deneysel sonuçların önerilen hesap yöntemleri ile uyum içinde olduğu ifade edilmiş, özellikle derin kirişleri kapsayan ( $a/d$ )  $<2.5$  durumu için kirişlerin kesme dayanımını tahmin etmede yeni metotlar türetmek için daha fazla çalışma yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

Kara ve diğerleri (2016), tarafından literatürdeki çalışmalarda yer alan 206 adet kirişin deney sonuçları dikkate alınarak FRP donatı içeren kayma donatılı ve kayma donatısız kirişlerin kesme dayanımı için farklı modeller önerilmiş ve bu modellerle bulunan sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı ülke standartlarında yer alan FRP donatılı kirişlerin kesme dayanımı için önerilen hesapların, deney sonuçları ile karşılaştırılması yapılmış ve bu hesap önerilerinin uygunluğu araştırılmıştır. ACI 440.1R-15 (2015) tarafından önerilen hesap yöntemi ile bulunan sonuçların malzeme dayanımındaki azaltma katsayıları kullanmadan dahi gereğinden fazla güvenli yönde sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Kayma donatılı ve kayma donatısız kirişlerin kesme dayanımlarının hesabı için BISE (1999) tarafından tavsiye edilen hesap yöntemlerinin tüm yönetmelikler içinde en uygun sonucu verdiği belirtilmiştir. Çalışma kapsamında önerilen modellerle standartlarda yer alan yöntemlere göre daha uygun sonuçlar elde edildiği ifade edilmiştir.

### **2.3. ECC İçeren FRP Donatılı Kirişlerin Yapısal Davranışı Üzerine Yapılan Önceki Çalışmalar**

FRP donatı içeren betonarme elemanlarda büyük deplasman sonucu ani ve gevrek kırılma meydana gelmesi nedeniyle bu durumun önüne geçmek için kesitte çelik donatı ile FRP donatının birlikte kullanıldığı bilinmektedir. FRP donatılı elemanlarda sünekliği sağlamak için diğer bir uygulama olarak geleneksel beton yerine ECC ile yapısal eleman üretildiği

görülmektedir. Çekme bölgesindeki betonun ECC ile ikamesiyle, ECC'nin deformasyon sertleşmesi ve mükemmel çatlak kontrol yeteneği sayesinde FRP donatılı kirişlerde sünekliği artırması, deplasmanı ve çatlak genişliklerini azaltması beklenmektedir (Ge, Ashour, Cao ve diğerleri 2019).

Li ve Wang (2002), yaptıkları çalışmada yüksek dayanımlı gevrek beton matrisini, üstün çekme ve kesme sünekliğine sahip %1.5 PE lif içeren ECC ile yer değiştirerek GFRP donatılı kirişlerin eğilme performansını incelemiştir. Bütün kirişler aynı en kesit alanına sahip olup test değişkeni olarak boyuna donatı oranı ve kesme açıklığı/derinlik oranı seçilmiştir. Çalışmada 3 farklı seri için üretim yapılmıştır ve 11 farklı tipte 16 adet kiriş hazırlanmıştır. 1. seri kirişler 1017 mm boyundaki kısa kirişlerden oluşmakta ve kesmede kırılacak şekilde tasarlanmıştır. 2. seri kirişler 1. seri ile aynı boyuna donatı oranına sahip, 1600 mm boyunda uzun kirişler olup çekme kırılması olacak şekilde tasarlanmıştır. 3. seri kirişler 2. seri ile aynı boyda olup daha fazla boyuna donatı oranına sahiptir, basınç kırılması olacak şekilde tasarlanmıştır. Her seri kendi içinde yüksek dayanımlı beton içeren kontrol numunesine sahip olup etriyeli ve etriyesiz olarak hazırlanmıştır. Test sonuçları incelendiğinde, aynı boyuna donatı oranı altında ECC kirişlerin yüksek dayanımlı beton içeren kirişlere göre süneklik kapasitesinde, eğilme performansında, yük taşıma kapasitesinde, kesme mukavemetinde ve hasar toleransında artış olduğu belirtilmiştir. Sınır durumuna matris davranışının hakim olduğu kesme ve basınç kırılmasında artışın daha çok olduğu belirtilmiş olup ECC matris kullanımının önemine dikkat çekilmiştir. Ayrıca çalışmada etriyesiz ECC kirişlerin etriyeli beton kirişlere göre daha üstün performansla sahip olmasından dolayı ( eğilme rijitliği, sünekliği ve yük taşıma kapasitesi) ECC matris kullanımında etriye kullanımının ortadan kaldırabileceği ifade edilmiştir.

Ge, Ashour, Yu ve diğerleri (2019), tarafından yapılan çalışmada %2 PVA lif içeren ECC kullanılarak aynı kesit alanına sahip (150 mm×200 mm) olarak hazırlanan 32 adet kiriş numunenin eğilme etkisi altında davranışı incelenmiştir. Kiriş numunelerde hibrit donatı kombinasyonları ve ECC yüksekliği değişkenlik göstermektedir. Kirişler farklı çelik ve FRP donatı oranı ve kombinasyonlarına göre 8 gruba ayrılmıştır. Her grup farklı ECC yüksekliğine sahip 4 kirişten oluşmaktadır. Deney sonuçları değerlendirildiğinde, ECC kullanılan kirişlerde aynı donatıya sahip geleneksel beton içeren kirişlere göre taşıma gücü kapasitesinde, eğilme rijitliğinde, çatlak oluşumunda ve akmada iyileşme olduğu tespit edilmiştir. ECC içeren kirişlerde ECC'nin üstün deformasyon yeteneğinden dolayı daha sünek bir davranış

gözlemlenmiştir. Ayrıca kesitte ECC yüksekliği artıka ortalama çatlak aralığı ve genişliğinin azaldığı ifade edilmiştir.

Yuan ve diğerleri (2013), yaptıkları çalışma kapsamında bazalt lif takviyeli polimer donatı (BFRP ) ve tasarlanmış imento esaslı kompozit malzeme (ECC), tasarlanmış imento esaslı kompozit malzeme/ normal beton (ECC/C) içeren kirişlerin eğilme davranışını incelemişlerdir. Kiriş numunelerinin boyutları 200×300×2350 mm olup iki seri halinde 1.seride 4 adet, 2. seride 2 adet olarak toplamda 6 adet kiriş ürettiyi yapılmıştır. Seri 1’deki 3 adet numune BFRP-ECC içermekte olup değişken olarak farklı oranlarda boyuna donatı ve enine donatıya sahiptir. Ayrıca bir adet numune kontrol numunesi olarak tayin edilmiştir. Kontrol numunesi BFRP donatı ve normal beton içermektedir. Seri 2’deki numuneler BFRP donatılı olup hem ECC hem de normal beton içermektedir. Kirişlerin birinde ECC kirişin çekme bölgesinde kullanılmış diğerinde ise basınç bölgesinde kullanılmıştır. Test sonuçları değerlendirildiğinde, normal beton içeren FRP donatılı kirişte ECC ikamesiyle dayanım, deformasyon kabiliyeti, enerji sönümleme yeteneği açısından önemli ölçüde gelişme sağlanmışır. FRP-normal beton içeren bir kirişle FRP-ECC içeren donatı oranı azaltılmış bir kiriş karşılaştırıldığında FRP-ECC kirişin ECC’nin yüksek nihai basınç birim şekil değiştirmesinden dolayı daha fazla deformasyon kapasitesine sahip olduğu belirtilmiştir. Ayrıca etriye içermeyen ECC kirişin yük taşıma kapasitesinin ve deformasyonunun etriye ve normal beton içeren kirişe göre çok az düşük olduğu, ECC kullanımının kesme kapasitesini etkili bir şekilde artırabileceği ifade edilmiştir. ECC/C kompozit kirişlerde yükleme boyunca beton ile ECC tabakaları arasında ayrılma olmadığı belirtilmiş dayanım ve enerji sönümleme yeteneği açısından normal beton içeren kontrol numunesine göre daha iyi davranış sergilediği belirtilmiştir. Ayrıca ECC/C kompozit kirişlerde çekme bölgesinde ECC kullanılan kirişin basınç bölgesinde ECC kullanılan kirişe göre daha iyi deformasyon kapasitesi gösterdiği ifade edilmiştir. Dahası nihai aşamada çekme bölgesindeki ECC’nin FRP donatının kopmasını önlemeye yardımcı olacağı belirtilmiştir. Çalışma kapsamında FRP-ECC kirişlerin moment- eğrilik ilişkisi analitik olarak incelenmiş, deney sonuçları ile analitik sonuçların uyumlu olduğu ifade edilmiştir.

Gemi ve Köroğlu (2018), kiriş numunelerin çekme bölgesinde 5 cm yüksekliğinde (kiriş yüksekliğinin dörtte biri) polipropilen lif katkılı beton kullanarak hazırladıkları elik ve GFRP donatılı kirişlerin eğilme yükleri etkisi altında davranışını incelemiş ve kirişlerin hasar analizlerini yapmışlardır. Üretilen 4 kirişten bir tanesi kontrol numunesi olarak lifsiz ve elik

donatı ile hazırlanmıştır. Kirişlerde etriye ve basınç donatısı kullanılmamıştır. Kiriş boyutları 150×200×2100 mm'dir. Deneysel çalışmalar neticesinde GFRP donatılı kirişlerin eğilme performanslarının büyük oranda arttığı tespit edilmiştir. Aynı kesit boyutları, aynı beton sınıfı ve çekme donatısı oranına sahip kirişlerde çekme bölgesinde lifli beton kullanılanlarda, daha fazla yük ve moment taşıma kapasitesine ulaşıldığı, çatlak genişliğinin, çatlak sayısının ve deplasmanın azaldığı gözlemlenmiştir. Yük-deplasman grafiğinden kirişlerin süneklik katsayıları hesaplanmış ve çelik donatılı kirişlerin daha sünek davrandığı tespit edilmiştir. GFRP donatılı lifli kirişlerin sünekliğinin liffsiz kirişlerden daha fazla olduğu görülmüştür. GFRP donatılı kirişler denge üstü donatılı kiriş davranışı sergileyerek mesnet bölgelerine doğru büyük ve geniş kesme çatlaklarının oluşmasıyla ani olarak kırılmışlardır. GFRP donatılı kirişlerin gevrek ve ani kırılmalarına rağmen çelik donatılı kirişlere göre daha fazla yük taşıdığı tespit edilmiştir. GFRP donatılarda oluşan hasarlar incelendiğinde, eğilmeden kaynaklı olarak elyaflarda yarılma çatlakları ve kopma görülmüştür.

Said, Mustafa, Shanour ve Khalil (2020), tarafından yapılan çalışmada farklı oranlarda PVA lif içeren ECC kullanılarak aynı kesit alanına sahip (150mm×300 mm) GFRP donatılı ve hibrit donatılı 12 adet kirişin eğilme etkisi altındaki davranışı incelenmiştir. Farklı donatı konfigürasyonları seçilmiş olup kullanılan hibrit donatının çelik olan çekirdeğinin etrafı GFRP kaplıdır. Hazırlanan 12 kiriş numunesi A, B, C, D olarak 4 gruba ayrılmıştır. Gruplar arasında çekme donatısı oranı değişiklik göstermektedir. Donatı oranları %0.85 (A), %1.26 (B), %1.70 (C) ve %1.70 (D) şeklindedir. İlk üç grupta hibrit donatı dördüncü grupta ise hibrit donatı ile GFRP donatı birlikte kullanılmıştır. Her grubun kendi içinde donatı oranı sabit olup PVA lif yüzdesi farklıdır. Kullanılan lif yüzdesi %0, %0.75, %1.5 şeklindedir. Deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde, betona PVA lif eklenmesi ile kirişlerin çatlama yükünde ve yük taşıma kapasitesinde artış sağlandığı belirtilmiştir. Bu durum PVA-ECC malzemenin deformasyon sertleşmesi ve çoklu çatlak davranışı özellikleri ile açıklanmaktadır. Hibrit donatı kullanılması ile kirişlerin çatlama yükü, yük taşıma kapasitesi, süneklik faktörü ve enerji sönümleme özelliklerinin geliştirildiği ortaya konulmuştur. ECC'de PVA oranının artması ile ilk çatlağın daha büyük yük değerinde meydana geldiği, ayrıca kırılma yükü aşamasında çatlak genişliklerinin daha düşük düzeyde olduğu belirtilmiştir. PVA lif içeriği hibrit donatının daha fazla şekil değiştirmesine izin vermiştir.

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

Sunulan tez çalışmasında, ECC içeren FRP donatılı kirişlerin eğilme davranışının belirlenmesi üzerine deneysel bir çalışma yapılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında, aynı boy ve aynı kesit boyutlarına sahip 6 adet kiriş üretilmiştir. Söz konusu kirişlerin 2 tanesi kontrol numunesi olarak hazırlanmış olup kontrol numunelerinden biri normal beton ve standart çelik donatı, diğeri ise normal beton ve Cam Takviyeli Polimer Donatı (GFRP) içermektedir. Diğer 4 adet kiriş ise farklı derinliklerde ECC içermekte olup FRP donatı oranı değişkenlik göstermektedir. ECC içeren kirişlerde ECC dışında kalan kısımlar normal beton ile doldurulmuştur. ECC üretiminde lif olarak hacimce %2 oranında polipropilen (PP) lif kullanılmıştır. Kirişlerde FRP donatı olarak GFRP kullanılmıştır. Deneysel çalışmada, kiriş numuneler dört nokta yükleme eğilme deneyine tabi tutularak, kiriş taşıma kapasiteleri ve yük-deplasman eğrileri belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar için esas alınan deney parametreleri aşağıda yer almaktadır.

- Matris tipi (normal beton ve ECC )
- Boyuna donatı oranı ve tipi (çelik donatı ve GFRP donatı)
- Kiriş içerisindeki ECC derinliği

Sunulan tez çalışması kapsamında, kirişlerin analizi için betonun doğrusal olmayan davranışını esas alan bir yöntem önerilmiştir. Söz konusu yöntem ile ECC içeren FRP donatılı kirişlerin taşıma kapasiteleri ve yük-deplasman eğrileri teorik olarak belirlenmiştir. Test edilen kirişlerin davranışının belirlenmesi amacıyla, deneysel çalışma sonucunda elde edilen yük-deplasman eğrileri teorik olarak elde edilen eğrilerle karşılaştırılmıştır.

#### 3.1. Deneysel Çalışma

##### 3.1.1. Malzemeler

Deneysel çalışmada kapsamında, 150×200×1750 mm (b×h×L) boyutlarında 6 adet kiriş numune üretilmiştir. Kirişlerin üretiminde matris olarak normal beton ve ECC kullanılmış olup donatı olarak ise standart çelik ve Cam Takviyeli Polimer Donatı (GFRP) seçilmiştir. Normal betonda kırmataş agrega, çimento, süper akışkanlaştırıcı ve su kullanılmıştır. ECC beton üretiminde ise agrega olarak silis kumu kullanılmıştır. ECC beton içeriğinde uçucu kül ve

polipropilen (PP) lif yer almıştır. Kirişlerin üretiminde kullanılan malzemelerin özellikleri aşağıda sunulmuştur.

#### 3.1.1.1. Agrega

Deneyisel çalışma kapsamında, normal beton üretiminde agrega olarak Adana’da yer alan taş ocaklarından temin edilen 0-5 mm ince kalınlıkta, 5-12 mm orta kalınlıkta ve 12-19 mm kaba kalınlıkta kırmataş malzeme seçilmiştir.

#### 3.1.1.2. Çimento

Kiriş numunelerde, normal beton ve ECC üretiminde TS EN 197-1 standardına uygun olarak üretimi yapılan Oyak Çimento CEM I 42.5R tipi çimento kullanılmıştır.

#### 3.1.1.3. Silis Kumu

ECC üretiminde Adana ili Kozan ilçesinde maden ocağından temin edilen 150-500 $\mu$  çapında 2.65gr/cm<sup>3</sup> yoğunluğunda silis kumu kullanılmıştır. Silis kumuna ait kimyasal özellikler Tablo 3.1’de sunulmuştur.

**Tablo 3.1.** Silis kumu kimyasal özellikleri

| Analiz Edilen Bileşen          | % Ağırlık |
|--------------------------------|-----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 97.34     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.43      |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.058     |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.26      |
| CaO                            | 0.01      |
| MgO                            | 0.05      |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.00      |
| K <sub>2</sub> O               | 0.02      |
| KK                             | 0.83      |

#### 3.1.1.4. Uçucu Kül

Çalışmalar kapsamında ECC üretiminde Adana ili Yumurtalık ilçesi İsken-Sugözü Termik Santralinde yan ürün olarak çıkan F tipi uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu küle ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 3.2’de sunulmuştur.

**Tablo 3.2.** Uçucu küle ait kimyasal ve fiziksel özellikler

| Kimyasal ve Fiziksel Özellikler    | Sugözü Termik Santrali Uçucu Kül |
|------------------------------------|----------------------------------|
| SiO <sub>2</sub> (%)               | 59.58                            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 21.57                            |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 8.30                             |
| Na <sub>2</sub> O (%)              | 1.69                             |
| CaO (%)                            | 2.73                             |
| SO <sub>3</sub> (%)                | 0.08                             |
| Cl <sup>-</sup> (%)                | 0.084                            |
| Serbest CaO (%)                    | 0.08                             |
| Kızdırma Kaybı (%)                 | 1.85                             |
| Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )      | 2310                             |
| >45 Mikron (%)                     | 14                               |

#### 3.1.1.5. Polipropilen Lif (PP)

ECC üretiminde 12 mm uzunlukta Sika marka PPM-12 polipropilen lif kullanılmıştır. Polipropilen life ait teknik özellikler Tablo 3.3’te verilmiştir. Polipropilen lif görünümü Şekil 3.1’de sunulmuştur.

**Tablo 3.3.** Polipropilen life ait teknik özellikler

| Teknik Özellikler | Polipropilen Lif        |
|-------------------|-------------------------|
| Kimyasal yapı     | %100 polipropilen       |
| Yoğunluk          | 0.91 gr/cm <sup>3</sup> |
| Uzunluk           | 12 mm                   |
| Kalınlık          | 32 mikron               |
| Çekme Mukavemeti  | 600-700 MPa             |



**Şekil 3.1.** ECC üretiminde kullanılan polipropilen lif

### 3.1.1.6. Süper akışkanlaştırıcı

ECC ve normal beton üretiminde istenilen işlenebilirliği elde etmek için polikarboksilik eter esaslı, Master Builders Solutions Yapı Kimyasalları San. ve Tic. Ltd. Şti.'den temin edilen MasterGlenium 51 süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcıya ait teknik özellikler Tablo 3.4'te verilmiştir.

**Tablo 3.4.** Süper akışkanlaştırıcıya ait teknik özellikler

| Teknik Özellikler       | Süperakışkanlaştırıcı       |
|-------------------------|-----------------------------|
| Malzemenin yapısı       | Polikarboksilik eter esaslı |
| Görünüm                 | Kahverengi-sıvı             |
| Özgül ağırlık (20°C'de) | 1.082 – 1.142 kg/lt         |
| pH değeri               | 6 – 7                       |
| Alkali içeriği (%)      | ≤ 3.00 (ağırlıkça)          |
| Klor iyon içeriği (%)   | ≤ 0.10 (ağırlıkça)          |

### 3.1.1.7. Su

Deneyisel çalışmada üretilen normal beton ve ECC içeriğinde yer alan su Adana ili içme ve kullanma suyundan temin edilmiştir.

### 3.1.1.8. Donatı

Deneyisel çalışma kapsamında kiriş numunelerin üretiminde standart çelik ve lif takviyeli polimer donatı (FRP) kullanılmıştır. Kiriş numunelerde yer alan standart çelik donatı, istenilen ölçülerde piyasadan temin edilmiştir. Çelik donatının akma dayanımı 550 MPa, elastisite modülü ise  $2 \times 10^5$  MPa'dır. FRP donatılı kirişlerin üretiminde Forta Dış Tic.İnş.Taah.A.Ş tarafından temin edilen Pultra marka cam takviyeli polimer donatı (GFRP) kullanılmıştır. GFRP donatıya ait teknik özellikler Tablo 3.5'te sunulmuştur.

**Tablo 3.5.** GFRP donatıya ait teknik özellikler

|      | Çap<br>(mm) | Akma Dayanımı<br>(MPa) | Kopma Dayanımı<br>(MPa) | Elastisite Modülü<br>(GPa) |
|------|-------------|------------------------|-------------------------|----------------------------|
| GFRP | 12          | -                      | 1100                    | 50                         |

### 3.1.2. Kiriş Numunelerinin Üretilmesi

#### 3.1.2.1. Karışım Oranlarının Belirlenmesi

Deneyisel çalışma kapsamında üretilen 6 adet kirişten 2 tanesi kontrol numunesi olarak tasarlanmıştır. Kirişlerin üretiminde kontrol numunelerinin tamamı normal beton ile hazırlanmıştır. Farklı derinliklerde ECC kullanılan kirişlerde, ECC dışında kalan kısımda normal beton kullanılmıştır. Normal beton karışım oranları Tablo 3.6'da verilmiştir. ECC üretiminde karışım oranının tespiti için daha önce yapılan literatür çalışmalarından (Abid, Shamkhi, Mahdi ve Daek, 2018; Şahmaran ve diğerleri, 2012; Zhang, Deng ve Dong, 2019) faydalanılmış, değişik oranlarda karışımlar hazırlanmıştır. ECC üretimi için esas alınan su/bağlayıcı oranı 0.26 ve kum/bağlayıcı oranı 0.38 olan karışımın oranları Tablo 3.7'de verilmiştir.

**Tablo 3.6.** Normal beton karışımının bileşen oranları (kg/m<sup>3</sup>)

| Karışım İsmi | Çimento | Su  | Kum | Çakıl | Akışkanlaştırıcı |
|--------------|---------|-----|-----|-------|------------------|
| Normal Beton | 390     | 175 | 775 | 1070  | 4                |

**Tablo 3.7.** ECC karışımının bileşen oranları (kg/m<sup>3</sup>)

| Karışım İsmi | Çimento | Uçucu Kül | Su  | Silis Kumu | PP lif | Akışkanlaştırıcı |
|--------------|---------|-----------|-----|------------|--------|------------------|
| ECC          | 570     | 685       | 326 | 475        | 18.2   | 6                |

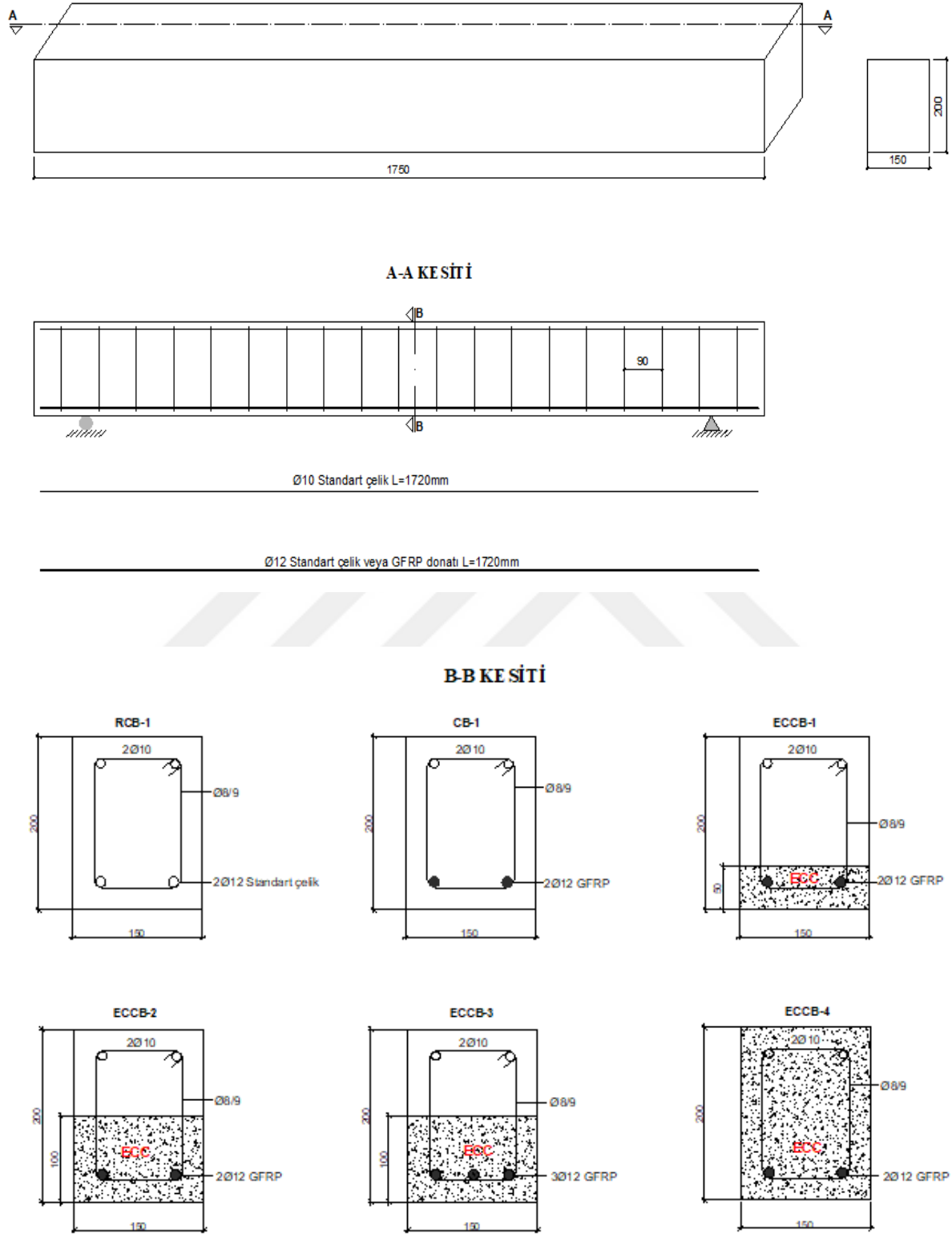
**3.1.2.2. Deney Numuneleri, Boyutları ve Donatı Düzeni**

Deneyisel çalışma kapsamında, 150×200×1750 mm boyutlarında 6 adet kiriş hazırlanmıştır. Kirişlerden RCB-1 ve CB-1 kiriş numuneleri kontrol numunesi olarak tasarlanmış olup normal beton içermektedir. Kirişlerden 3 tanesi farklı derinliklerde ECC ve üst kısmı normal beton içermektedir. Söz konusu kirişlerden ECCB-1 numunesinin %25'i, ECCB-2 ve ECCB-3 numunelerinin %50'si ECC ile doldurulmuştur. ECCB-4 kiriş numunesinin ise tamamı ECC malzemesi ile doldurulmuştur. Çalışmada hazırlanan kiriş numunelerde farklı donatı oranlarında standart inşaat çeliği ve cam elyaf takviyeli polimer donatı (GFRP) kullanılmıştır. Ayrıca kirişlerin tamamında basınç bölgesinde 2 adet 10 mm çapında (Ø) standart çelik boyuna donatı uygulanmıştır. Kiriş numunelerin hazırlığında, 8 mm çapında ve 9 cm aralıklarla standart çelik etriye kullanılmıştır.

Kiriş numunelerinin isimlendirilmesinde 'C' normal betonu, 'B' kirişi temsil etmektedir. 'R' ise standart çelik donatı için kullanılmıştır. ECC içeren kirişler 'ECC' ile temsil edilmektedir. Kirişlere ait matris tipi ve donatı özellikleri Tablo 3.8'de yer almaktadır. Ayrıca kirişlere ait en kesit özellikleri, donatı düzeni ve detayı Şekil 3.2'de sunulmuştur.

**Tablo 3.8.** Kirişlere ait matris tipi, donatı tipi ve oranı

| Kiriş İsmi | Matris Tipi               | Donatı tipi ve oranı |
|------------|---------------------------|----------------------|
| RCB-1      | Normal beton              | 2Ø12 Çelik donatı    |
| CB-1       | Normal beton              | 2Ø12 GFRP donatı     |
| ECCB-1     | %25 ECC+ %75 Normal beton | 2Ø12 GFRP donatı     |
| ECCB-2     | %50 ECC+ %50 Normal beton | 2Ø12 GFRP donatı     |
| ECCB-3     | %50 ECC+ %50 Normal beton | 3Ø12 GFRP donatı     |
| ECCB-4     | ECC                       | 2Ø12 GFRP donatı     |



Şekil 3.2. Kiriş boyutları ve kesit detayları

### 3.1.2.3. Kiriş Numunelerin Hazırlığı

Kiriş numunelerin hazırlığında, beton dökümü öncesi donatı hazırlığı yapılmıştır. İstenilen ölçülerde temin edilen standart çelik donatı, GFRP donatı ve etriye donatısı öngörülen donatı düzenlemesine uygun olarak bağlanmıştır. Kirişlerin tamamında basınç donatısı olarak Ø10 mm standart çelik donatı, çekme donatısı olarak ise Ø12 mm standart çelik donatı veya GFRP donatı kullanılmıştır. Boyuna donatılar, standart çelik ile üretilen Ø8 mm etriyelerle 9 cm aralıklı olarak bağlanmıştır (Şekil 3.3 (a-b)).



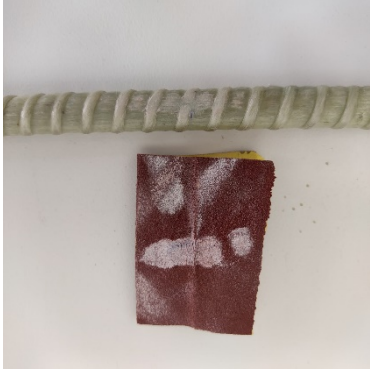
(a)



(b)

**Şekil 3.3.** Kiriş donatı hazırlığı

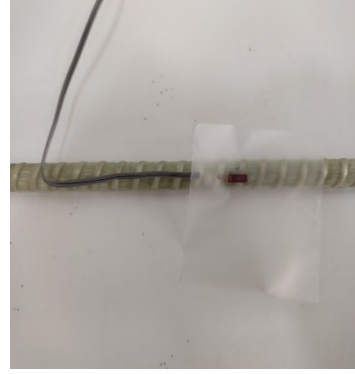
Donatı hazırlığı aşamasında, kiriş çekme bölgesindeki GFRP donatıda oluşacak birim şekil değiştirmenin okunabilmesi için GFRP donatı orta bölgesine gerinim ölçer (strain gauge) yapıştırılmıştır. Gerinim ölçerin yerleştirilmesinde ilk işlem olarak gerinim ölçerin yapıştırılacağı bölgede donatı yüzeyi zımparalanarak yüzey düzgün hale getirilmiştir. Daha sonra, yüzey aseton ile temizlenerek polietilen kağıt ve yapıştırıcı vasıtasıyla gerinim ölçer yapıştırılmıştır (Şekil 3.4 (a-b-c)). Gerinim ölçerin tellerinin muhafazası için ilk katman olarak W1 balmumu uygulaması yapılmış, kablosu plastik kablo bağı ile sabitlenmiştir. Bu aşamada, hazırlanan devrenin ilk kontrolü yapılmıştır (Şekil 3.4 (d-e-f)). Gerinim ölçerin tellerinin muhafazası için ikinci katman olarak teller WM basınca duyarlı kauçuk bant ile sarılmıştır (Şekil 3.4 (g-h-i)). Son olarak ekstra koruma için siyah kauçuk elektrik bandı ile sarıldıktan sonra devrenin tekrar kontrolü yapılarak GFRP donatıya gerinim ölçer yerleştirme işlemi tamamlanmıştır ( Şekil 3.4 (j-k-l)).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)



(i)



(j)



(k)



(l)

Şekil 3.4. GFRP donatıya gerinim ölçer yerleştirilmesi

Donatı hazırlığı tamamlandıktan sonra kurulan kalıpların temizliği yapılmış, kalıp yağlanmış ve donatı paspayı miktarı ayarlanarak hazırlanan donatılar kalıp içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.5).



**Şekil 3.5.** Kalıplara donatının yerleştirilmesi

Donatı ve kalıp hazırlığı aşamaları tamamlandıktan sonra ilgili betonun karışım malzemelerinin hazırlığına geçilmiştir. Normal beton ve ECC için gerekli olan agrega, çimento, uçucu kül, polipropilen lif, süper akışkanlaştırıcı ve su tartılarak beton dökümüne hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.6(a-b)).



(a)



(b)

**Şekil 3.6.** Karışıma giren malzemelerin hazırlanması

#### 3.1.2.4. ECC ve Normal Beton Üretimi

ECC hazırlığında ilk önce kuru malzemeler silis kumu, uçucu kül ve çimento 250 lt kapasiteli pan mikserde eklenmiş kuru malzemeler biraz karıştırıldıktan sonra aşama su-akışkanlaştırıcı karışımı ECC'ye eklenmiştir (Şekil 3.7(a-b)). Homojen bir karışım elde edildikten sonra yavaş yavaş polipropilen lif eklenmiştir (Şekil 3.7 (c)). Böylece polipropilen lifin karışımın içerisinde homojen dağılması sağlanmıştır (Şekil 3.7 (d)). Lif eklendikten sonra da mikserde bir süre karıştırılan ECC'nin üretimi yaklaşık 15-20 dakika sürmüştür. Normal beton üretiminde de çakıl, kum ve çimento kuru halde karıştırıldıktan sonra su-akışkanlaştırıcı karışımı aşama karışıma eklenmiş ve homojen bir karışım elde edilmiştir. ECC ve normal beton içeren kirişlerin üretimi iki aşamada yapılmıştır. İlk önce hazırlanan ECC tabaka öngörülen tasarıma uygun şekilde dökülmüş ve yaklaşık olarak 2 saat bekledikten sonra üzerine normal beton dökülmüştür.



(a)



(b)



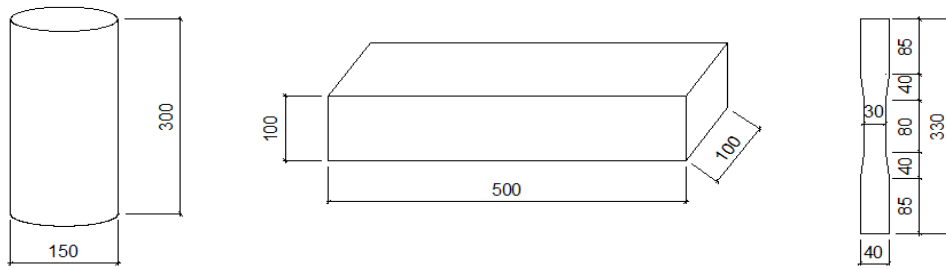
(c)



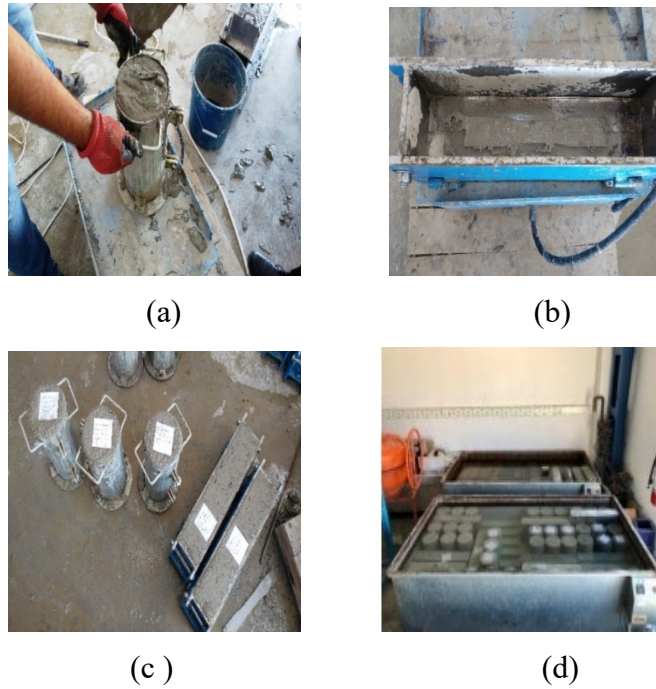
(d)

**Şekil 3.7.** ECC üretim aşamaları

Kirişlerin üretiminde kullanılan ECC ve normal betonun basınç dayanımının tayini için her karışımdan üçer adet olmak üzere 150×300 mm ölçülerinde standart silindir numuneler alınmıştır. Ayrıca ECC ve normal betonun eğilme davranışının tayini için ikişer adet olmak üzere 100×100×500mm ölçülerinde prizma numune alınmıştır. İlave olarak ECC’de eksenel çekme davranışının tayini için her ECC dökümünde dörder adet dog-bone numune alınmıştır. Dog-bone numunelerin boyutu 330×40×10 mm olup, kalıplar özel üretim olarak lazer kesim ile pleksiglastan hazırlattırılmıştır. Normal beton ve ECC’nin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan sertleşmiş beton deneylerinde kullanılan numune kalıplarının ölçüleri Şekil 3.8’de verilmiştir. Numune alımları sırasında kalıplar iyice temizlenmiş ve tozdan arındırılarak içleri yağlanmıştır. Döküm sırasında betonun iyi bir şekilde yerleşmesi için sarsma tablası üzerinde vibrasyon işlemi uygulanmıştır. Dökümden bir gün sonra numuneler kalıptan çıkarılarak kür havuzlarına konulmuştur ( Şekil 3.9).

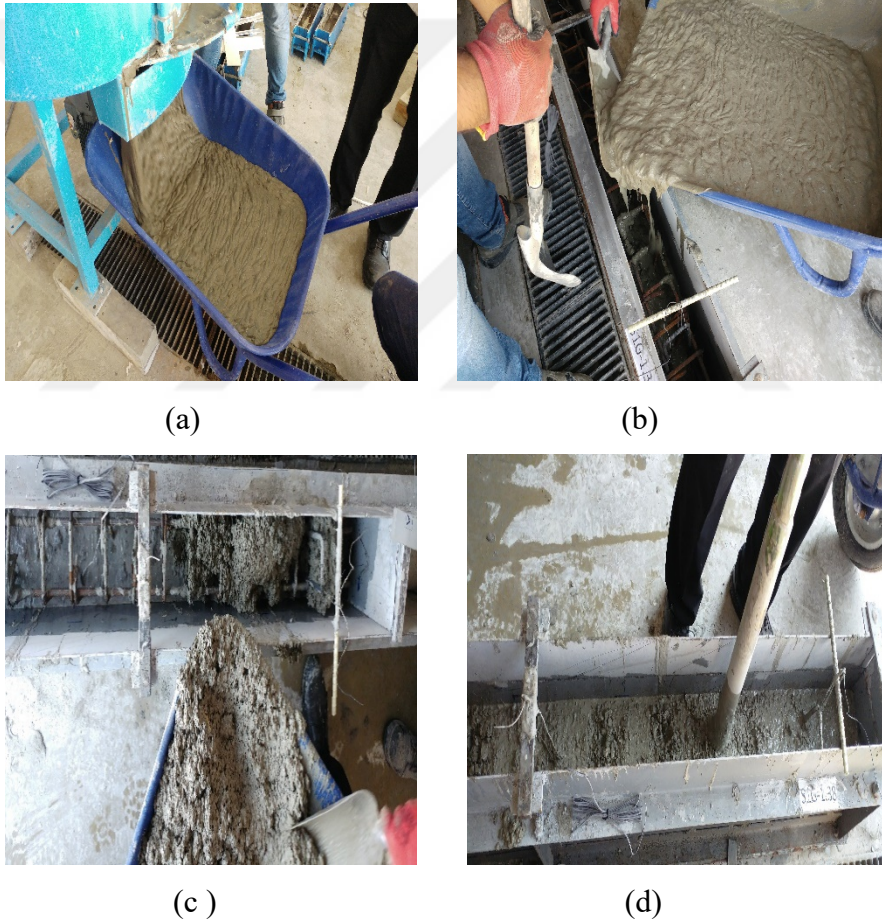


**Şekil 3.8.** Silindir numune, prizma numune ve dog-bone numune kalıpları



**Şekil 3.9.** Silindir numune, prizma numune ve dog-bone numune alımı

ECC ve normal beton içeren kirişlerin üretimi sırasında ECC tabakanın ve normal beton tabakanın birbirine karışmasını önlemek için ECC döküldükten sonra yaklaşık 2 saat beklenmiş sonra normal beton dökümüne geçilmiştir (Şekil 3.10 (a-b-c)). ECC üzerine normal beton dökülürken tabakalar arasında karışma olmaması için vibrasyon işlemine çok dikkat edilmiştir. Kalıba yerleştirilen normal betonun vibrasyonu sırasında vibratör ECC tabakanın en fazla 3 cm yukarısına kadar daldırılmıştır. Tabakalar arasında karışma olmaması için dikkat edilen bir diğer husus da normal beton tabakada vibratörün 90° açı ile uygulanması olmuştur (Şekil 3.10 (d)). Beton dökümünün ardından kiriş yan kalıpları 2 gün sonra sökülülmüştür. Hazırlanan kirişler dayanım kazanacağı güne kadar sulanarak kürlenme işlemi yapılmıştır.



**Şekil 3.10.** ECC ve normal beton içeren kirişlerin hazırlanması aşamaları

### 3.1.3. Deney yöntemi

Deneyisel çalışma kapsamında, ECC ve normal betonun basınç dayanımı ve eğilme dayanımının belirlenmesi amacıyla bir takım testler gerçekleştirilmiştir. ECC’de dayanım tespiti için sertleşmiş beton testleri kapsamında eksenel basınç deneyi, dört nokta eğilme deneyi ve ECC doge-bone numunelerinde eksenel çekme deneyi gerçekleştirilmiştir. Aşağıda uygulanan deneylere ayrıntılı olarak yer verilmiştir.

#### 3.1.3.1. Basınç Dayanımı Deneyi

Normal betonun ve ECC’nin basınç dayanımının belirlenmesi için alınan silindir numuneler TS EN 12390-3’e uygun olarak tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Kür havuzundan alınan numuneler ilk olarak kurutulmuş, sonraki aşamada uygulanan yükün düzgün yayılmasını sağlamak için silindir numunelerin üst kısmına kükürt başlık yapılmıştır (Şekil 3.11 (a)). Sabit hızla tek eksenli eksenel yük altında test edilen numunelerin ulaştığı maksimum yükün kesit alanına bölünmesiyle normal beton ve ECC betonların basınç dayanımları elde edilmiştir. Silindir numunelerin gerilme-birim deformasyon eğrilerinin belirlenebilmesi için deney sırasında numuneye uygulanan yük ve numunede oluşan deplasman değerleri kamera ile izlenerek kaydedilmiştir. Böylece deney sonrasında elde edilen veriler kullanılarak normal beton ve ECC betonların deneyisel gerilme-birim deformasyon eğrileri elde edilmiştir. Aşağıda Şekil 3.11 (b)’de numunelere uygulanan basınç dayanımı testinin görünümü yer almaktadır.



(a)



(b)

Şekil 3.11. Beton basınç deneyi

### 3.1.3.2. Eğilme Dayanımı Deneyi

ECC ve normal betonun eğilmede çekme dayanımlarının tespiti için alınan 100×100×500 mm ölçülerindeki prizma numuneler TS EN 12390-5'e uygun olarak dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Kür havuzundan çıkartılarak kurutulan numuneler sabit hızda yüklenerek eğilme deneyi yapılmıştır (Şekil 3.12). Numunelerin kırılma yükleri tespit edilerek aşağıda yer alan denklem yardımıyla eğilmede çekme dayanımları belirlenmiştir.

$$\sigma_e = \frac{F.L}{b.d^2} \quad (3.1)$$

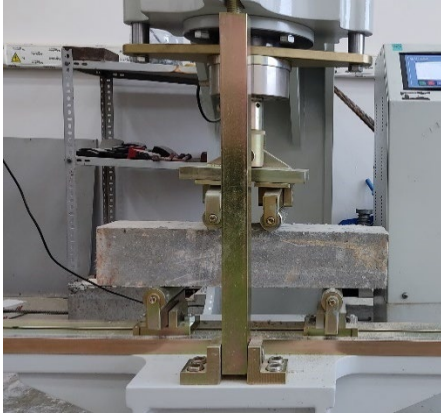
$\sigma_e$ : Eğilme dayanımı

F: Kırılma yükü

L: Deney numunesinin mesnetler arasındaki mesafesi

b: Deney numunesinin genişliği

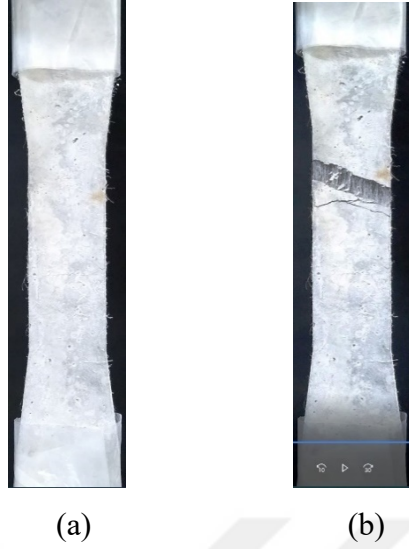
d: Deney numunesinin kalınlığı



Şekil 3.12. Dört nokta eğilme deneyi

### 3.1.3.3. Eksenel Çekme Deneyi

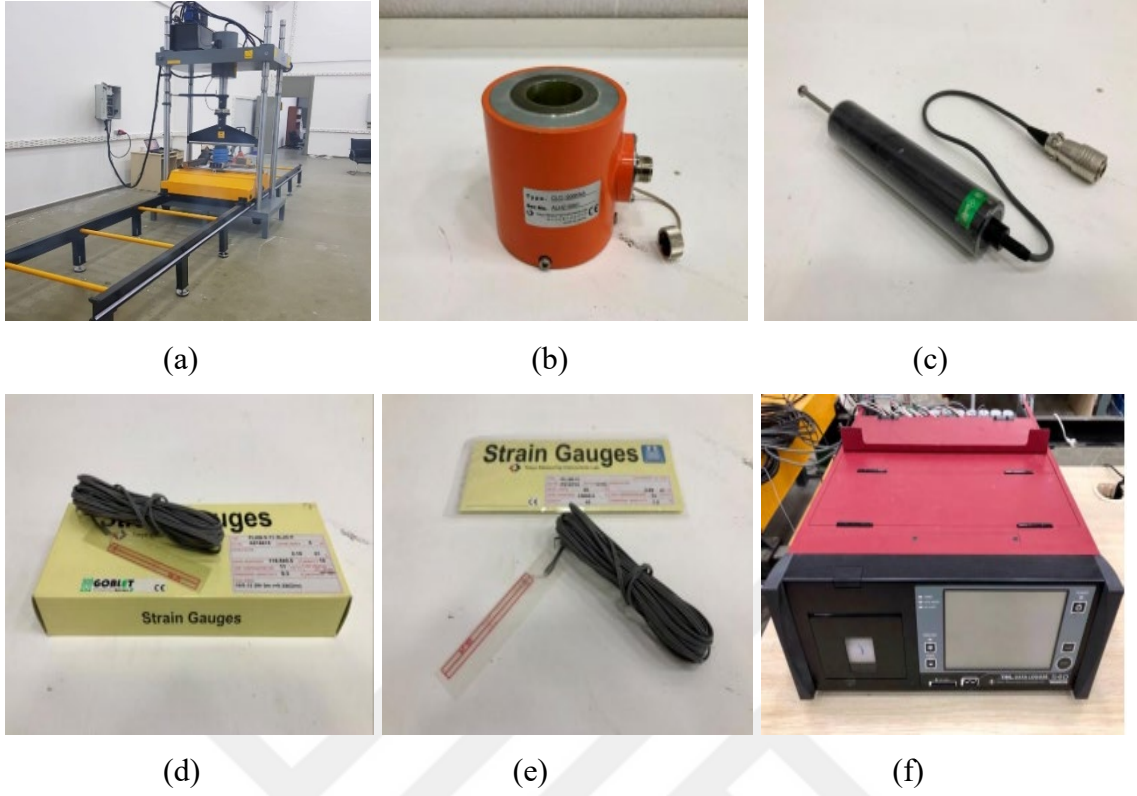
ECC'nin çekme davranışının tayini için her ECC karışımından dörder adet alınan 330×40×10mm boyutlarındaki dog-bone numuneler kür havuzundan çıkarıldıktan sonra kurutularak Shimadzu Corporation firması tarafından üretilen statik universal çekme test cihazında eksenel çekme deneyine tabi tutulmuştur (Şekil 3.13). Deney sırasında cihaz tarafından okunan ve kaydedilen veriler yardımıyla ECC betonun çekme dayanımı belirlenmiştir.



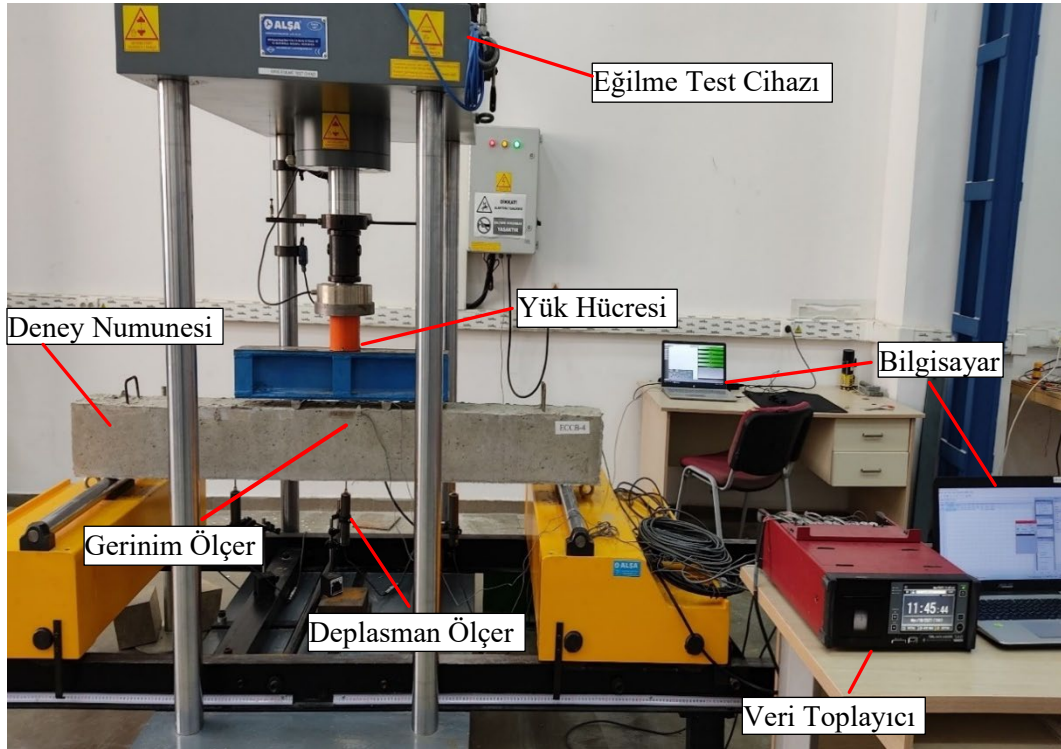
**Şekil 3.13.** Eksenel çekme deneyi

#### **3.1.3.4. Kiriş Eğilme Deneyi**

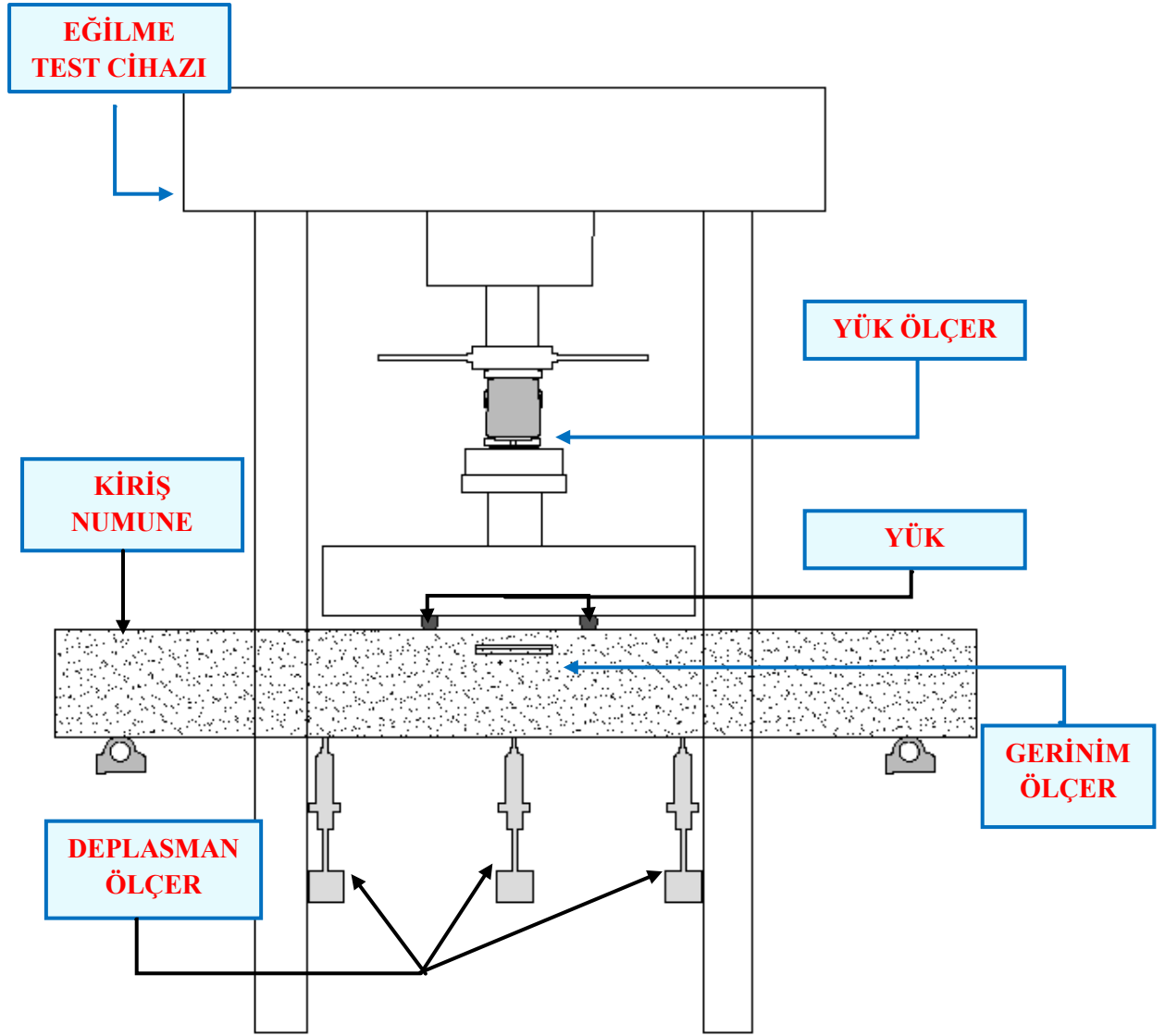
Yapılan çalışma kapsamında üretilen kirişler taşıma gücü kapasitesi ve yük-deplasman davranışının belirlenmesi amacıyla dört nokta yükleme eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Testler, Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Yapı Laboratuvarında yer alan Alşa Laboratuvar Cihazları Ltd. Şti. tarafından üretilmiş olan 500 kN kapasiteli eğilme test cihazı (Şekil 3.14 (a)) ile gerçekleştirilmiştir. Kiriş numunelerinde uygulanan yükü ölçmek için 500 kN kapasiteli Tokyo Measuring Instruments Lab. tarafından üretilmiş bir yük hücresi kullanılmıştır (Şekil 3.14 (b)). Test sırasında uygulanan yüke karşılık gelen yer değiştirmelerin tespiti için Tokyo Measuring Instruments Lab. Tarafından üretilen 5 adet 50 mm kapasiteli deplasman ölçerlerden (LVDT) yararlanılmıştır (Şekil 3.14 (c)). Bunlara ilave olarak normal beton, ECC ve GFRP donatıdaki şekil değiştirmelerin tespiti için Tokyo Measuring Instruments Lab. tarafından üretilmiş olan FLAB-5-11-3LJC-F ve PL-60-11 gerinim ölçerler kullanılmıştır (Şekil 3.14 (d-e)). Uygulanan yük ve yüke karşılık gelen deplasman ve şekil değiştirmelerin okunabilmesi ve kaydedilmesi için elektronik veri toplama sistemi kurulmuştur. Verilerin bilgisayara kaydı Tokyo Measuring Instruments Lab. tarafından üretilmiş olan TDS-540 veri toplayıcı ile yapılmıştır (Şekil 3.14 (f)). Ayrıca deneyler sırasında kirişlerin yapısal davranışı hem gözle izlenmiş hem de kamera ile kayıt altına alınmıştır. Kiriş dört nokta eğilme deneyine ait deney düzeneğine resim olarak Şekil 3.15'te, şematik olarak Şekil 3.16'da sunulmuştur.



**Şekil 3.14.** Kiriş eğilme deneyinde kullanılan (a) eğilme test cihazı, (b) deplasman ölçer, (c) GFRP donatı için FLAB-5-11-3LJC-F gerinim ölçer (e) normal beton ve ECC için PL-60-11 gerinim ölçer, (f) veri toplayıcı



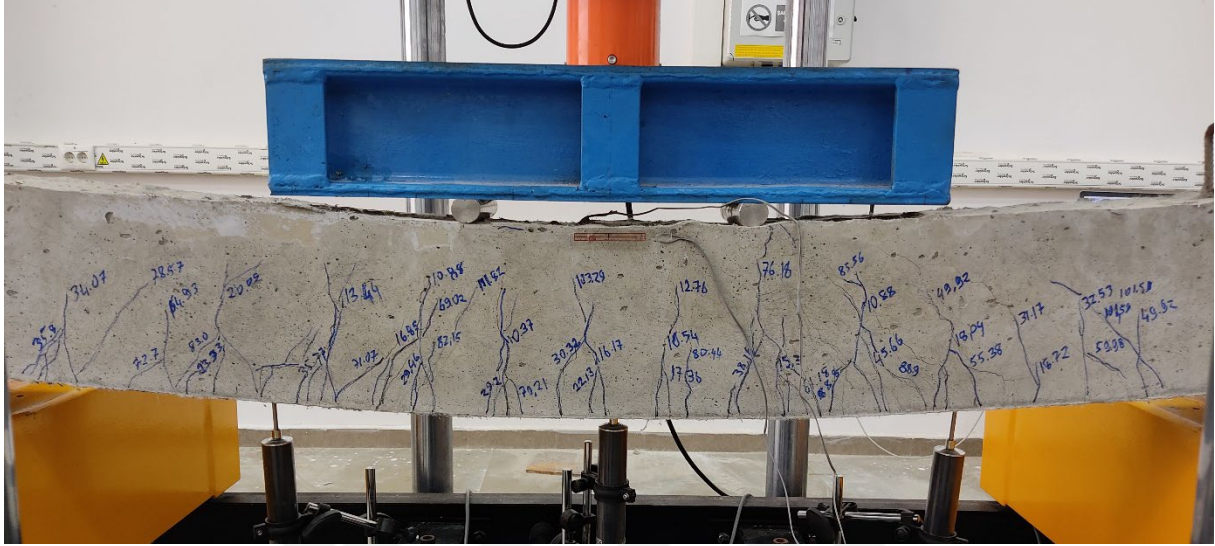
**Şekil 3.15.** Kiriş dört nokta eğilme deney düzeneği resim olarak gösterimi



Şekil 3.16. Kiriş dört nokta eğilme deney düzeneği şematik olarak gösterimi

Kiriş deney düzeneğinin kurulum aşamasında, kiriş numuneler vinç yardımıyla eğilme test cihazına taşınmış ve kirişler deneysel çalışmada belirlenen ölçülere uygun olarak test cihazına yerleştirilmiştir. Daha sonra yük ölçer, deplasman ölçerler ve beton gerinim ölçer deney numunesine uygulanmış ve söz konusu ölçüm cihazlarının veri toplama sistemine bağlantı işlemi yapılmıştır. Deney düzeneği hazırlık aşaması tamamlandıktan sonra kiriş testine başlanmıştır. Kiriş numunelere uygulanan yük sıfırdan başlatılmış ve taşıma gücü kapasitesine ulaşana kadar yükleme devam ettirilmiştir. Deney boyunca kirişlerin yapısal davranışı kamera ile kayıt altına alınmış ve aynı zamanda davranış gözle izlenerek çeşitli yük aşamalarında kirişte oluşan çatlaklar kiriş numuneler üzerine işlenmiştir. Kirişlerin olumlu düzeyde sehim kapasitesi sergilediği ve kirişte çok fazla çatlak yayılımı olduğu deneysel çalışmalar sırasında

gözlemlenmiştir. Şekil 3.17’de söz konusu davranışa örnek olması bakımından ECCB-4 kirişinde oluşan çatlak yayılımları gösterilmiş olup davranış ile ilgili detaylara ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak değinilmiştir.



Şekil 3.17. ECCB-4 kirişinde gözlenen sünek davranış

### 3.2. Analitik Çalışma

Sunulan çalışmada, normal beton ve ECC içeren FRP donatılı kirişlerin taşıma gücü kapasitesi ve yük-deplasman eğrilerinin analizi için malzemelerin doğrusal olmayan davranışını esas alan teorik bir yöntem geliştirilmiştir. Söz konusu yöntem ile kirişlerin analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen teorik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

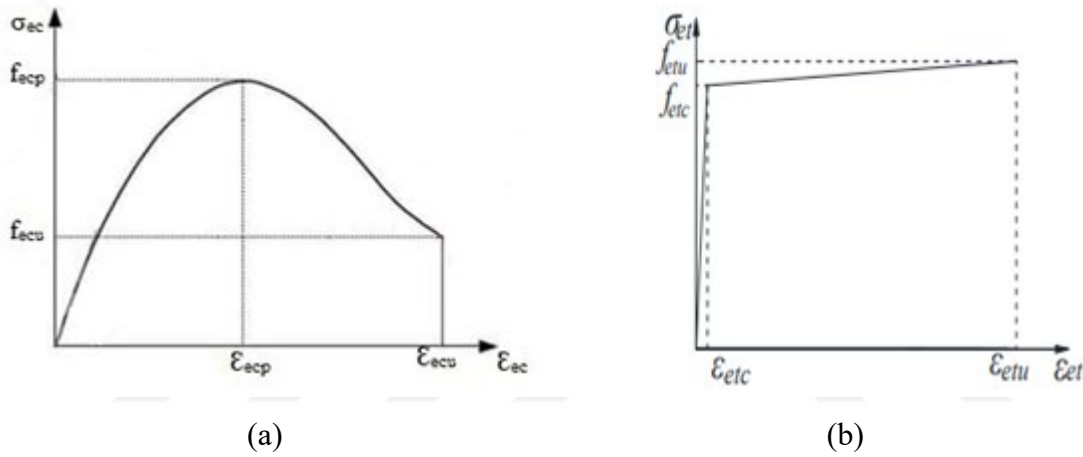
#### 3.2.1. Yöntemde esas alınan temel varsayımlar

- 1) Düzlem kesitler eğilmeden sonra da düzlem kalır (Bernoulli-Navier hipotezi).
- 2) Beton için literatürde yer alan gerilme-birim deformasyon modeli kullanılmaktadır (Hognestad Modeli).
- 3) Çelik donatı için elasto-plastik davranış esas alınmıştır.
- 4) ECC malzeme için basınç altında silindirik testinden elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. Bununla birlikte çekme altında Ge, Ashour, Ji, Cai, ve Cao (2018) tarafından sunulan gerilme-birim deformasyon modeli kabul edilmiştir.
- 5) GFRP donatı için doğrusal elastik davranış esas alınmıştır.
- 6) Normal betonun çekme dayanımına katkısı ihmal edilmiştir.

- 7) ECC'nin çekme dayanımı hesaplarda dikkate alınmıştır.
- 8) GFRP donatı ile beton ve ECC arasında tam aderans vardır. Ayrıca ECC tabaka ile normal beton arasında da kuvvetli uyum vardır.

### 3.2.2. ECC için gerilme-birim deformasyon modeli

Analitik çalışmada, ECC için basınç altında silindirik testinden elde edilen gerilme-birim deformasyon eğrisi kullanılmıştır. ECC'de çekme altında Ge, Ashour, Ji, Cai, ve Cao (2018)'in çalışmalarında kabul edilen gerilme-birim deformasyon modeli esas alınmıştır. ECC için basınç ve çekme altında esas alınan gerilme- birim deformasyon ilişkisi Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.18. ECC için (a) basınç (b) çekme modeli

$\sigma_{ec}$ : ECC basınç gerilmesi

$f_{ecp}$ : ECC maksimum basınç dayanımı

$f_{ecu}$ : ECC ezilme basınç dayanımı

$\epsilon_{ec}$ : ECC basınç birim şekil değiştirmesi

$\epsilon_{ecu}$ : ECC ezilme birim kısalması

$\epsilon_{ecp}$ : ECC maksimum basınç dayanımına denk gelen birim şekil değiştirme

ECC çekme dayanımının tayini için gerekli ifade Denklem (3.2)'de sunulmuştur.

$$\sigma_{et} = \begin{cases} f_{etc} \epsilon_{et} / \epsilon_{etc} , & 0 \leq \epsilon_{et} \leq \epsilon_{etc} \\ f_{etc} + (f_{etu} - f_{etc})(\epsilon_{et} - \epsilon_{etc}) / (\epsilon_{etu} - \epsilon_{etc}) , & \epsilon_{etc} < \epsilon_{et} \leq \epsilon_{etu} \end{cases} \quad (3.2)$$

$\sigma_{et}$ : ECC çekme gerilmesi

$f_{etc}$ : ECC'nin çatlamada çekme dayanımı

$f_{etu}$ : ECC kopma çekme dayanımı

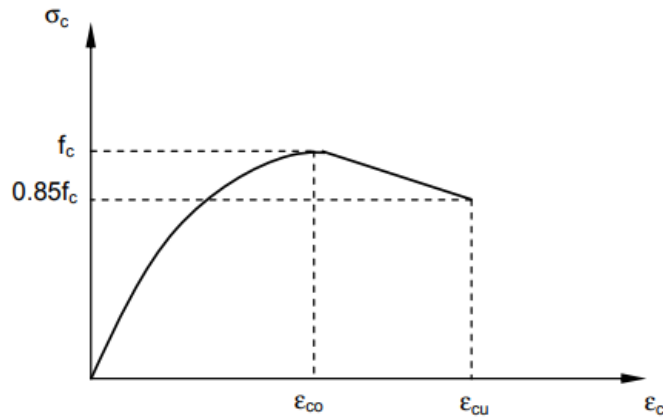
$\epsilon_{et}$ : ECC çekme birim şekil değiştirmesi

$\epsilon_{etc}$ : ECC'nin çatlama çekme dayanımına karşılık gelen birim şekil değiştirmesi

$\epsilon_{etu}$ : ECC kopma birim uzaması

### 3.2.3. Normal beton için gerilme-birim deformasyon modeli

Teorik çalışma kapsamında normal beton için Hognestad tarafından önerilen beton modeli esas alınmıştır. Hognestad modelinde gerilme-birim kısalma eğrisinin tepe noktasına kadar olan bölümünün ikinci dereceden parabol olduğu, eğrinin azalan kısmının ise doğrusal olduğu varsayılmıştır. Maksimum gerilme genelde beton silindir dayanımının %85'i olarak alınır ( $f_c = 0.85f_{ck}$ ). Maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalma  $\epsilon_{co} = 2f_c/E_c$  olarak hesaplanabilir veya genelde 0.002 alınabilmektedir. Modelde betonun maksimum birim kısalma değeri 0.0038 olarak verilmiştir. Normal beton için kabul edilen Hognestad modeli gerilme-birim deformasyon eğrisi Şekil 3.19'da sunulmuştur.



Şekil 3.19. Hognestad modeli

Beton basınç dayanımının tayini için, Hognestad modelini ifade eden denklemler;

$$\sigma_c = \begin{cases} f'_c \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right] & 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{co} \\ f'_c \left[ 1 - 0.15 \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{co}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co}} \right) \right] & \varepsilon_{co} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (3.3)$$

$f'_c$  : Beton basınç dayanımı

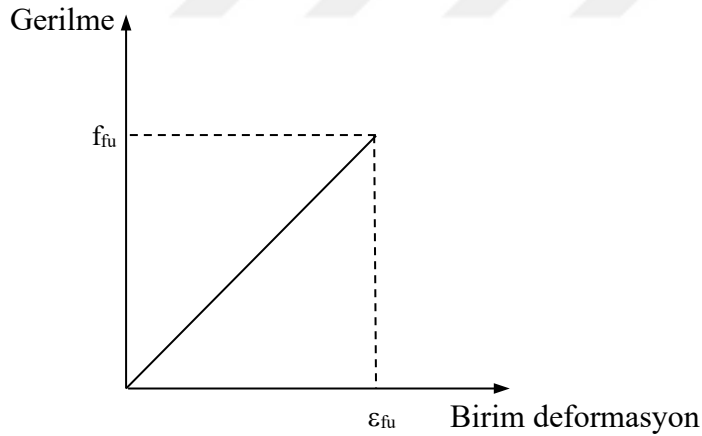
$\sigma_c$ : Betondaki basınç gerilmesi

$\varepsilon_c$ : Beton basınç birim kısalması

$\varepsilon_{co}$ : Beton maksimum dayanıma denk gelen basınç birim kısalması

$\varepsilon_{cu}$ : Beton ezilme birim kısalması

### 3.2.4. FRP için gerilme-birim deformasyon modeli



**Şekil 3.20.** FRP donatı için gerilme-birim deformasyon ilişkisi

FRP için gerilme birim deformasyon modelini tanımlayan ifade Denklem (3.4)'de gösterilmiştir.

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f \leq f_{fu} \quad (3.4)$$

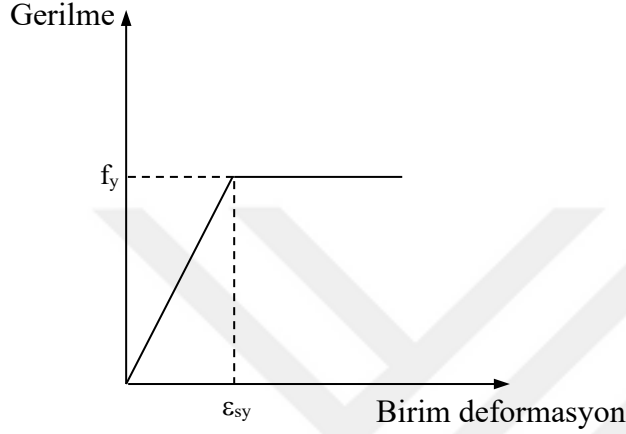
$\sigma_f$ : FRP donatı gerilmesi

$E_f$ : FRP donatı elastisite modülü

$\epsilon_f$ : FRP donatı birim deformasyonu

$f_f$ : FRP donatı kopma dayanımı

### 3.2.5. Çelik donatı için gerilme-birim deformasyon modeli



**Şekil 3.21.** Çelik donatı için gerilme-birim deformasyon ilişkisi

Çelik için elasto-plastik gerilme birim deformasyon modeli esas alınmış ve modeli tanımlayan ifade Denklem (3.5)' de gösterilmiştir.

$$\sigma_s = E_s \epsilon_s \leq f_y \quad (3.5)$$

$\sigma_s$ : Çelik gerilmesi

$E_s$ : Çeliğin elastisite modülü

$\epsilon_s$ : Çelik birim deformasyonu

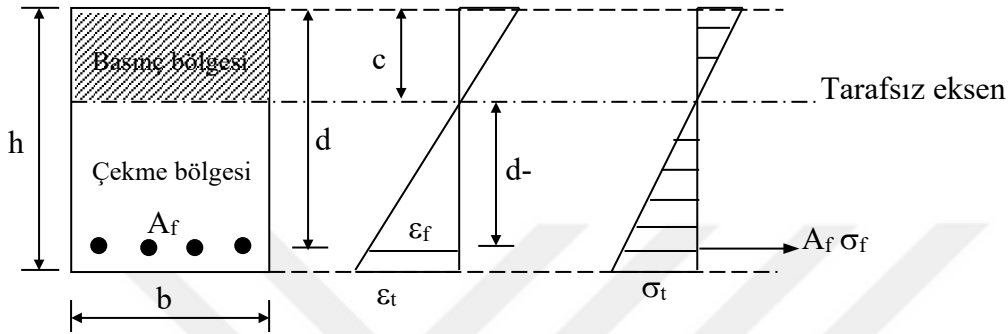
$f_y$ : Çelik akma dayanımı

### 3.2.6. Analiz yöntemi formülasyonu

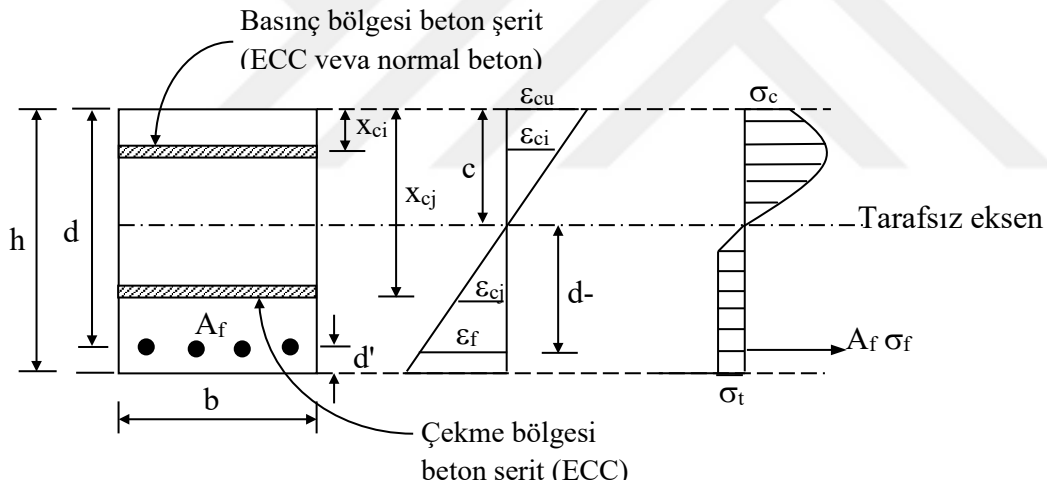
ECC doldurulmuş kiriş kesiti Şekil 3.22 'de gösterilmektedir. Analiz yönteminde malzemelerin doğrusal olmayan davranışları esas alınmaktadır. Bu nedenle betonun doğrusal olmayan gerilme-birim deformasyon modelini hesaplara yansıtabilmek üzere ECC betonu basınçta ve çekme bölgesinde şeritlere ayrılmaktadır. Benzer şekilde normal beton ile hazırlanan kirişlerin basınç bölgesinde beton şeritlere bölünmektedir. Analiz denklemlerinde kullanılmak üzere her

bir şeritin alanı ve ağırlık merkezi hesaplanmaktadır. Her bir şeritin ağırlık merkezinde bulunan birim deformasyon ile (Denklem 3.6) malzemeler için seçilen gerilme-birim deformasyon ilişkisi kullanılarak gerilmeler hesaplanabilmektedir.

Çatlama durumu ve taşıma gücü halini ifade eden kiriş birim deformasyon dağılımı ve gerilme dağılımları Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'te sunulmuştur.



Şekil 3.22. Çatlama durumu birim deformasyon ve gerilme dağılımı



Şekil 3.23. Taşıma gücü durumu birim deformasyon ve gerilme dağılımı

b: Kesit genişliği

h: Kesit yüksekliği

c: Tarafsız eksen derinliği

d': Paspayı

d: Faydalı yükseklik

$A_f$ : FRP donatı alanı

$x_{ci}$ : Basınç bölgesindeki ECC veya normal beton şeritin ağırlık merkezinin basınç bölgesi en dış life olan dik uzaklığı

$x_{cj}$ : Çekme bölgesindeki ECC şeritin ağırlık merkezinin basınç bölgesi en dış life olan dik uzaklığı

$\varepsilon_{ci}$ : Basınç bölgesinde herhangi bir noktadaki şekil değiştirme

$\varepsilon_{cj}$ : Çekme bölgesinde herhangi bir noktadaki şekil değiştirme

Eğilme öncesi düzlem olan kesitler eğilmeden sonra da düzlem kalacağı varsayımından dolayı ECC, normal beton ve FRP donatı için kesitin herhangi bir noktasındaki birim deformasyon, Şekil 3.23'te birim deformasyon dağılımından tarafsız eksen konumuna bağlı olarak Denklem (3.6) ile ifade edilmektedir.

$$\varepsilon_{ci} = \varepsilon_{cu} \frac{c-x_{ci}}{c} , \quad \varepsilon_{cj} = \varepsilon_{cu} \frac{x_{cj}-c}{c} , \quad \varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{d-c}{c} , \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)'dan elde edilen birim deformasyon değerleri kullanılarak, ECC ile normal beton için her bir şeritin ağırlık merkezinde oluşan gerilme değerleri ile FRP donatı gerilme değeri, kabul edilen ilgili malzeme gerilme-birim deformasyon modelinden hesaplanmaktadır.

Analiz yöntemi farklı düzeyde ECC içeren kirişler için de geçerlidir. Burada ECC betonunun kesitin çekme bölgesinde veya basınç bölgesinde olup olmadığı durumlar dikkate alınarak aynı analiz yöntemi uygulanır.

### 3.2.7. Temel denge denklemleri

Analizde öncelikle tarafsız eksen konumu ( $c$ ) için bir tahmin yapılır. Böylece kesitte geometrik özellikler, birim deformasyonlar ve gerilmeler hesaplanabilmektedir. Tahmin edilen tarafsız eksen ile kuvvet denge denklemi (Denklem 3.7) kontrol edilir. Kuvvet denge denkleminde elde edilen değerlerin belirli bir yakınsama değerini ( $\chi < 0.01$ ) sağlaması beklenir. Sağlanmadığı durumda tarafsız eksen konumu değiştirilir ve işlemler tekrarlanır. Yakınsama kriteri sağlanana kadar iterasyona devam edilir.

$$N = \sum_{i=1}^n A_{ci} \sigma_{ci} - \sum_{j=1}^k A_{cj} \sigma_{cj} - A_f \sigma_f = 0 \quad (3.7)$$

Kuvvet denge denklemini sağlayan tarafsız eksen konumu (c) iterasyon sonucunda belirlendikten sonra Denklem (3.8) ile kesit ağırlık merkezine göre moment alınarak kiriş kesit taşıma gücü momenti elde edilir.

$$M = \sum_{i=1}^n A_{ci} \sigma_{ci} \left( \frac{h}{2} - x_{ci} \right) - \sum_{j=1}^k A_{cj} \sigma_{cj} \left( \frac{h}{2} - x_{cj} \right) + A_f \sigma_f \left( \frac{h}{2} - d' \right) \quad (3.8)$$

### 3.2.8. Deplasman Hesabı

Kirişlerin eğilme altındaki davranışının teorik olarak tayini için, farklı modeller kullanılarak kirişlerin yük-deplasman eğrileri elde edilebilmektedir. Sunulan çalışma kapsamında, ACI 440.1R-15 Yönergesinde yer alan deplasman hesabı ile birlikte Sinüs Eğrisi Yöntemi ile de deplasman hesabı yapılarak, her iki model sonucu elde edilen yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırması yapılmıştır.

ACI 440.1R-15 Yönergesinde ve Goldston (2016) çalışmalarında yer alan deplasman hesabı işlemlerinden faydalanılarak FRP donatılı kirişlerde meydana gelen deplasmanlar hesaplanmıştır. Kirişlerde oluşacak deplasmanların hesabı için kullanılan ilgili hesap adımları aşağıda aşama verilmiş olup, ayrıca ilerleyen bölümlerde Sinüs Eğrisi Yönteminin uygulaması ayrıntılı olarak sunulmuştur.

ECC içeren kirişlerde çatlama momentinin hesabı için, Şekil 3.22’de yer alan çatlama durumu birim deformasyon ve gerilme dağılımına göre denge denklemleri oluşturularak çatlama momenti hesabı yapılmıştır. Söz konusu çatlama momentini oluşturan teorik çatlama yükünün deneysel çatlama yükü ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Denklem (3.9)’da FRP donatılı normal beton içeren kirişte oluşan çatlama momenti ( $M_{cr}$ ), tanımlanmıştır.

$$M_{cr} = \frac{0.62 \lambda \sqrt{f'_c} I_g}{y_t} \quad (\text{ACI 440.1R-15}) \quad (3.9)$$

‘ $I_g$ ’, brüt atalet momentini ifade etmekte olup Denklem (3.10) ile hesaplanmaktadır.

$$I_g = \frac{bh^3}{12} \quad (3.10)$$

Kirişte ilk çatlağı oluşturan kırılma yükünün ( $P_{cr}$ ) hesabı Denklem (3.11) ile yapılmakta olup bu değer hesaplanan çatlama momentine karşılık gelen kırılma yükünü temsil etmektedir. İlk çatlak oluşumu esnasında kirişte oluşan deplasman dört nokta yüklemesi için Denklem (3.12) ile hesaplanabilmektedir.

$$P_{cr} = \frac{5M_{cr}}{L} \quad (3.11)$$

$$\Delta_{cr} = \frac{P_{cr}\alpha(3L^2 - 4\alpha^2)}{48E_c I_g} \quad (3.12)$$

Kirişte ilk çatlak oluşumu sonrası, çeşitli seviyelerde kirişte oluşan yüke karşılık gelen deplasmanların hesabı için ACI 440.1R-15 Yönergesindeki esaslar baz alınarak işlem adımları ilerlemektedir. İlk çatlak sonrası deplasmanların tayini için gerekli olan çatlamış kesit atalet momentinin hesabında kullanılan ifadelerden, öncelikli olarak donatıların elastisite modülünün betonun elastisite modülüne oranını temsil eden ' $n_f$ ' ifadesi Denklem (3.13) ile hesaplanmaktadır.

$$n_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{E_f}{4700\sqrt{f'_c}} \quad (3.13)$$

Çatlamış kesit atalet momentinin hesabı içerisinde yer alan, tarafsız eksen derinliğinin donatı derinliğine oranı olan ' $k$ ' ifadesi Denklem (3.14)'da belirtilen formül ile hesaplanmaktadır.

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f \quad (3.14)$$

Denklem (3.13) ve Denklem (3.14) kullanılarak söz konusu çatlamış kesit atalet momentini Denklem (3.15) yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$I_{cr} = \frac{bd^3}{3}k^3 + n_f A_f d^2 (1 - k)^2 \quad (3.15)$$

İlk çatlama yükünden sonra oluşan yük değerlerine karşılık gelen deplasmanların elde edilebilmesi için kullanılan etkin atalet momentinin hesabı için literatürde önerilmiş olan birçok yaklaşım mevcuttur. Sunulan çalışma kapsamında, etkin atalet momentinin ( $I_e$ ) hesabı için Maranan ve diğerleri (2019) tarafından yapılan çalışmadan faydalanılmış olup ( $I_e$ ) Denklem (3.16) yardımı ile hesaplanabilmektedir.

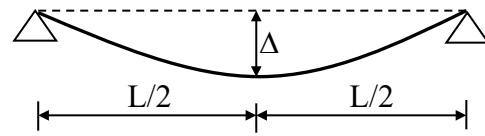
$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2 \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right)} \quad (3.16)$$

Etkin atalet momentinin hesaplanması sonrası kirişte oluşan deplasman değerleri dört nokta yüklemesi için Denklem (3.17)'de verilen ifade ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta = \frac{P\alpha(3L^2 - 4\alpha^2)}{48E_c I_e} \quad (3.17)$$

### 3.2.8.1. Sinüs Eğrisi Yöntemi ile Kiriş Yük -Deplasman Eğrisinin Tayini

Dört nokta yüklemesinde kirişte meydana gelen deplasman eğrisinin Sinüs eğrisine benzediği kabulü ile kirişte oluşan deplasmanın belirlenmesine yönelik olan yöntem aşağıda sunulmuştur (Rangan, 1990). Dört nokta yüklemesi altında eğilmiş betonarme kiriş Şekil 3.24'te görülmektedir.



Şekil 3.24. Eğilmiş betonarme kiriş

Basit mesnetli eğilmiş bir betonarme kirişin deplasman eğrisi denklemi Sinüs fonksiyonu ile tanımlanacak olursa;

$$u(x) = \Delta \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (3.18)$$

şeklinde ifade edilir.

Burada  $\Delta$  kiriş orta noktası maksimum deplasmanını,  $L$  ise kirişin etkili boyunu ifade etmektedir. Denklemin iki kez türevi alınarak eğrilik ( $\psi$ ) elde edilir.

$$\psi = \frac{d^2 u}{dx^2} = \frac{\pi^2}{L^2} \Delta \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad (3.19)$$

Kirişte oluşan eğrilik birim deformasyon dağılımından (Şekil 3.23),

$$\psi = \frac{\varepsilon_c}{c} \quad (3.20)$$

olarak ifade edilir. Burada  $\varepsilon_c$  betonun basınç bölgesinde en dış lif için seçilen birim deformasyon değerini temsil etmektedir. Seçilen birim deformasyon sıfır ile  $\varepsilon_{cu}$  değeri arasındadır.

Denklem (3.19)'da  $x=L/2$  alınarak kiriş orta noktası deplasmanı;

$$\Delta = \psi \frac{L^2}{\pi^2} \quad (3.21)$$

olarak ifade edilir.

Kesitte en dış lif için seçilen birim deformasyon değerine karşılık analiz temel denge denklemleri yardımı ile kiriş momenti ( $M$ ) ve karşılık gelen yük ( $P$ ) belirlenmektedir. Kesitte oluşan eğrilik ve deplasman değeri Denklem (3.20) ve Denklem (3.21) yardımıyla hesaplanarak seçilen birim deformasyona karşılık gelen yük ve deplasman değerleri elde edilmiş olmaktadır. Bu şekilde farklı birim deformasyon değerleri için yük ve deplasmanlar belirlenerek kirişin teorik yük-deplasman eğrisi elde edilmektedir.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, yapılan çalışma kapsamında test edilen kirişlerin eğilme davranışı incelenmiştir. Test edilen kirişlere ait deneysel taşıma gücü ve yük-deplasman sonuçları yapılan analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

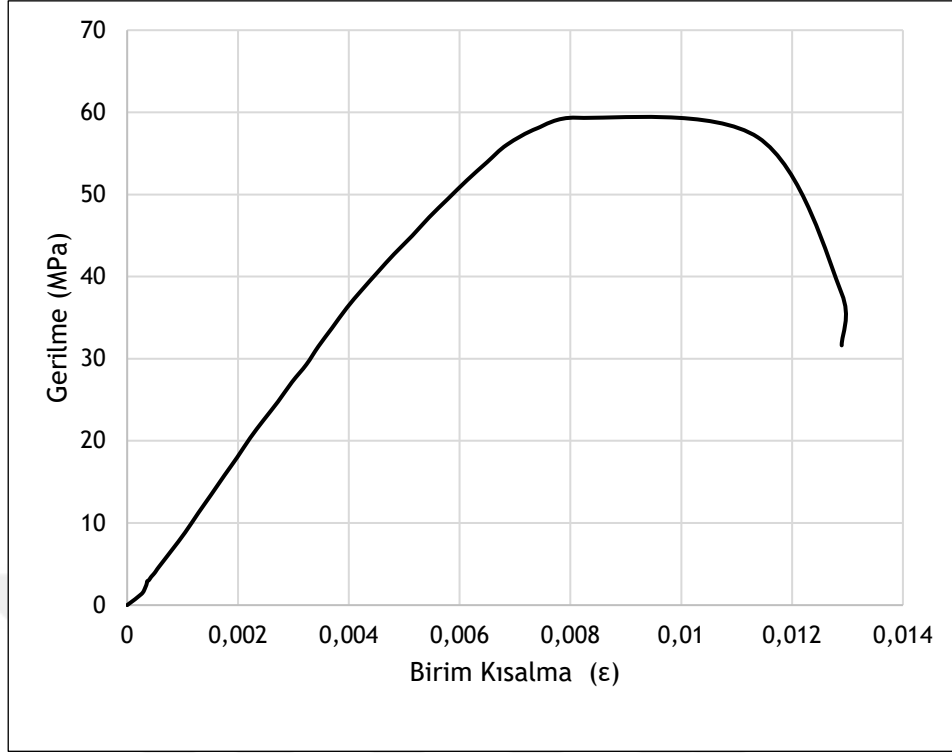
### 4.1. Deney Bulguları

#### 4.1.1. Silindir Numune Deneyleri

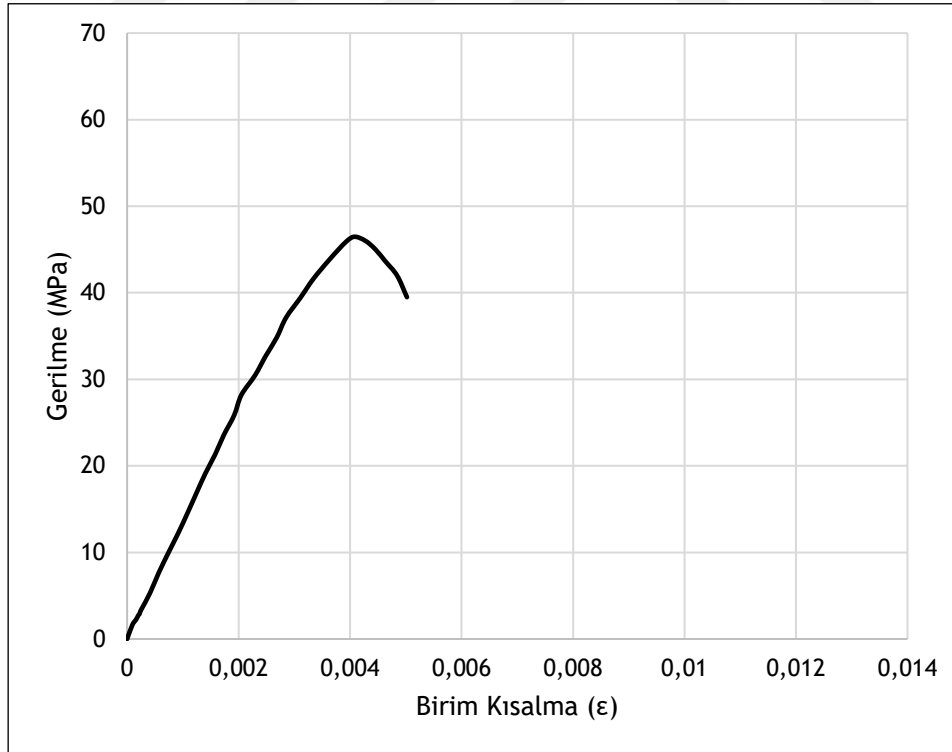
ECC ve normal betonun basınç dayanımlarının tespiti için kiriş numunelerin beton dökümü sırasında alınan silindir numuneler tek eksenli basınç altında test edilmiştir. Uygulanan eksenel basınç testinde silindir numunelerde oluşan kısalmaların tespiti için dijital komparatör saat kullanılmıştır. Uygulanan yük ve buna karşılık gelen kısalma okumaları sonucu elde edilen verilerle normal betonun ve ECC'nin gerilme-birim deformasyon eğrileri oluşturulmuştur. Kirişlerin üretimi sırasında her bir karışımdan alınan üçer adet standart silindir numune üzerinde yapılan basınç deneyi sonrası elde edilen ortalama dayanım değerleri Tablo 4.1'de, örnek olması açısından (ECCB-2, ECCB-3 kirişi) ECC ve normal beton numunelere ait gerilme-birim kısalma eğrileri Şekil 4.1'de sunulmuştur.

**Tablo 4.1.** Beton basınç dayanımları

| Kiriş İsmi | Normal Beton, $f'_c$ (MPa) | ECC, $f'_c$ (MPa) |
|------------|----------------------------|-------------------|
| RCB-1      | 45.95                      |                   |
| CB-1       | 48.86                      |                   |
| ECCB-1     | 48.54                      | 61.95             |
| ECCB-2     | 44.31                      | 57.48             |
| ECCB-3     | 44.31                      | 57.48             |
| ECCB-4     |                            | 61.95             |



(a) ECCB-2 ve ECCB-3 kirişi ECC



(b) ECCB-2 ve ECCB-3 kirişi normal beton

**Şekil 4.1.** (a) ECCB-2 ve ECC-3 kirişi ECC, (b) ECCB-2 ve ECC-3 kirişi normal beton silindir numunelere ait gerilme-birim kısılma eğrileri.

Basınç testi sonrası normal beton ve ECC numunelerin davranışları incelendiğinde, maksimum yük sonrası normal beton numunelerinde gevrek kırılma olduğu ve betonda oluşan çatlak bölgelerinde dökülmelerin olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.2(a)). ECC'nin davranışı incelendiğinde ise literatürdeki çalışmalara benzer olarak ECC'nin kademeli şişmesiyle kırılmanın sünek bir şekilde olduğu ve çatlak genişliğinin daha düşük düzeyde olduğu gözlemlenmiştir. Numunelerde herhangi bir kabuk dökülmesi görülmemiştir (Şekil 4.2(b)).



(a)



(b)

**Şekil 4.2.** (a) Normal beton (b) ECC silindir numunelerin basınç deneyi sonrası durumu

#### 4.1.2. Prizma Numune Deneyleri

ECC ve normal betonun eğilmede çekme dayanımlarının tespiti için alınan prizma numuneler dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Eğilme deneyi sonrası elde edilen ortalama dayanım değerleri Tablo 4.2’de sunulmuştur.

**Tablo 4.2.** Eğilme dayanımları

| Kiriş İsmi | Normal Beton, $\sigma_c$ (MPa) | ECC, $\sigma_c$ (MPa) |
|------------|--------------------------------|-----------------------|
| RCB-1      | 4.75                           |                       |
| CB-1       | 4.03                           |                       |
| ECCB-1     | 4.79                           | 7.67                  |
| ECCB-2     | 4.56                           |                       |
| ECCB-3     | 4.56                           |                       |
| ECCB-4     |                                | 7.67                  |

Normal beton ile ECC prizma numunelerin deney sonrası eğilme davranışı incelendiğinde, normal beton numunelerinde kırılma ana çatlağın genişleyip prizma numunenin ortadan ayrılması ile oluşmuştur (Şekil 4.3(a)). ECC numunelerinde ise eğilme bölgesinde daha fazla çatlak yayılımı oluşmuş, ana çatlak bir miktar genişlemiş ancak numunede ortadan ikiye bölünme şeklinde kırılma meydana gelmemiştir (Şekil 4.3(b)).



(a)

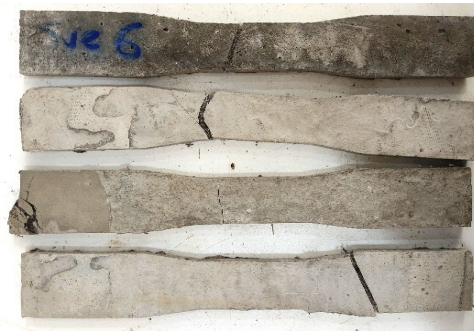


(b)

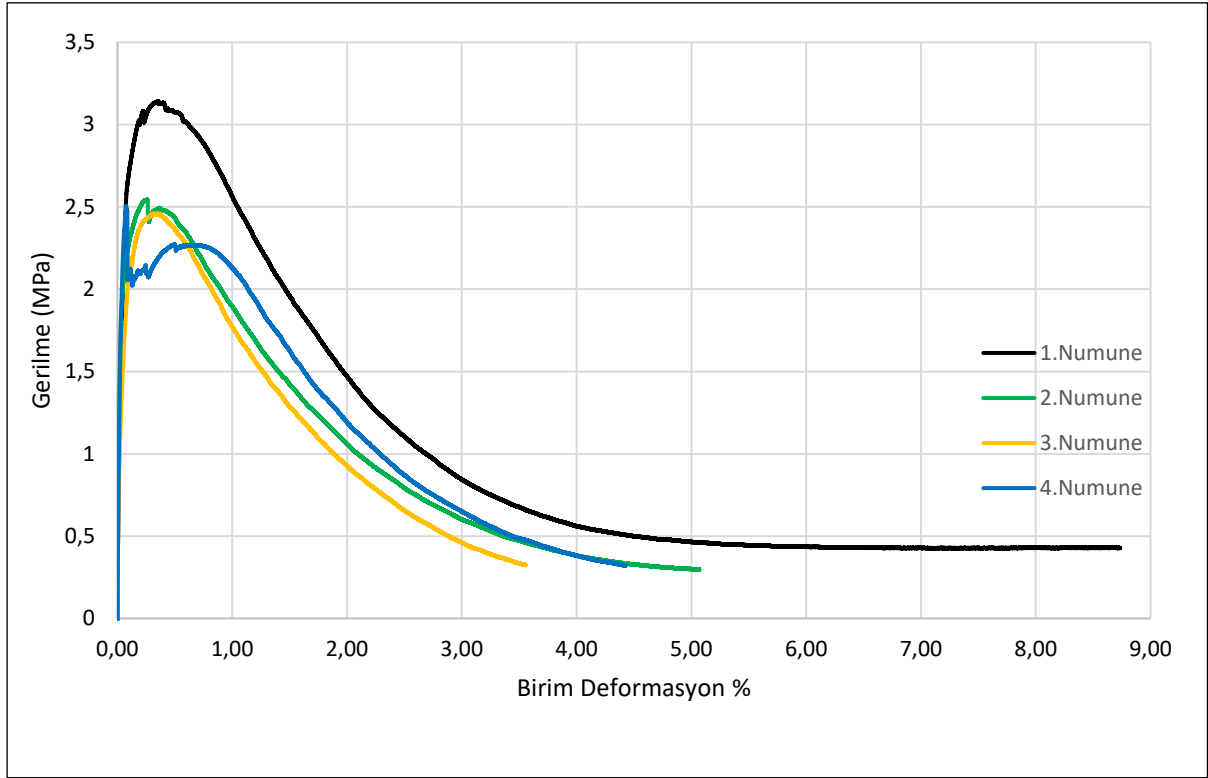
**Şekil 4.3.** Dört nokta eğilme deneyi sonrası (a) normal beton numuneleri ve (b) ECC numuneleri

#### 4.1.3. Eksenel Çekme Deneyi

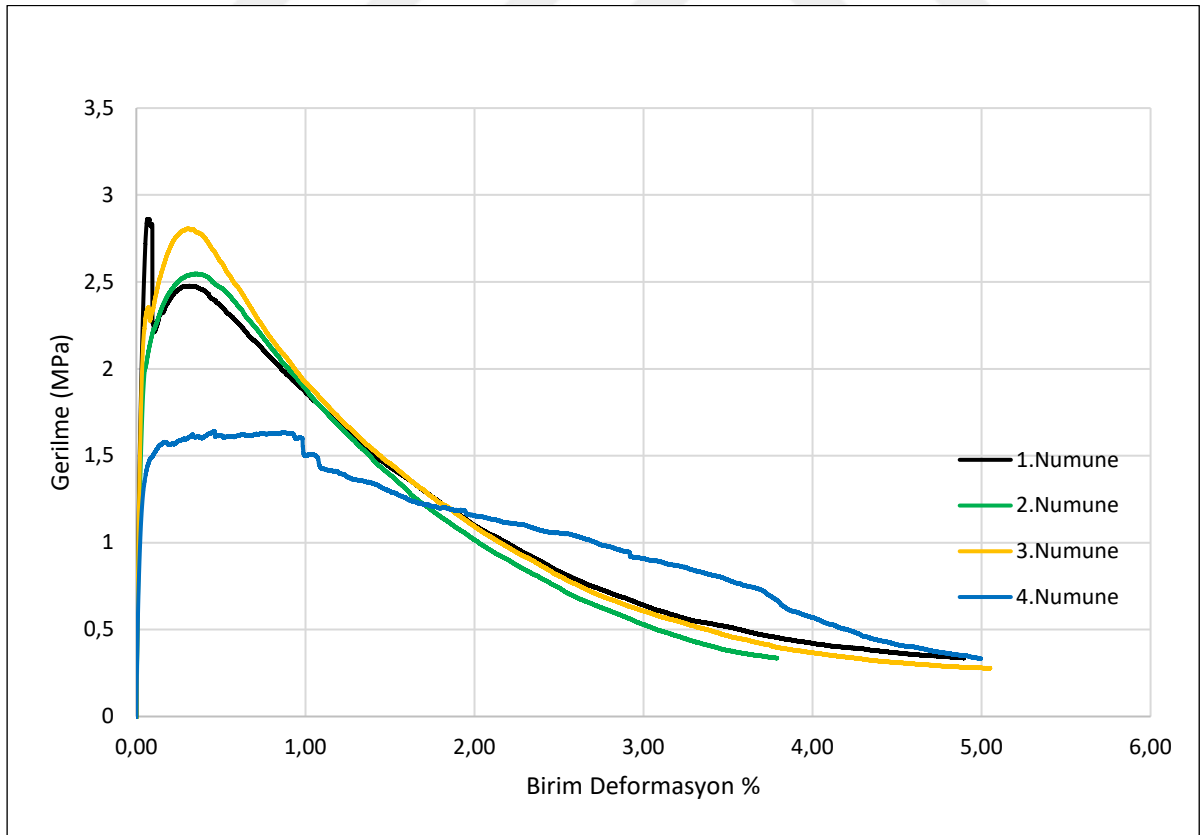
ECC'nin çekme davranışının tayini için her ECC karışımından dörder adet alınan  $330 \times 40 \times 10$  mm boyutlarındaki dog-bone numuneler eksenel çekme deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonucu dog-bone numunelerinin kırılma biçimleri Şekil 4.4'te, gerilme-birim uzama eğrileri Şekil 4.5'te sunulmuştur.



**Şekil 4.4.** Eksenel çekme deneyi sonrası ECCB-2 ve ECCB-3 kirişleri ECC karışımına ait dog-bone numuneler



(a)



(b)

**Şekil 4.5.** (a) ECCB-1 ve ECCB-4 kirişleri ECC karışımına ait (b) ECCB-2 ve ECCB-3 kirişleri ECC karışımına ait dog-bone numunelerin eksenel çekme deneyi sonrası gerilme–birim uzama eğrileri

Grafikler incelendiğinde, ECCB-1, ECCB-2, ECCB-3 ve ECCB-4 kirişi üretiminde kullanılan ECC'nin ortalama kopma dayanımının yaklaşık 2.2 MPa olduğu ortalama maksimum çekme birim şekil değiştirmesinin ise %1'e ulaştığı görülmüştür. Şekilden de görüldüğü üzere yaklaşık %1 olan maksimum çekme birim şekil değiştirmesi değeri geleneksel betona göre çok yüksek elde edilmiştir.

Sunulan çalışmada, ECC prizma numunelerden elden edilen çekme dayanımı ile dog-bone numunelerden elde edilen eksenel çekme dayanımı arasında ilk çatlama durumu için yaklaşık olarak 3.81 kat, kopma durumu için ise yaklaşık 3.46 kat bir oran olduğu görülmektedir.

#### **4.1.4. Kiriş Numune Deneyleri**

ECC içeren FRP donatılı kirişlerin eğilme davranışının incelenmesi üzerine yapılan çalışma kapsamında 150×200×1750 mm ölçülerinde 6 adet kiriş üretimi yapılmıştır. Farklı matris türüne (normal beton, ECC) ve farklı donatı türüne (standart çelik, GFRP) sahip kirişler dört nokta eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Kiriş numunelerin testinde gözlenen yapısal davranışlara aşağıda yer verilmiştir.

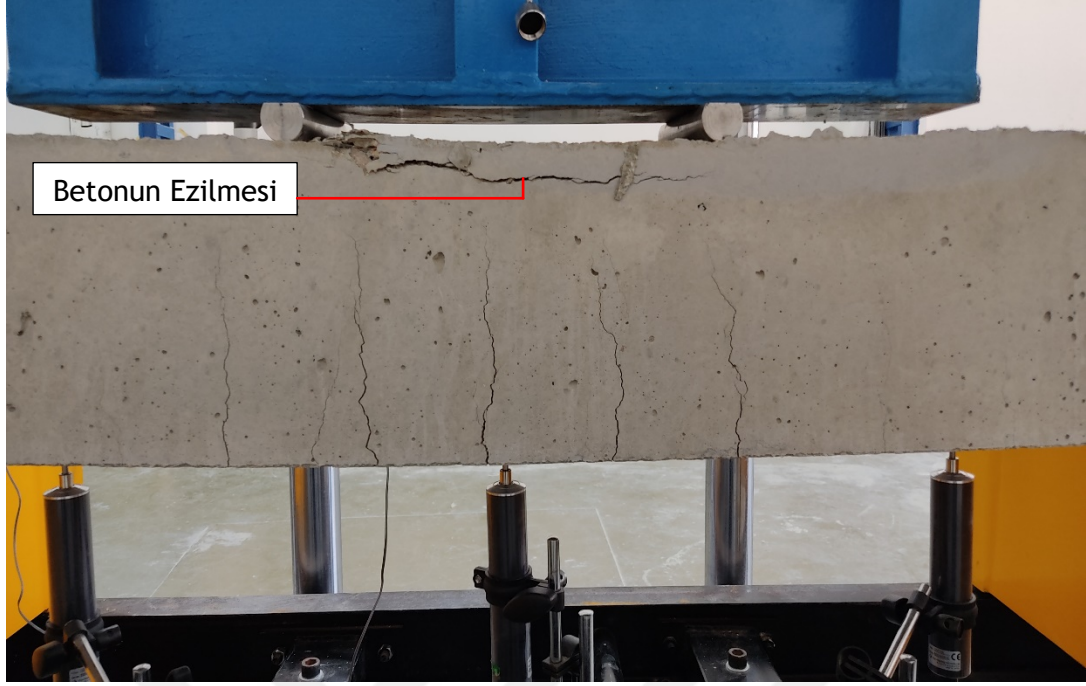
##### **4.1.4.1. RCB-1 Kiriş Numunesi**

RCB-1 kirişi dört nokta yükleme eğilme deneyinde, ilk çatlağın uygulanan iki yük arası eğilme bölgesinde 12.58 kN yük değerinde ve kılcal düzeyde olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.6). Deneyde 20 kN yük değerine ulaşılan kadar yeni çatlak oluşmamış ancak ilk çatlak boyunca yukarı doğru ilerleme gözlemlenmiştir. Kiriş taşıma gücünün yaklaşık %35'ine ulaşıldığı andan itibaren (28.10 kN) artan yükler ile birlikte kılcal düzeyde yeni eğilme çatlaklarının oluştuğu tespit edilmiştir. Bu aşamadan sonra 49.07 kN yük değerine ulaşılan kadar kılcal düzeyde yeni eğilme çatlaklarının meydana geldiği ve mevcut kılcal çatlakların bazılarının yukarı basınç bölgesine doğru uzadığı gözlenmiştir (Şekil 4.6). Kiriş taşıma gücünün yaklaşık %65'ine ulaşıldığı aşamada (52.48 kN) uygulanan yük ile mesnet aralığında eğilme çatlaklarının oluşumu gözlemlenmiştir. Kiriş testinde yaklaşık olarak 80 kN yük seviyelerine ulaşıldığında

İlk Çatlak

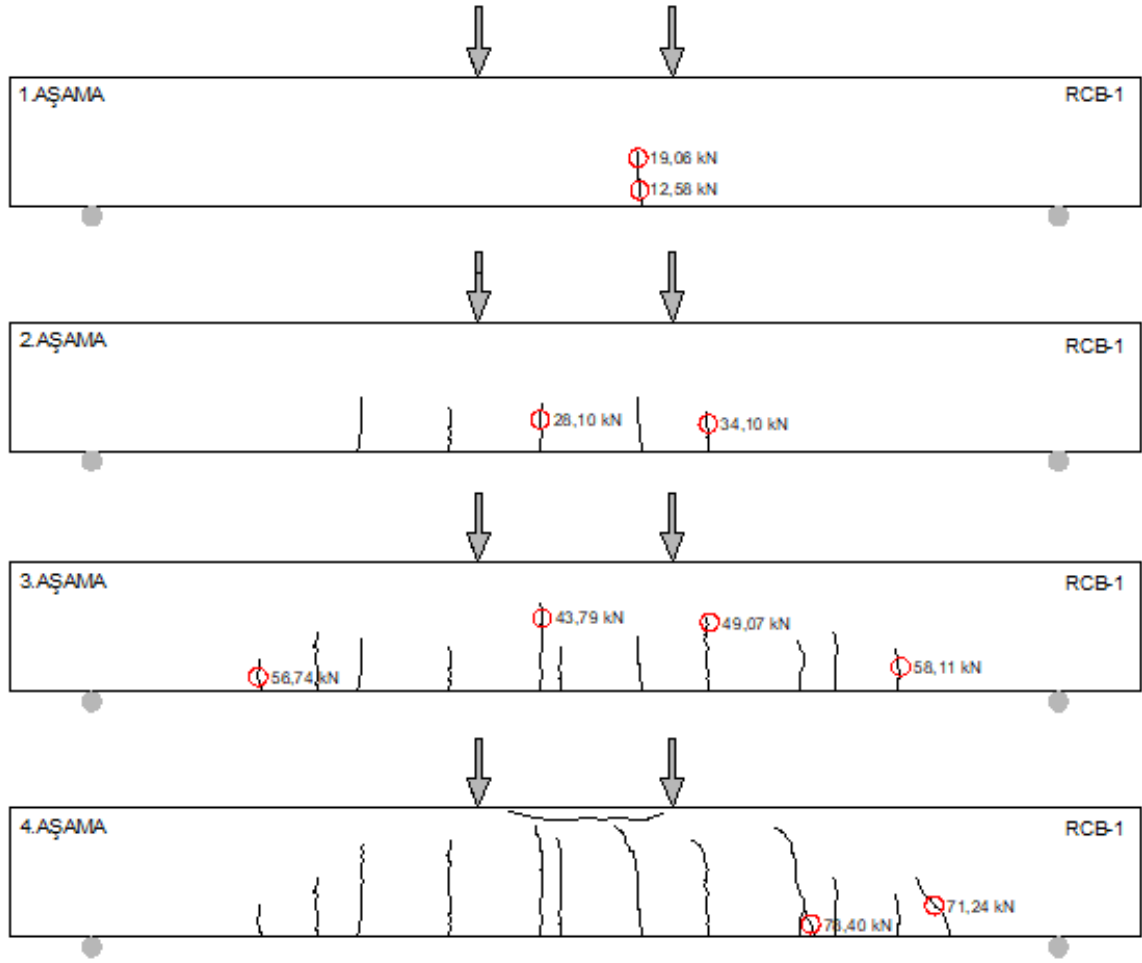
Kesme Çatlağı

53



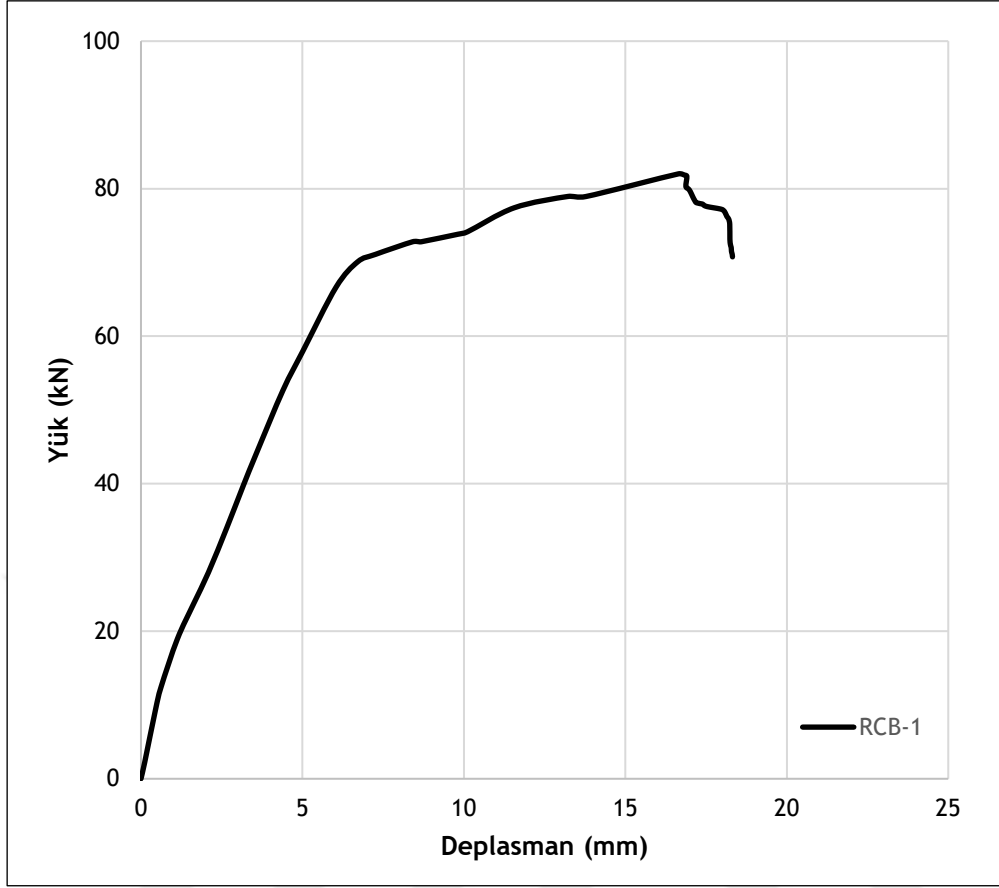
**Şekil 4.7.** RCB-1 kirişi çatlak gelişimi (diğer yüz)

RCB-1 kirişinde yükleme boyunca oluşan çatlak gelişimi, şematik olarak Şekil 4.8’de sunulmuştur.



**Şekil 4.8.** RCB-1 kirişi çatlak gelişimi şematik görünümü

Deney sırasında zamana bağlı olarak veri toplama sistemine kaydedilen yük ve deplasman değerleri ile elde edilen RCB-1 kirişine ait yük-deplasman eğrisi Şekil 4.9’da sunulmuştur. Yük artışı ile deplasmanlarda da artış gözlenmiş olup kiriş orta noktasında 18.32 mm deplasman değerine ulaşmıştır.

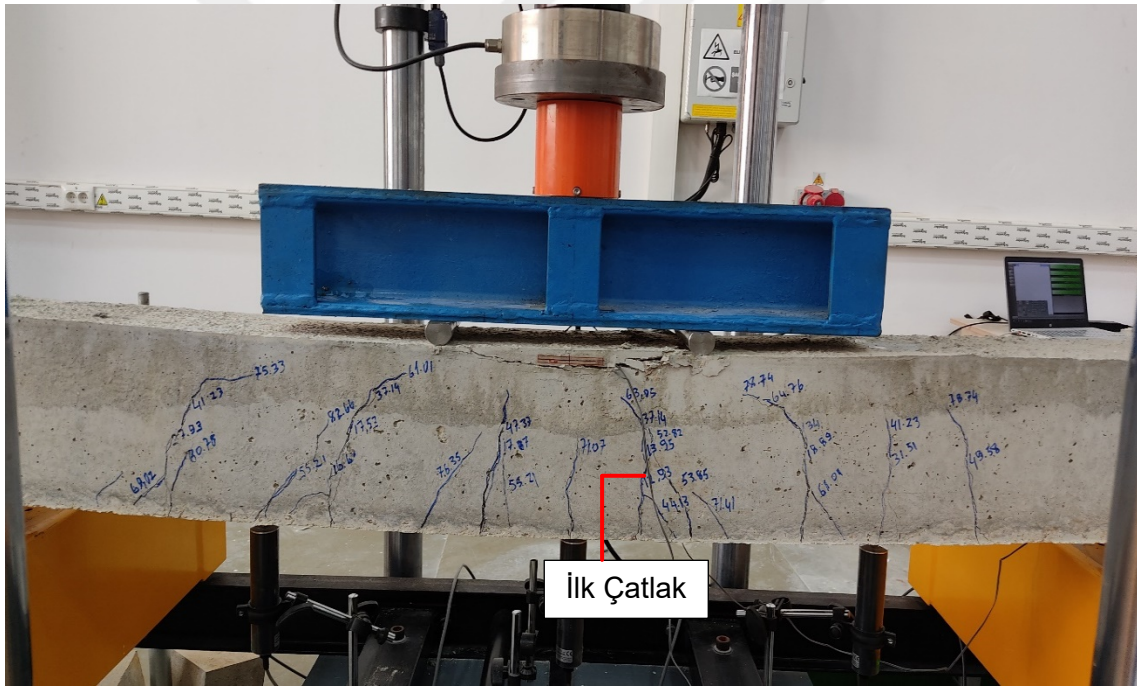


Şekil 4.9. RCB-1 kirişine ait yük-deplasman eğrisi

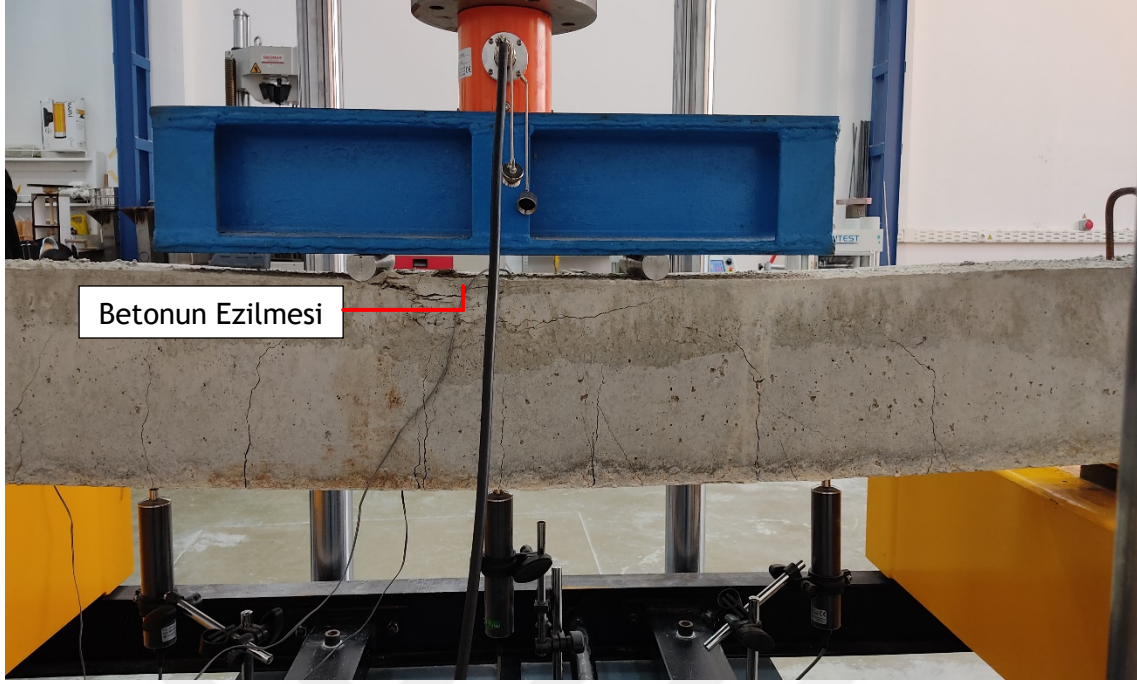
#### 4.1.4.2. CB-1 Kiriş Numunesi

CB-1 kirişi dört nokta yükleme eğilme deneyinde, ilk çatlağın uygulanan iki yük arası eğilme bölgesinde 12.93 kN yük değerinde ve kılcal düzeyde olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.10). Kiriş taşıma gücünün yaklaşık %20'sine ulaşıldığı aşamada (18.89 kN) yeni eğilme çatlaklarının meydana geldiği tespit edilmiş, henüz kesme çatlağı görülmemiştir. Bu aşamada çatlaklar hala kılcal düzeyde olup sadece ilk oluşan çatlaklarda az miktarda genişleme gözlemlenmiştir. Artan yükler ile birlikte kiriş taşıma gücünün yaklaşık %30'u seviyelerinde (26.50 kN) çatlak oluşumunun devam ettiği izlenmiş, ancak kesme çatlağına rastlanmamıştır. İlerleyen aşamada kirişin 37.14 kN yük değerine ulaşılana kadar eğilme çatlaklarının genişlemeye devam ettiği ve mevcut çatlakların basınç bölgesine doğru ilerlediği gözlenmiştir. Bu aşamadan sonra yeni çatlak oluşumu ile beraber mevcut eğilme çatlaklarının benzer şekilde genişlediği görülmüştür. Çatlak boylarının yukarı doğru ilerlemesi de devam etmiştir. 44.13 kN yük değerinde mevcut çatlakta ilk kola ayrılma görülmüştür. Kiriş testinde 64.76 kN yük değerine ulaşıldığı seviyede mevcut eğilme çatlaklarında genişlemenin artarak devam ettiği ve çatlak boylarının yukarı

basınç bölgesine doğru ilerlemesinin sürdüğü, ilave olarak yeni kolların ve çatlakların meydana geldiği görülmüştür. Kiriş taşıma gücünün %83'ü seviyesinde (69.02 kN) yükün uygulama noktasında beton basınçta ezilmeye başlamıştır. Kiriş testinde 71.41 kN yük değerine ulaşıldığı aşamada çatlaklar, eğilme bölgesinde oldukça genişlemiş durumda olduğu belirlenmiştir. Artan yükler ile beraber, mevcut çatlaklarda ilerlemeler ile birlikte yeni eğilme çatlaklarının oluşumu da gözlemlenmiştir. Kirişin 74.65 kN yük değerinde ana çatlak çevresinde dökülmelerin başladığı tespit edilmiş, 76.35 kN yük değerine ulaşıldığı aşamada yükün uygulama noktasında betonda ezilmelerin devam ettiği gözlenmiştir (Şekil 4.11). Yapılan deneyde, 83.17 kN yük değerinde kiriş taşıma gücü kapasitesine ulaşmış deney sonlandırılmıştır. CB-1 kirişinde çatlak yayılım düzeyine bakıldığında kirişin uygun derecede deformasyon yaptığı, eğilmede taşıma gücü kapasitesine ulaştığı görülmüştür. Deney aşamasında kirişte meydana gelen çatlak gelişimi Şekil 4.10'da ve Şekil 4.11'de sunulmuştur.

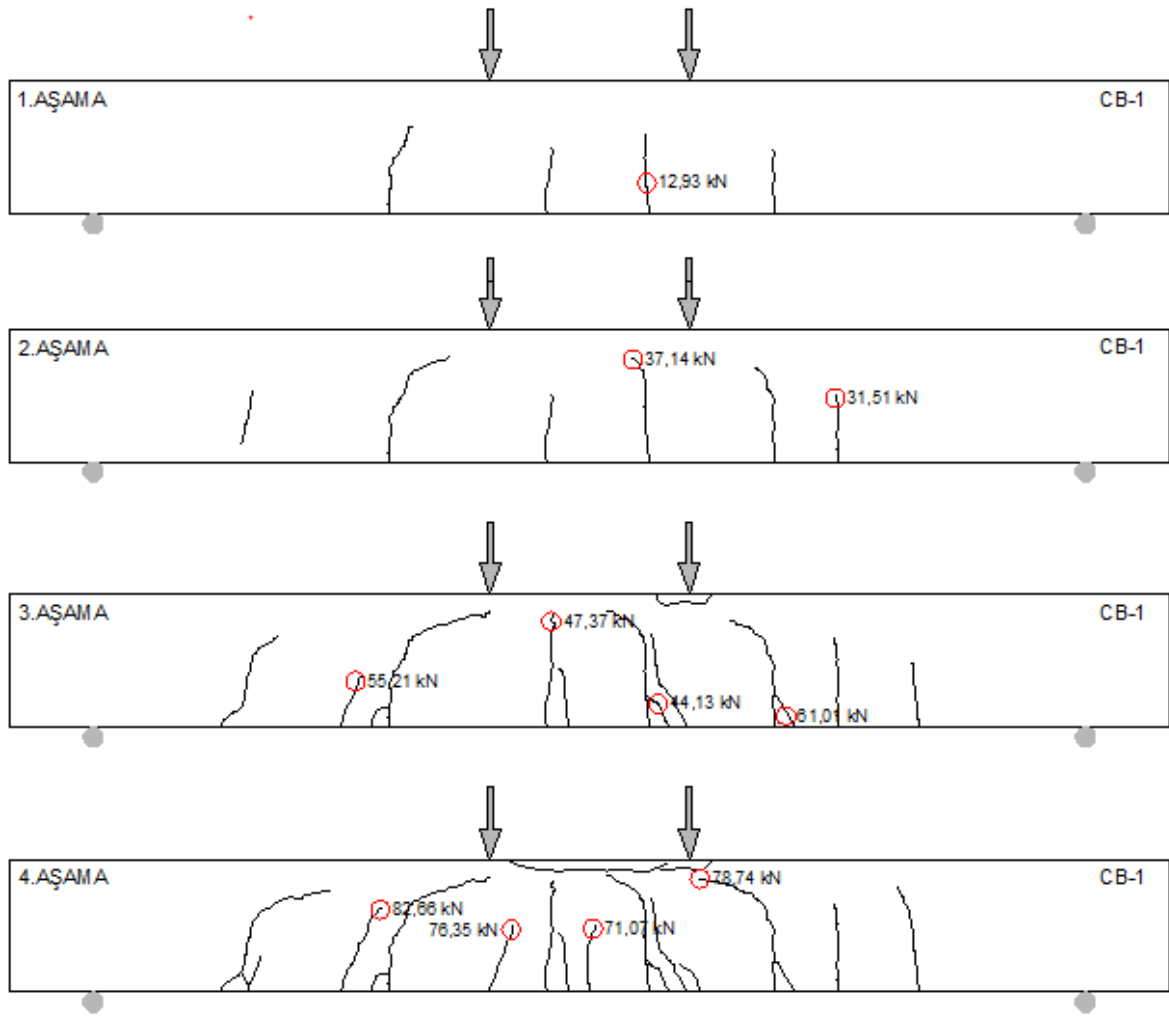


Şekil 4.10. CB-1 kirişi çatlak gelişimi



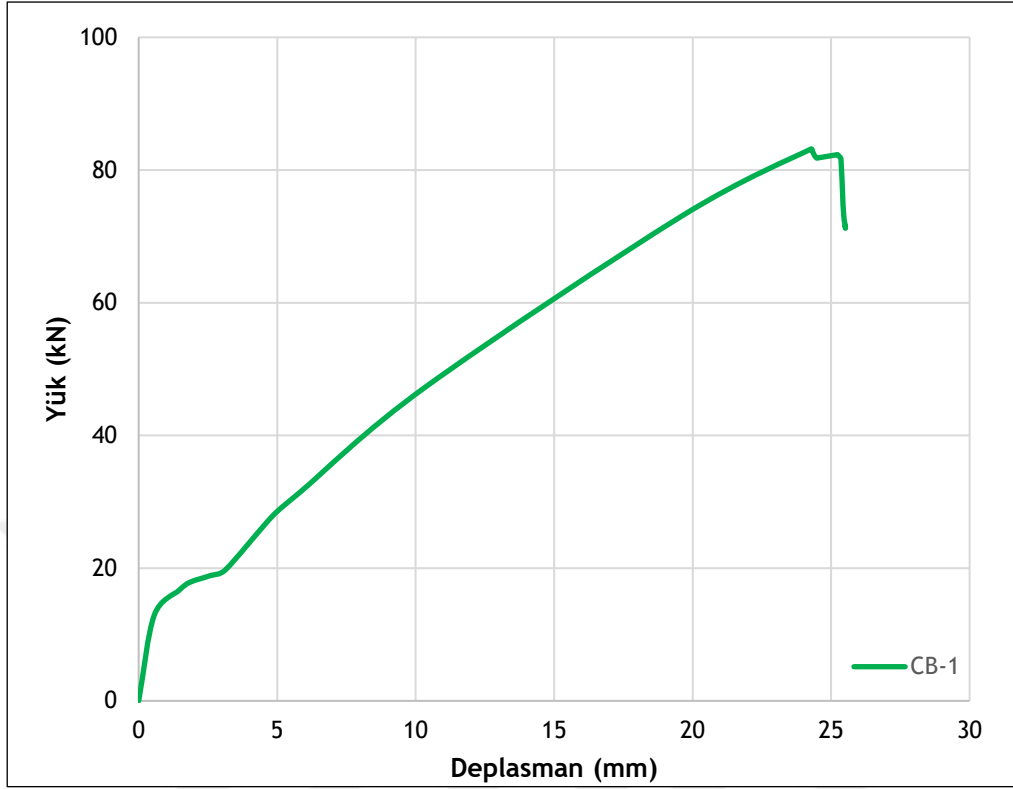
**Şekil 4.11.** CB-1 kirişi çatlak gelişimi (diğer yüz)

CB-1 kirişinde yükleme boyunca oluşan çatlak gelişimi, şematik olarak Şekil 4.12’de sunulmuştur.

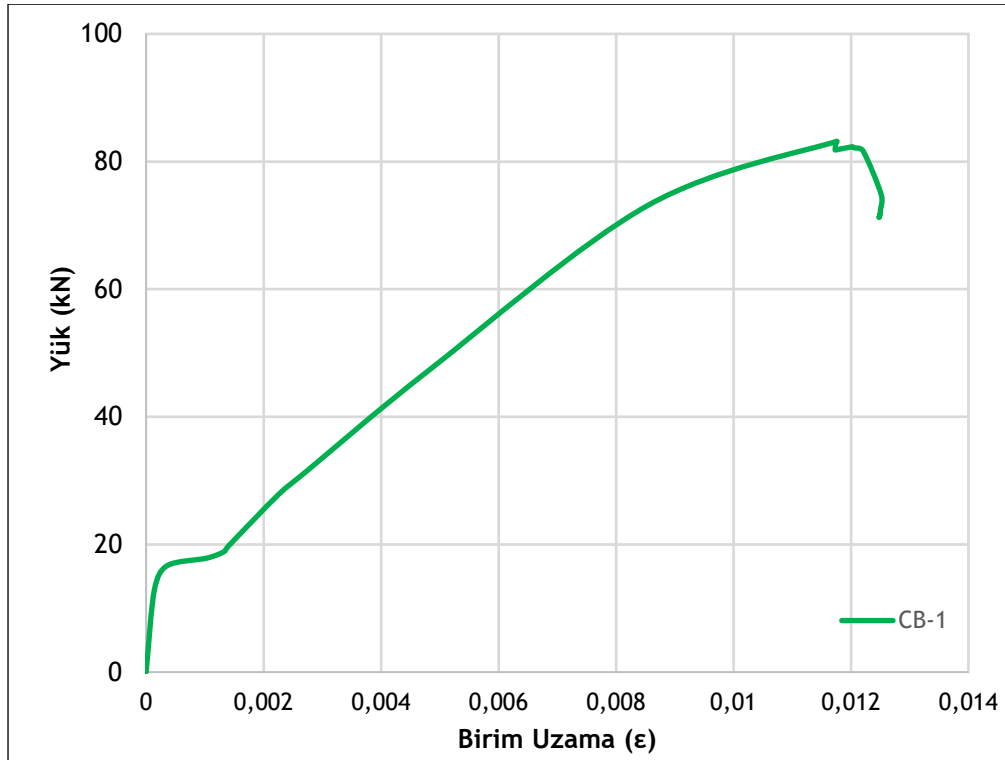


**Şekil 4.12.** CB-1 kirişi çatlak gelişimi şematik görünümü

CB-1 kirişine ait deney sonucu elde edilen yük-deplasman ve yük-birim uzama eğrileri Şekil 4.13'te ve Şekil 4.14'te sunulmuştur. Yük artışı ile deplasmanlarda da artış gözlenmiş olup kiriş orta noktasında 25.52 mm deplasman değerine ulaşmıştır.



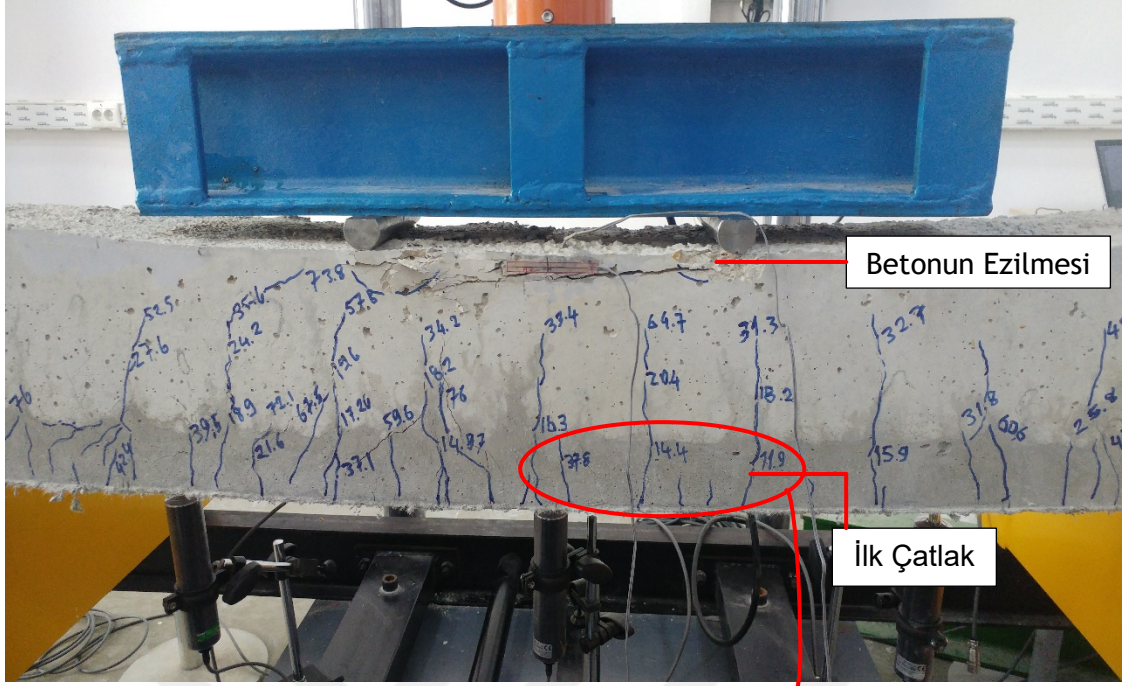
Şekil 4.13. CB-1 kirişine ait yük-deplasman eğrisi



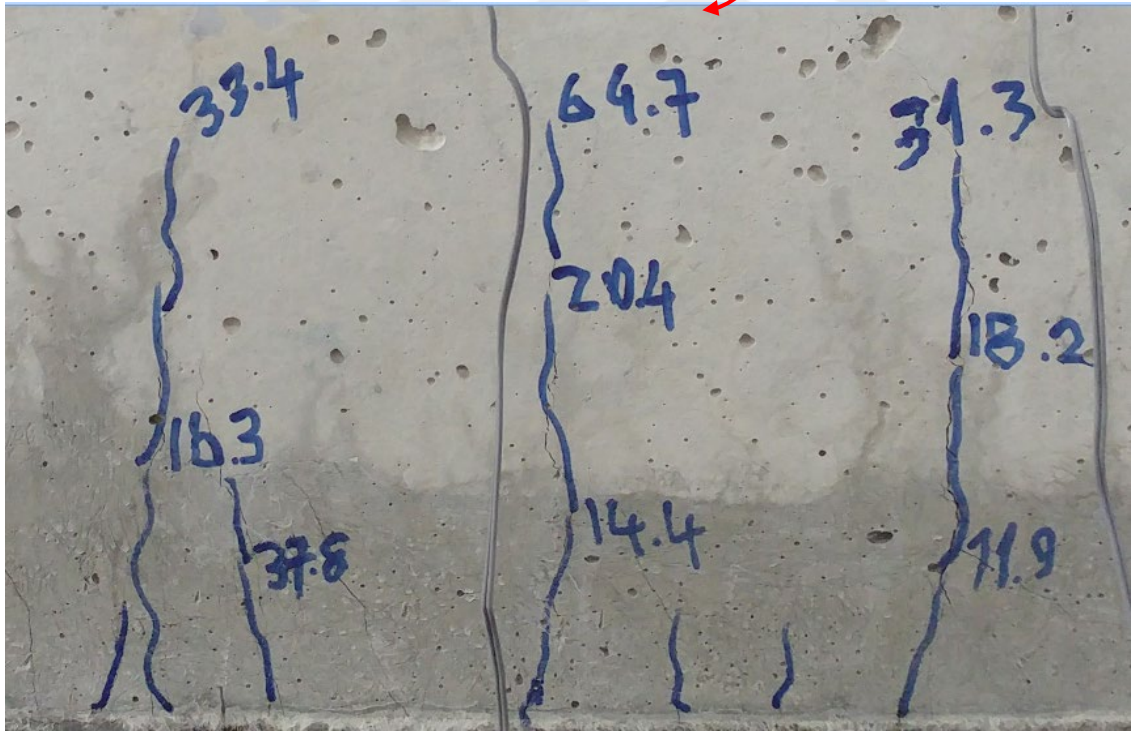
Şekil 4.14. CB-1 kirişine ait donatı yük-birim uzama eğrisi

#### 4.1.4.3. ECCB-1 Kiriş Numunesi

ECCB-1 kiriş dört nokta yüklemesi eğilme deneyinde, ilk çatlağın eğilme bölgesinde uygulanan sağ yük altında 11.90 kN yük değerinde ve kılcal düzeyde olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.15). Artan yükler ile birlikte eğilme bölgesinde yaygın biçimde kılcal çatlak oluşumunun devam ettiği, ilk çatlakların kılcal düzeyde ve gözle görülecek şekilde olduğu tespit edilmiştir. Kiriş taşıma gücünün yaklaşık %30'una ulaşıldığı aşamada (23.54 kN) çatlakların, ana çatlak olarak genişlemeyip yayılmaya devam ettiği gözlenmiştir. Eğilme bölgesinde çok sayıda çatlak görülmüş olup çatlak genişliği kılcal düzeydedir. Literatür çalışmalarında da görüldüğü üzere ECC'nin en önemli özelliği olan çoklu çatlak oluşumu ve sıkı çatlak kontrolü yeteneğinden dolayı, ECC bölgesinde oluşan çatlakların kılcal düzeyde olduğu ve çok sayıda yayılım gösterdiği görülmüştür. Yüklemin artması ile iki yük arası eğilme bölgesinde çok sayıda çatlağın olduğu ve çatlakların hemen hemen tamamının kılcal düzeyde olduğu gözlenmiştir. Kiriş taşıma gücünün yaklaşık %40 seviyelerine ulaşıldığı andan itibaren mevcut çatlak boylarının yukarı basınç bölgesine doğru ilerlediği, kiriş alt uçlarında kollara ayrılmanın meydana geldiği ve eğilme bölgesinde yeni kılcal çatlakların oluşumunun devam ettiği tespit edilmiştir. Kiriş testinde 33.40 kN yük değerinde eğilme bölgesinde çatlakların genişliğinin biraz daha arttığı görülmüştür. Kirişin 47.00 kN yük seviyelerine ulaşıldığında, eğilme bölgesinde çatlak yayılımının devam etmekte olduğu, mesnete yakın bölgelere kadar ilerlediği gözlenmiştir. ECC'nin özelliği olarak, çekme dayanımının normal betona göre yüksek olmasından dolayı ECC malzemenin mekanik özelliği nedeniyle ana çatlak ilerlemesi ve genişlemesi engellenmiş ve çatlak oluşumu yayılma şeklinde gözlenmiştir. ECC ile normal betonun çok iyi düzeyde birlikte çalıştığı çatlakların ilerleyiş şekline anlaşılmaktadır (Şekil 4.15 ). Kirişin 67.50 kN yük değerinde ana çatlaklar çok az genişlerken eğilme bölgesinde kılcal çatlak oluşumunun devam ettiği gözlemlenmiştir. 75.00 kN yük değerinde kiriş taşıma gücünün %90'ı seviyesinde yükün uygulama noktasında basınç bölgesi ezilmesinin başladığı, ilave olarak bu aşamada yeni çatlakların da meydana geldiği tespit edilmiştir (Şekil 4.15). Kiriş numune deneyinde yaklaşık 77.55 kN yük değerinde kiriş taşıma gücü kapasitesine ulaşmıştır. ECCB-1 kirişinde çatlak yayılım düzeyine bakıldığında kirişin iyi derecede deformasyon yaptığı görülmektedir. Deney aşamasında kirişte meydana gelen çatlak gelişimi Şekil 4.15'te ve Şekil 4.16'da sunulmuştur. Şekil 4.16'da yükleme sonrası genişlemiş ana çatlaklar ve kılcal düzeydeki çatlakların detay görüntüsü yer almaktadır. Çatlak genişliklerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir, bu durum ECC'nin özelliğini doğrular niteliktedir.

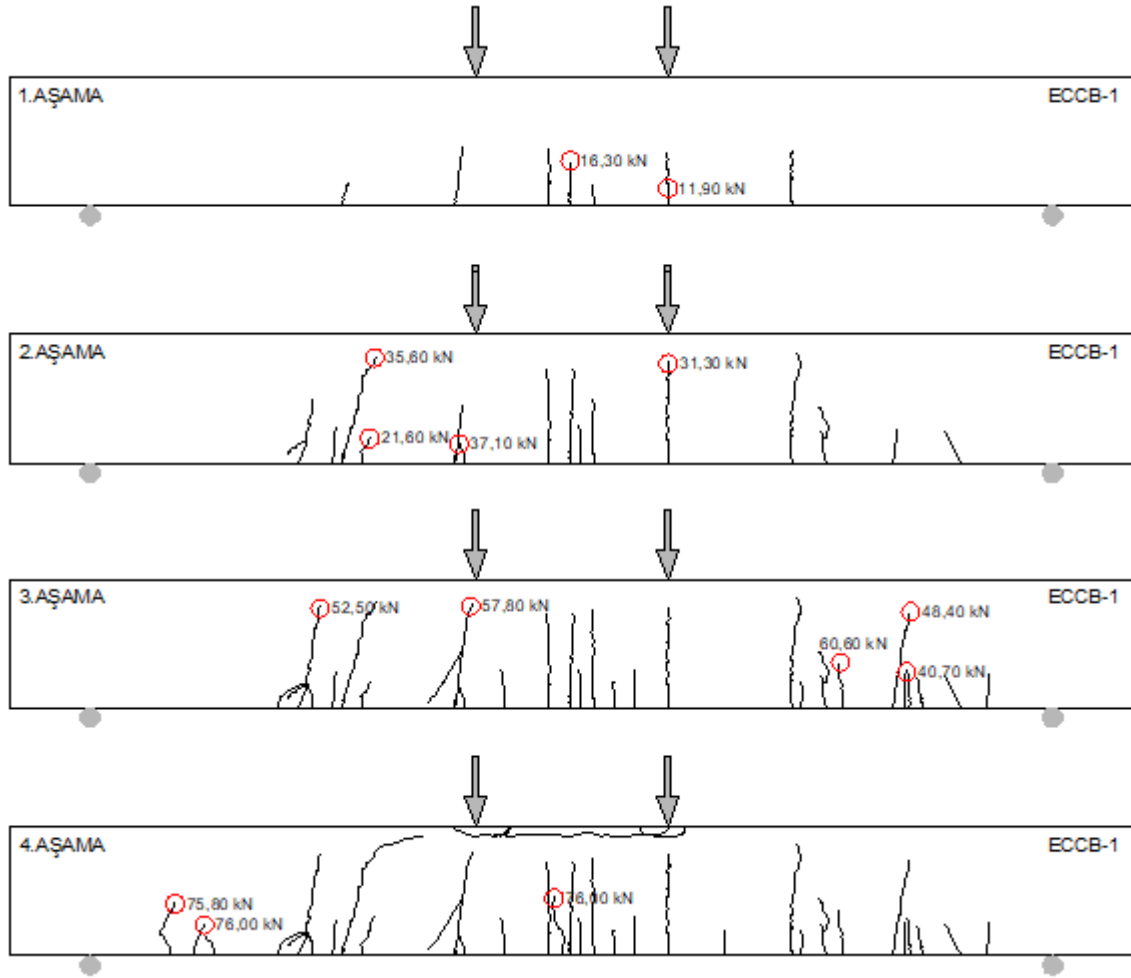


Şekil 4.15. ECCB-1 kirişi çatlak gelişimi



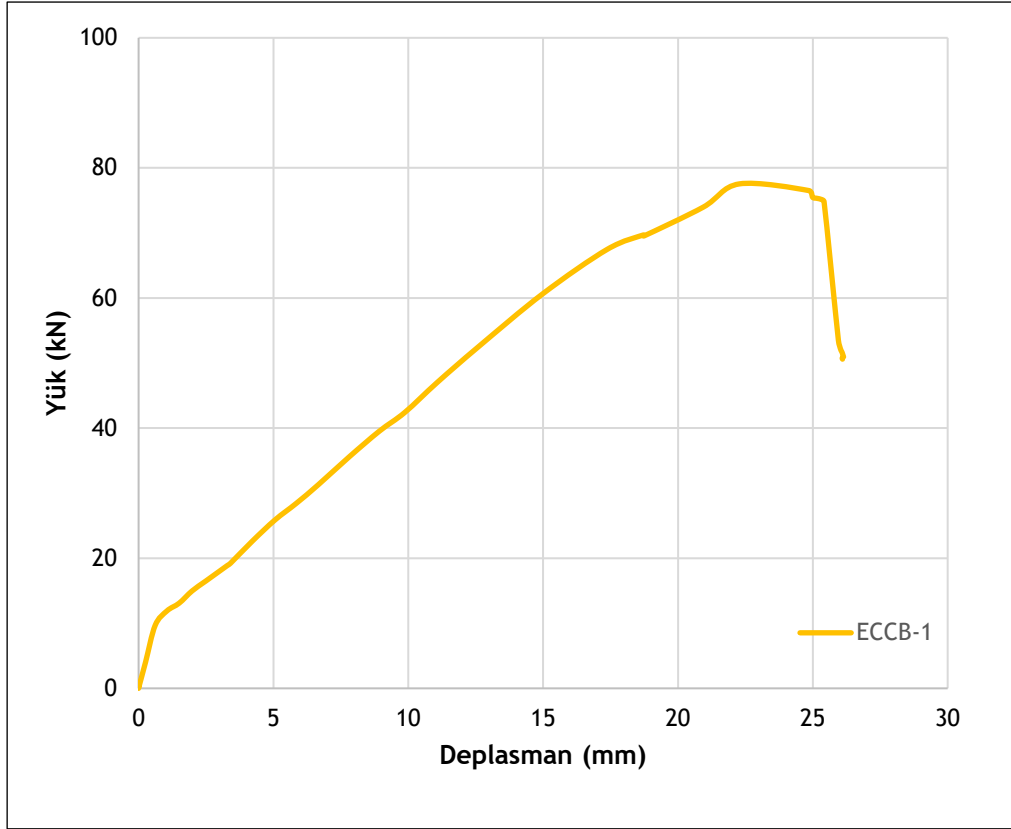
Şekil 4.16. ECCB-1 kirişi çatlak gelişimi detay görünümü

ECCB-1 kirişinde yükleme boyunca oluşan çatlak gelişimi, şematik olarak Şekil 4.17'de sunulmuştur.

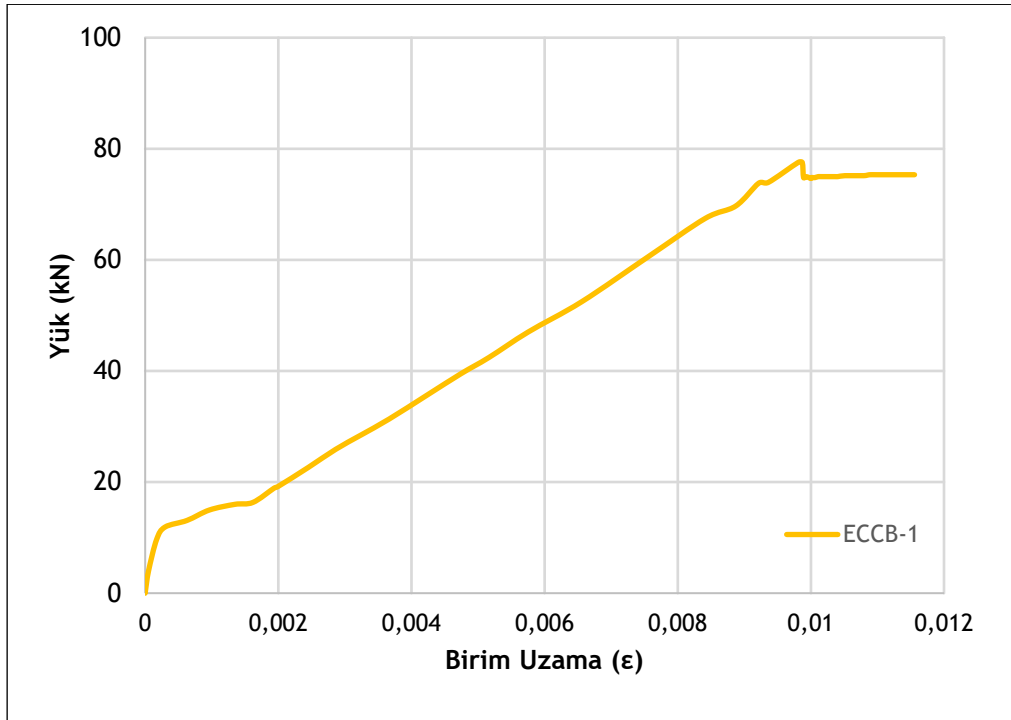


**Şekil 4.17.** ECCB-1 kirişi çatlak gelişimi şematik görünümü

ECCB-1 kirişine ait deney sonucu elde edilen yük-deplasman ve yük–birim uzama eğrileri aşağıda Şekil 4.18’de ve Şekil 4.19’da sunulmuştur. Yük artışı ile deplasmanlarda da artış gözlenmiş olup kiriş orta noktasında 26.14 mm deplasman değerine ulaşılmıştır.



Şekil 4.18. ECCB-1 kirişine ait yük-deplasman eğrisi



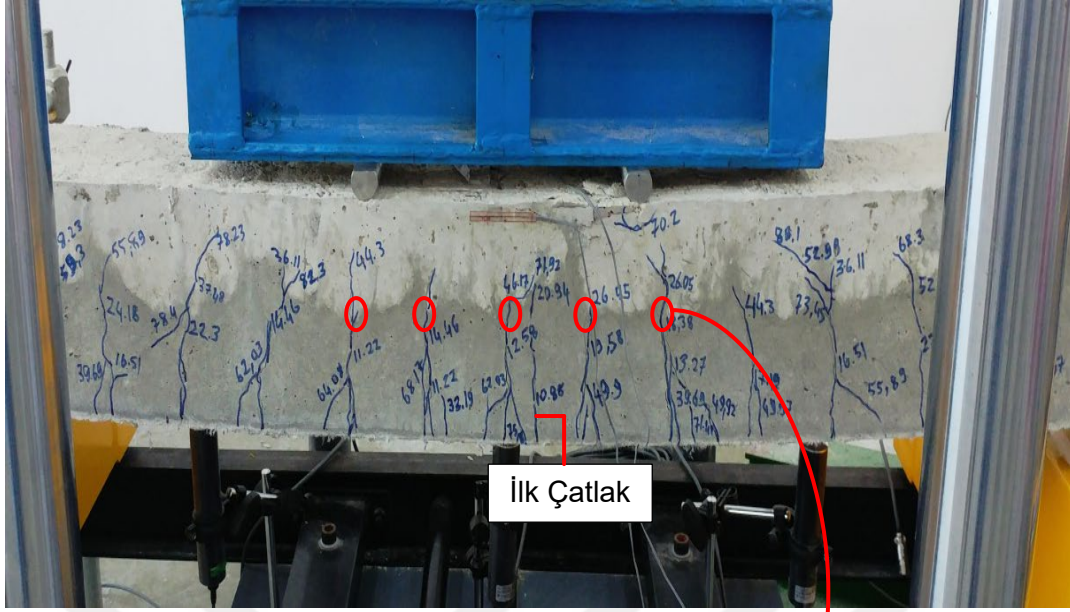
Şekil 4.19. ECCB-1 kirişine ait donatı yük- birim uzama eğrisi

#### 4.1.4.4. ECCB-2 Kiriş Numunesi

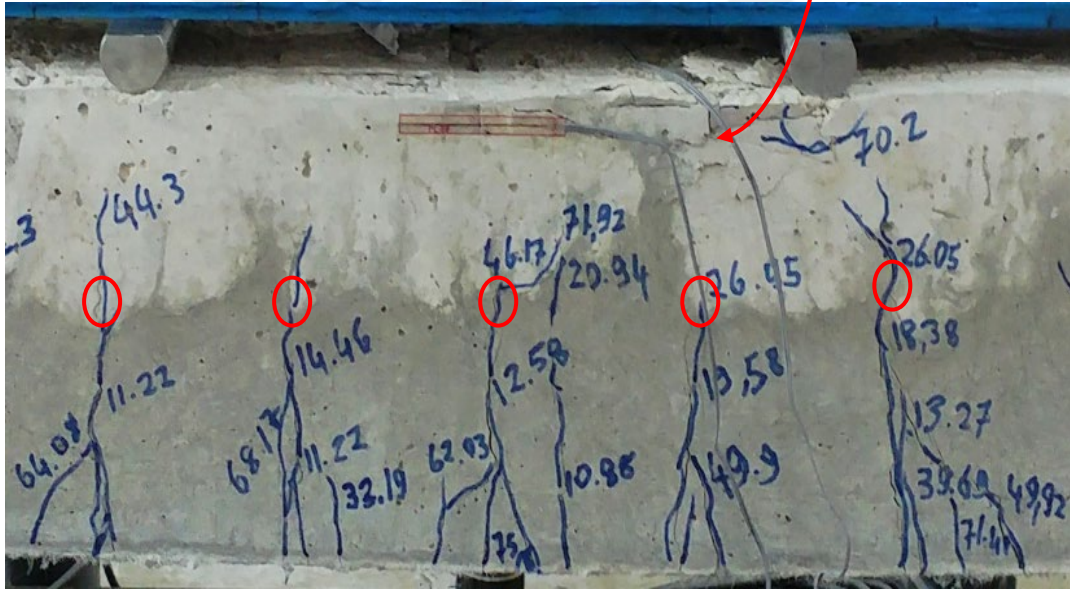
ECCB-2 kiriş dört nokta yüklemesi eğilme deneyinde, ilk çatlağın uygulanan iki yük arası eğilme bölgesinde, 10.88 kN yük değerinde ve kılcal düzeyde olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.20). İlk çatlak oluşumu sonrası artan yükler ile birlikte eğilme bölgesinde çok sayıda kılcal çatlak oluşumu tespit edilmiş, ECC bölgesinde çok sayıda çatlağın yayılım gösterdiği izlenmiştir. Bu aşamada henüz kesme çatlağına rastlanmamıştır. Kirişte 20.94 kN yük değerine ulaşıldığı andan itibaren yüklemenin giderek artmasıyla birlikte eğilme bölgesinde kılcal düzeyde yeni çatlak oluşumunun devam etmekte olduğu, mevcut çatlak boylarının yukarı doğru uzadığı ancak genişliğinin çok fazla ilerlemediği gözlemlenmiştir. Kiriş taşıma gücünün %35'i seviyelerine ulaşıldığında (29.46 kN) kiriş eğilme bölgesindeki mevcut çatlaklarda daha belirgin olarak genişlemenin başladığı tespit edilmiştir. Söz konusu çatlak genişlemesinin diğer beton içeren kirişlere göre karşılaştırıldığında, ECC'nin çatlak kontrolü yeteneğinden dolayı kılcalın biraz üzeri düzeyinde olduğu görülmektedir. Yüklemenin giderek artması ile kiriş taşıma gücünün yaklaşık %40'ına ulaşılması sonrasında eğilme bölgesinde mevcut çatlaklarda, benzer şekilde çok az şekilde genişlemenin devam ettiği ve çatlaklarda kiriş alt yüzünde kılcal düzeyde kollara ayrılmanın başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.20). Mevcut çatlaklarda, ECC bulunan kısmın üst yüzeyine doğru kılcal düzeyde ilerlemenin devam ettiği görülmüştür. Kiriş taşıma gücünün yaklaşık %50'sine ulaşılana kadar (41.91 kN) çatlaklarda kesme bölgesine (mesnete yakın bölge) doğru henüz bir ilerleme görülmemiştir. Artan yükleme ile birlikte mevcut çatlaklarda yukarı doğru ilerlemeye ilave olarak kiriş alt bölgesinde kollara ayrılmanın devam ettiği belirlenmiştir (Şekil 4.20). Yüklemenin ilerleyen aşamalarında benzer olarak mevcut çatlakların yukarı doğru boylarında uzamaların devam ettiği ve eğilme çatlaklarında mevcut çatlaklar üzerinden çok sayıda kollara ayrılmanın olduğu görülmüştür. 55.89 kN yük değerinde mesnete çok yakın simetrik çatlak oluşumu gözlenmiştir. 64.08 kN yük değerinde diğer bir ifadeyle kiriş taşıma gücünün yaklaşık %75'i seviyelerine ulaşıldığında, sol kısım yükün uygulama noktasının altında betonda ezilmelerin başladığı, kiriş 70.20 kN yük değerine ulaşıldığında ise sağ kısım yükün uygulama noktasının altında betonda ciddi bir biçimde basınç ezilmesinin başladığı tespit edilmiştir (Şekil 4.20). En dış lifteki betonda çatlaklar oluşmaya başlamış, betonda dökülmeler görülmüştür. Artan yükler ile beraber kiriş eksen yönünde en dış lifte yatay çatlak oluşumunun ve ezilmenin devam ettiği izlenmiştir. Aynı zamanda yük artışı ile birlikte eğilme bölgesindeki mevcut çatlakların daha belirgin olarak genişlediği ve çatlakların alt yüzde, çekme bölgesinde kollara ayrılmasının hızlandığı tespit edilmiştir. İki yük arası eğilme bölgesinde beş adet ana çatlakta en fazla genişlemenin olduğu, mesnete doğru

gittikçe etriyelerin sağladığı katkı ile çatlak genişliğinin kılcal düzeyde seyrettiği görülmüştür. Söz konusu beş ana çatlak Şekil 4.21’de gösterilmiştir. 80.10 kN yük değerinde, yük noktasının altında basınç bölgesi ezilmesinin tamamen geliştiği gözlemlenmiş olup yüklemeye biraz daha devam edilmiş, 83.51 kN yük değerinde deney sonlandırılmıştır (Şekil 4.22). ECCB-2 kirişinde çatlak yayılım düzeyine bakıldığında kirişin iyi derecede deformasyon sergilediği görülmüştür. Deney aşamasında kirişte meydana gelen çatlak gelişimi Şekil 4.20’de, Şekil 4.21’de ve Şekil 4.22’de sunulmuştur. ECC’nin çoklu çatlak oluşturma ve çatlak kontrolü yeteneğinden dolayı, taşıma gücüne ulaşıldığında çatlak genişliğinin oldukça düşük düzeyde olduğu dikkat çekmektedir.

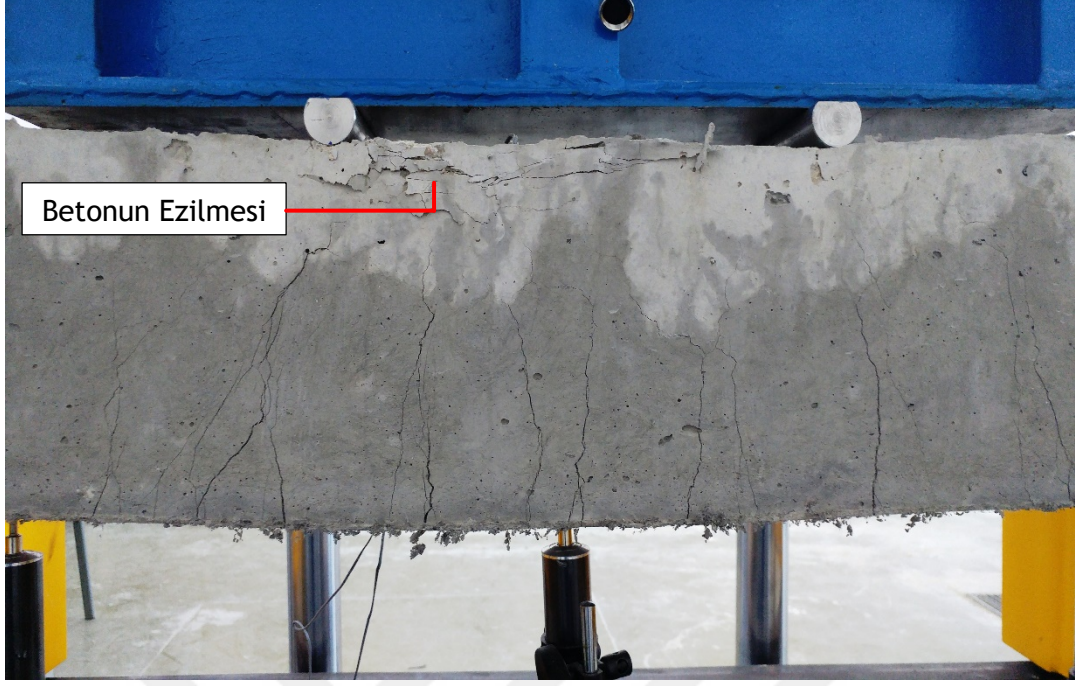




Şekil 4.20. ECCB-2 kirişi çatlak gelişimi

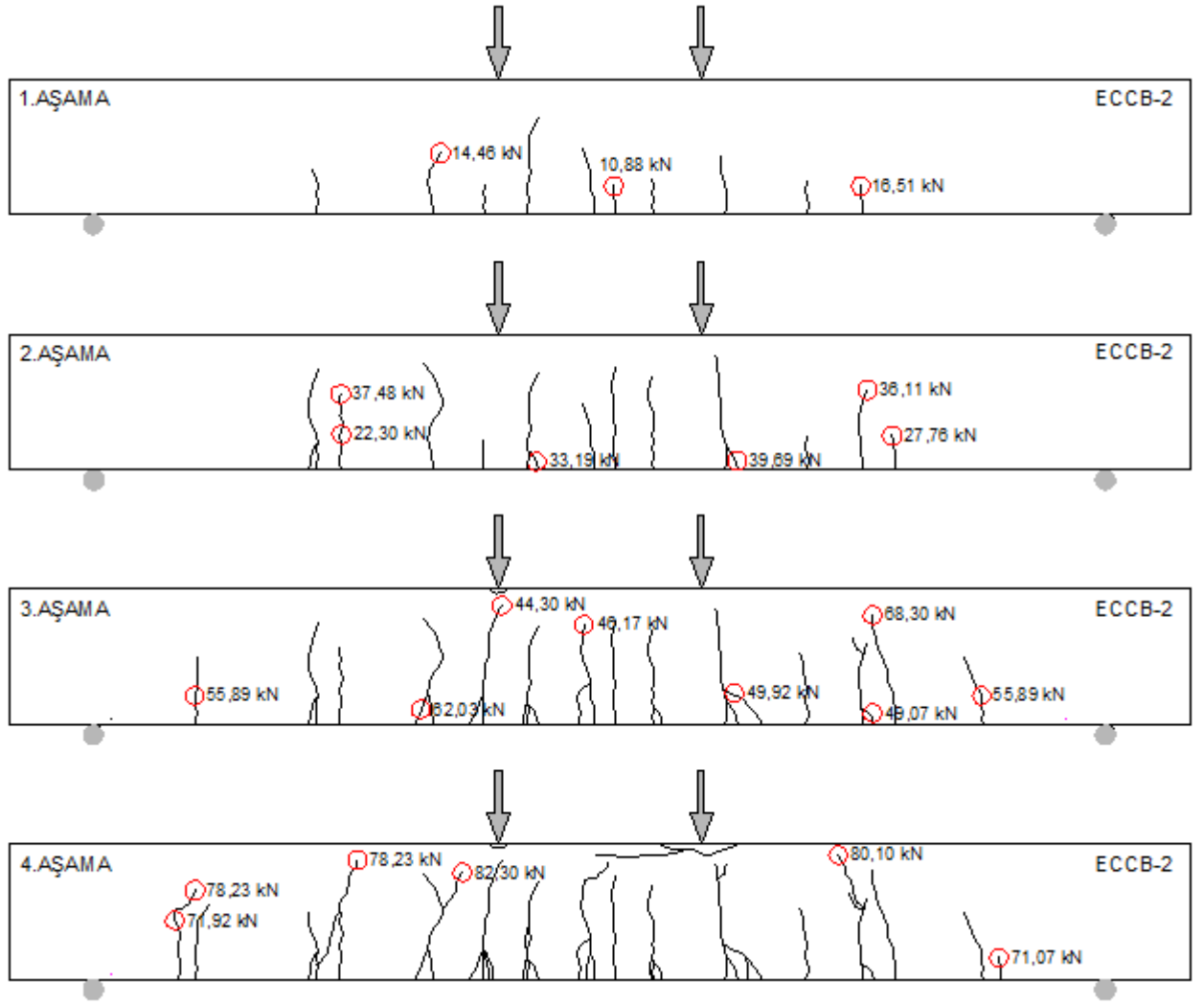


Şekil 4.21. ECCB-2 kirişi çatlak gelişimi detay görünümü



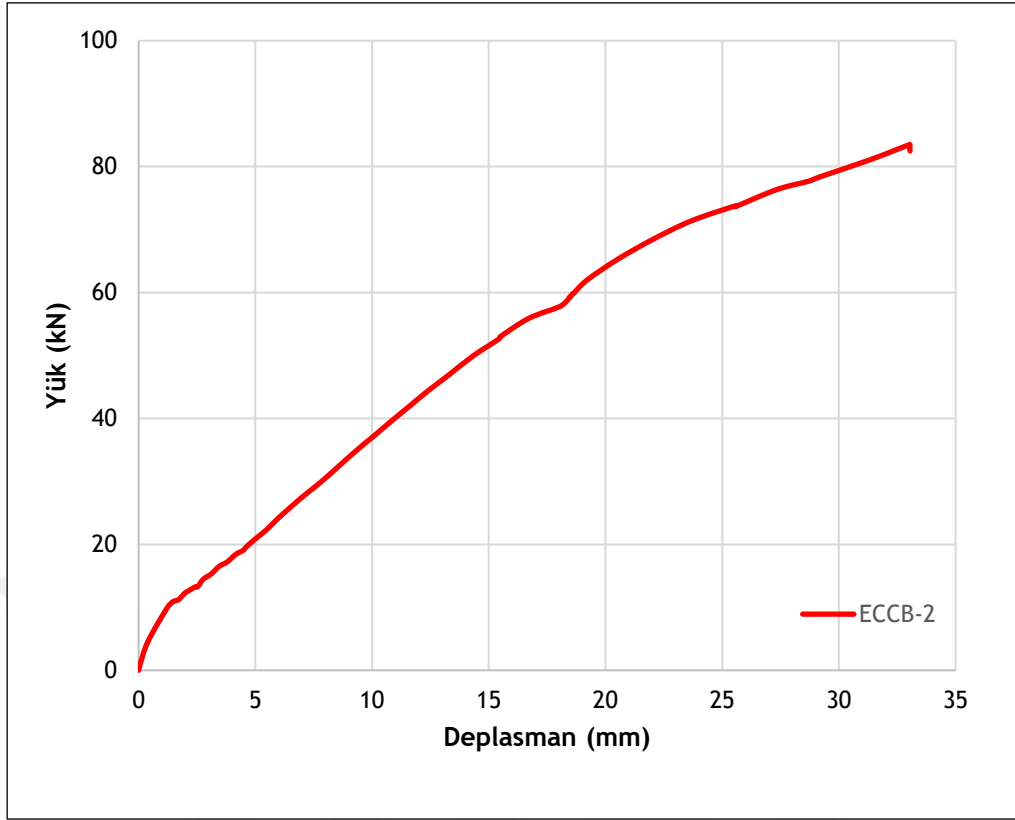
**Şekil 4.22.** ECCB-2 kirişi çatlak gelişimi (diğer yüz)

ECCB-2 kirişinde yükleme boyunca oluşan çatlak gelişimi, şematik olarak Şekil 4.23'te sunulmuştur.

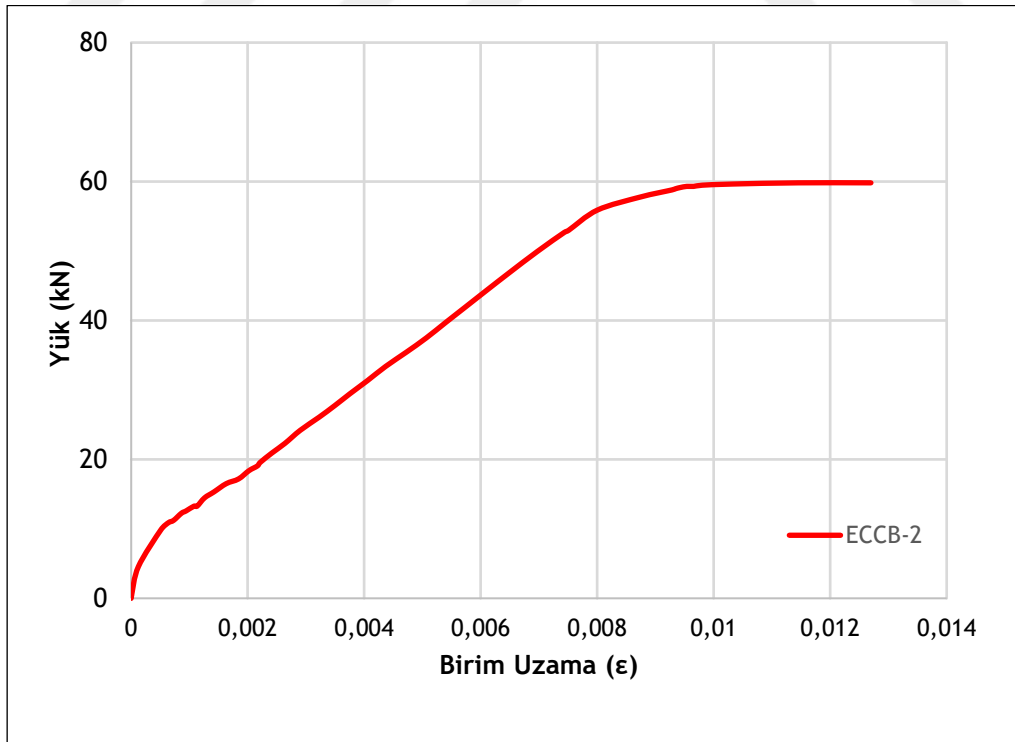


**Şekil 4.23.** ECCB-2 kirişi çatlak gelişimi şematik görünümü

Deney sonucunda ECCB-2 kirişine ait deneysel yük-deplasman ve yük–birim uzama eğrileri Şekil 4.24’te ve Şekil 4.25’te sunulmuştur. Yük artışı ile deplasmanlarda da artış gözlenmiş olup kiriş orta noktasında 33.04 mm deplasman değerine ulaşılmıştır.



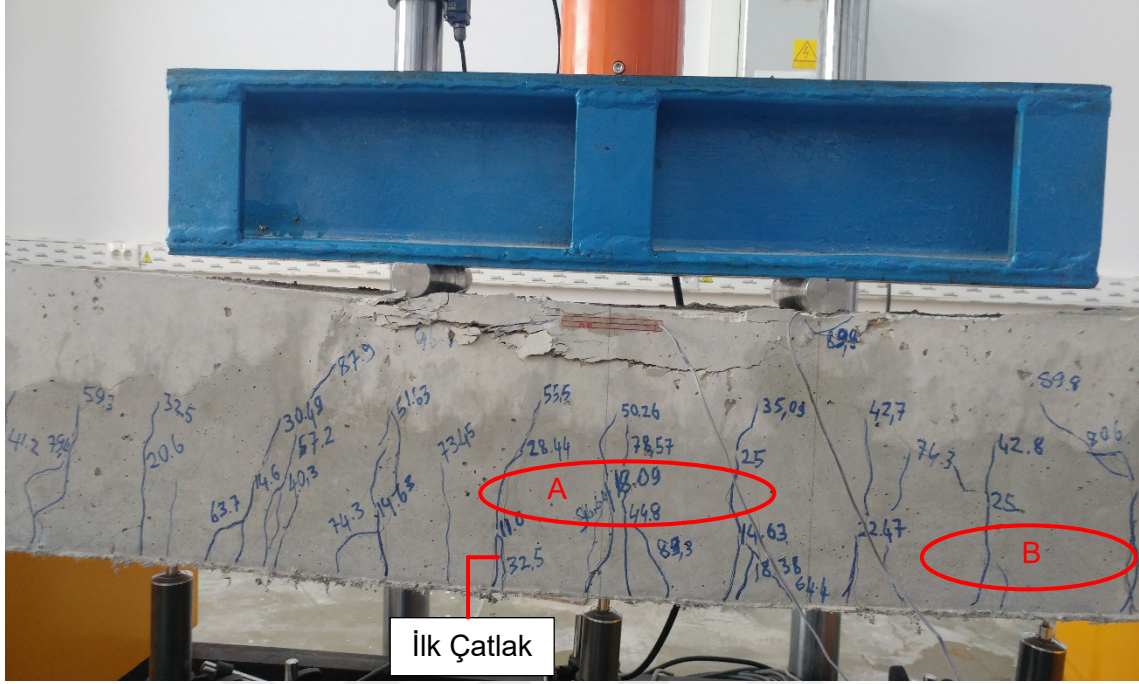
Şekil 4.24. ECCB-2 kirişine ait yük-deplasman eğrisi



Şekil 4.25. ECCB-1 kirişine ait donatı yük-birim uzama eğrisi

#### 4.1.4.5. ECCB-3 Kiriş Numunesi

ECCB-3 kiriş numunesi dört nokta yükleme deneyinde, oluşan ilk çatlağın uygulanan iki yük arası eğilme bölgesinde, yaklaşık 11.00 kN yük değerinde ve kılcal düzeyde meydana geldiği gözlenmiştir (Şekil 4.26). İlk çatlak oluşumu sonrası artan yükler ile birlikte eğilme bölgesinde çok sayıda kılcal çatlağın meydana geldiği tespit edilmiştir. 25.00 kN yük düzeyine ulaşıldığında eğilme bölgesinde mevcut çatlaklara benzer kılcal çatlak oluşumunun devam ettiği, aynı zamanda eğilme çatlağının birkaçının yukarı doğru ilerlemeye başladığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.26). Artan yük ile birlikte kirişte kılcal çatlakların hızla yayıldığı görülmüştür. Kiriş taşıma gücünün %33'ü seviyelerinde (32.50 kN) kılcal çatlakların oluşumu devam etmiş ve mevcut çatlaklarda kollara ayrılma başlamıştır (Şekil 4.26). Ayrıca benzer şekilde mevcut çatlakların boyu kiriş orta bölgesine ve üzerine doğru uzamaya devam etmiştir. Deneyde, 37.48 kN yük değerine (kiriş taşıma gücünün %40'ı seviyeleri) ulaşıldığında eğilme çatlaklarında çok az genişleme tespit edilmiştir. Artan yükler ile birlikte çatlakların hızla yukarı yönde ilerlediği görülmüştür. Eğilme bölgesinde yeni çatlaklar oluşurken, 48.22 kN yük değerine ulaşıldığında mevcut çatlak genişliğinde kılcal düzeyin biraz üzerinde genişleme gözlemlenmiştir. İlerleyen aşamalarda kılcal düzeyde çatlak oluşumunun hala devam ettiği ve mevcut çatlaklarda kollara ayrılmaların başladığı belirlenmiştir. Kiriş testinde 64.42 kN yük seviyelerine ulaşıldığında, çekme bölgesinde mevcut çatlaklar çevresinde kollara ayrılarak yeni çatlak oluşumunun devam ettiği gözlenmiştir. Eğilme bölgesinde çatlaklar biraz daha belirgin hale gelmiş, kesme bölgesinde kılcal düzeyde kesme çatlakları görülmüştür. Kirişte 67.80 kN yük değerinde her iki mesnete yakın kılcal düzeyde çatlak oluşumu tespit edilmiştir. Yüklemenin giderek artması ile kiriş taşıma gücünün yaklaşık %75'ı seviyelerinde benzer şekilde kılcal düzeyde yeni eğilme çatlaklarının oluştuğu, mevcut çatlaklarda kollara ayrılmaların devam ettiği görülmüştür. Kiriş taşıma gücüne yaklaşılrken kiriş gövdesinde çok sayıda çatlak yayılımının mevcut olduğu gözlemlenmiştir. Eğilme bölgesinde çatlak genişliği biraz daha belirginleşirken kesme bölgesinde çatlaklar hala kılcal düzeyde kalmıştır. Kiriş testinde 89.80 kN yük değerinde kiriş taşıma gücünün %94'ü seviyesinde yük altında basınç ezilmesinin başladığı tespit edilmiştir. 95.65 kN yük değerine ulaşıldığında basınç bölgesinde betonun ani bir şekilde gevrek olarak kırıldığı gözlemlenmiş olup 96.84 kN'da deney sonlandırılmıştır (Şekil 4.29). Deney aşamasında kirişte meydana gelen çatlak gelişimi Şekil 4.26, Şekil 4.27, Şekil 28 ve Şekil 4.29'da sunulmuştur. Yükleme sonrası kiriş boyunca çatlak yayılımı Şekil 4.26 'da görülmektedir. ECC'nin çoklu çatlak oluşturma ve çatlak kontrolü yeteneğinin etkisi ile çatlak genişliğinin oldukça düşük düzeyde olduğu dikkat çekmektedir.



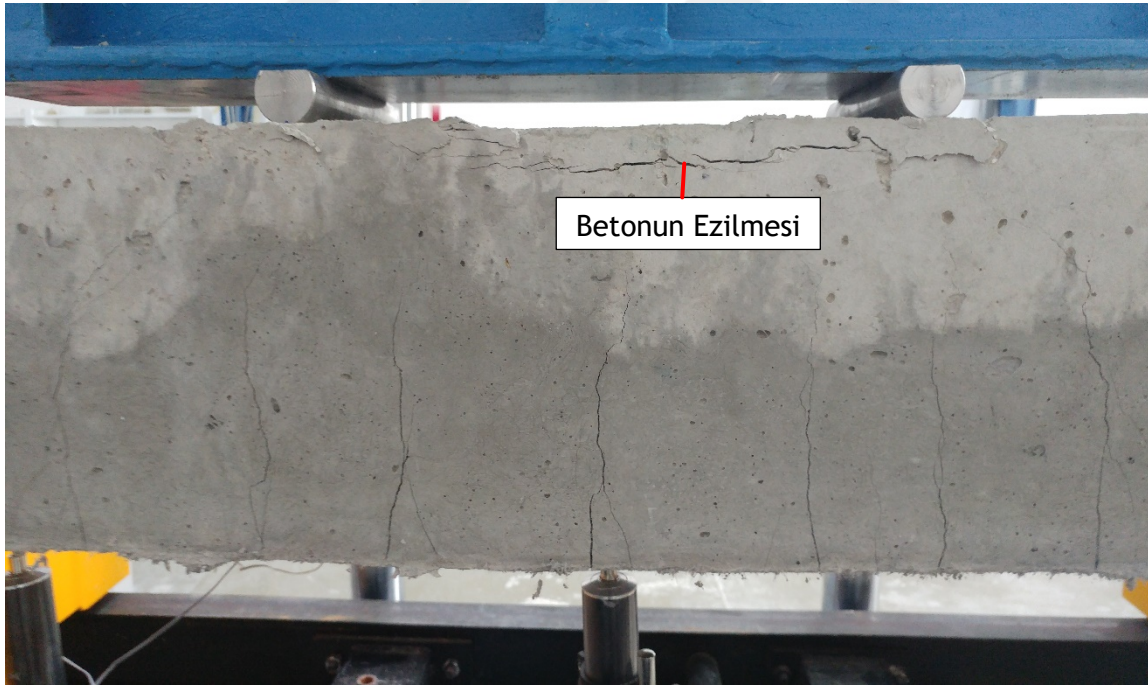
Şekil 4.26. ECCB-3 kirişi çatlak gelişimi



Şekil 4.27. ECCB-3 kirişi iki yük arası eğilme bölgesi çatlak gelişimi detay görünümü

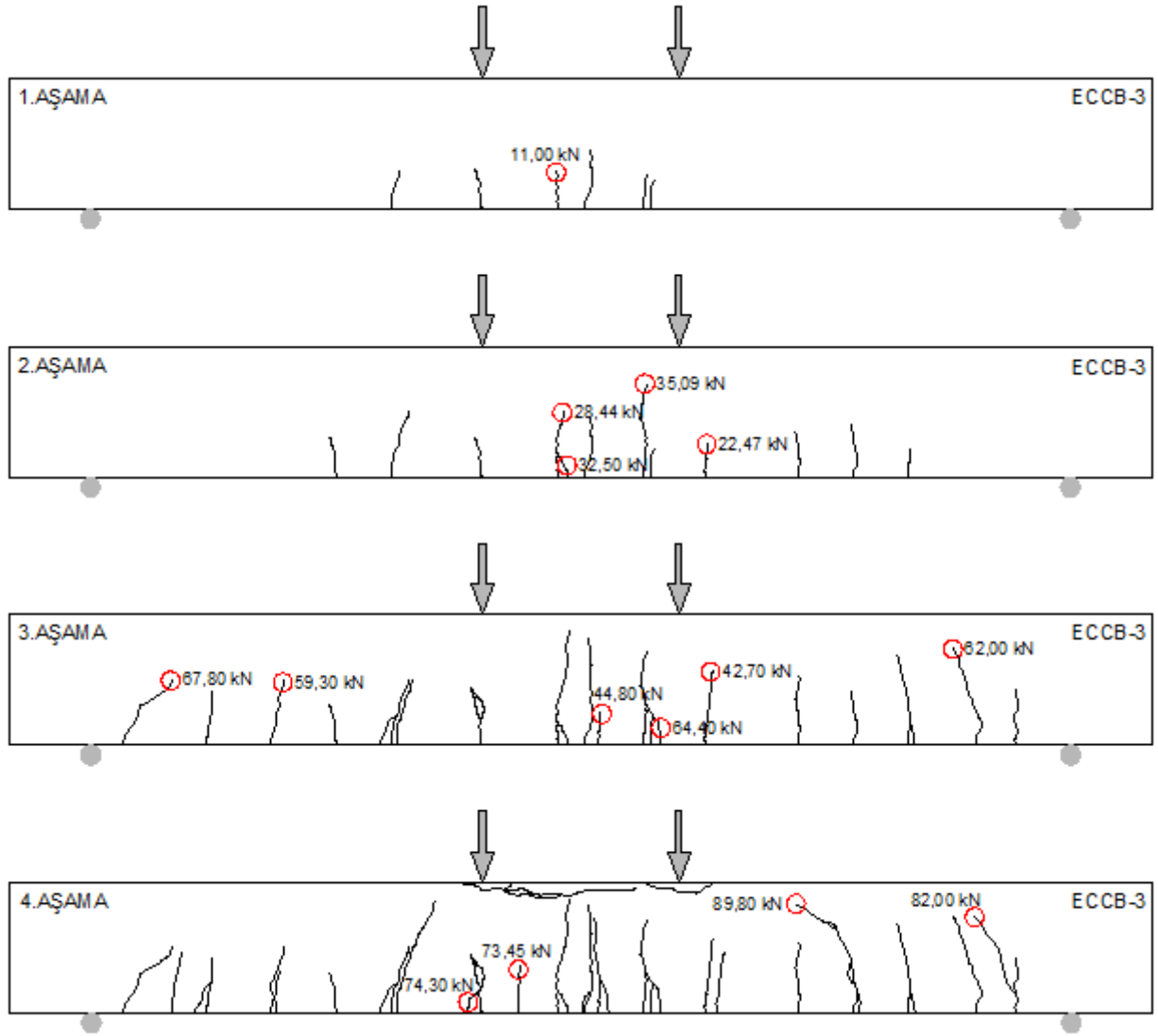


Şekil 4.28. ECCB-3 kirişi yük dışı eğilme bölgesi çatlak gelişimi detay görünümü



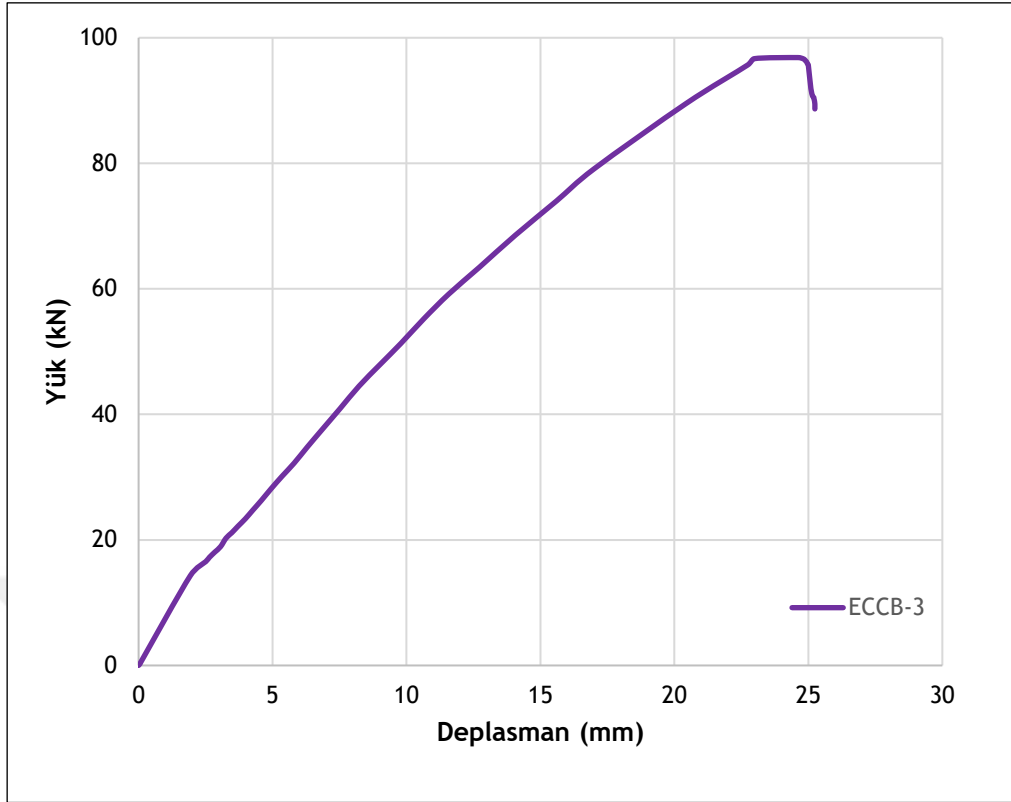
Şekil 4.29. ECCB-3 kirişi çatlak gelişimi (diğer yüz)

ECCB-3 kirişinde yükleme boyunca oluşan çatlak gelişimi, şematik olarak Şekil 4.30'da sunulmuştur.

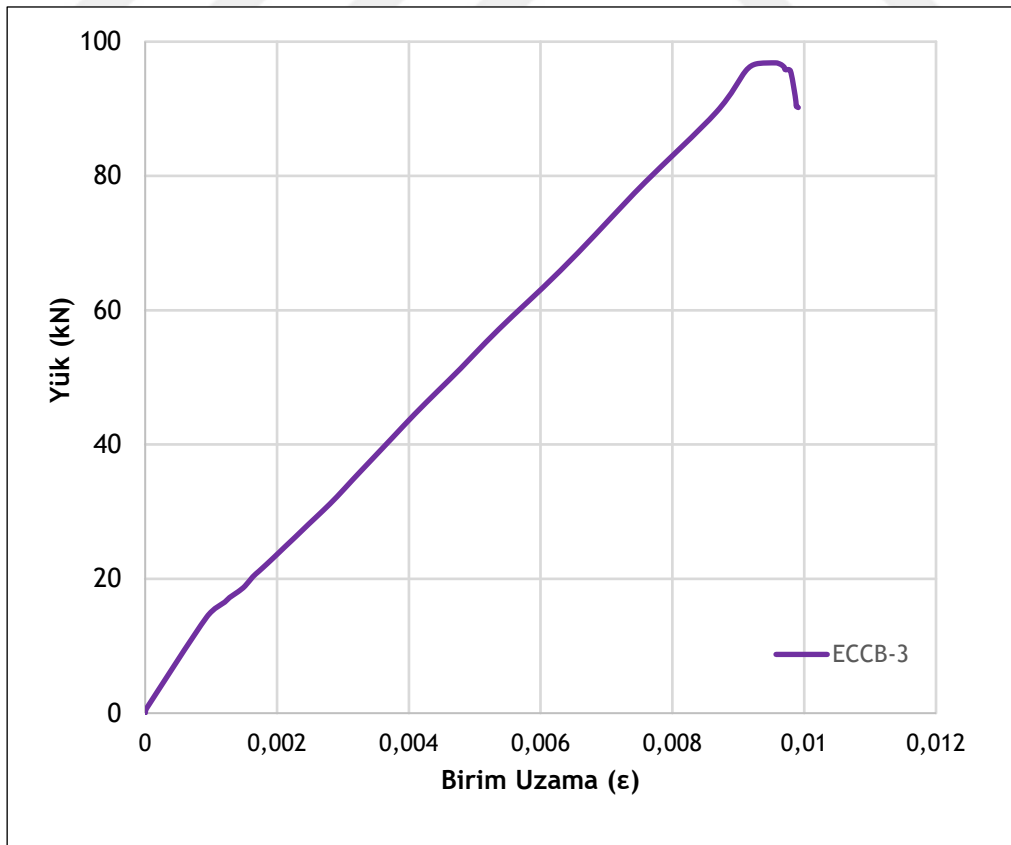


**Şekil 4.30.** ECCB-3 kirişi çatlak gelişimi şematik görünümü

ECCB-3 kirişine ait deney sonucu elde edilen yük-deplasman ve yük –birim deformasyon eğrileri Şekil 4.31’de ve Şekil 4.32’de sunulmuştur. Yük artışı ile deplasmanlarda da artış gözlenmiş olup kiriş numune orta noktasında 25.24 mm deplasman değerine ulaşılmıştır.



Şekil 4.31. ECCB-3 kirişine ait yük-deplasman eğrisi

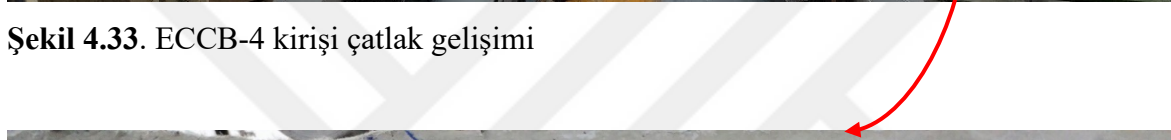


Şekil 4.32. ECCB-3 kirişine ait donatı yük birim-uzama eğrisi

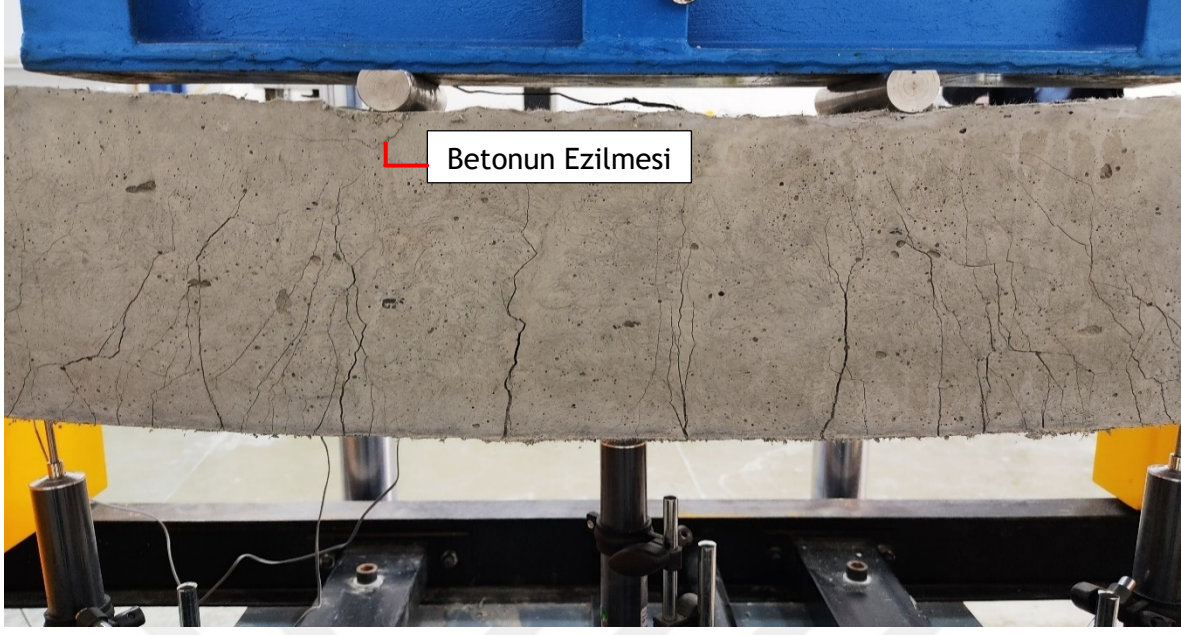
#### 4.1.4.6. ECCB-4 Kiriş Numunesi

ECCB-4 kirişi dört nokta yüklemesi deneyinde, ilk çatlağın uygulanan iki yük arası eğilme bölgesinde, 10.37 kN yük değerinde ve kılcal düzeyde olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.33). İlk çatlak oluşumu sonrası artan yük ile birlikte eğilme bölgesinde çok sayıda kılcal düzeyde çatlak olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, çatlakların bir kısmında kiriş alt yüzünde çatlakların kollara ayrılarak yeni çatlakların olduğu görülmüştür. Söz konusu çatlakların eğilme bölgesi boyunca yayılmakta olduğu ve ana çatlakların kılcal düzeyde devam ettiği gözlemlenmiştir. Kiriş taşıma gücünün yaklaşık %27'si seviyelerine ulaşılan kadar (30.00 kN) eğilme bölgesinde benzer şekilde kılcal çatlak oluşumunun ve kollara ayrılmaların devam ettiği ve mevcut çatlakların hala kılcal düzeyde seyrettiği gözlenmiştir (Şekil 4.33 ). Bu aşamada henüz kesme çatlağına rastlanmamıştır. Kirişin yük etkisi altında önemli düzeyde deplasman yaptığı, yükün aktarımının diğer kirişlerle karşılaştırıldığında daha düşük seviyede seyrettiği belirlenmiştir. Kiriş taşıma gücünün yaklaşık %30'u seviyelerine ulaşıldığında (34.58 kN), mevcut eğilme çatlaklarının hemen hemen tamamının hala kılcal düzeyde olduğu, çatlaklarda çok az düzeyde genişleme olduğu gözlemlenmiştir. ECC'nin mekanik özelliğine bağlı olarak çatlakların gelişiminden çok çatlak sayısında artışın olduğu görülmüştür. Yükte fazla artış olmadan deplasmanlarda artış göze çarpmıştır. Yüklemin giderek artması ile benzer şekilde çatlak oluşumu devam etmiş, mevcut çatlakların birçoğu hala kılcal düzeyde kalmıştır. Bu aşamadan sonra, çatlakların kiriş gövdesine yayılımının devam ettiği, mesnete yakın kısımlarda yeni çatlakların olduğu gözlemlenmiştir. Artan yükler ile birlikte kiriş taşıma gücünün yaklaşık %54'ü seviyelerine ulaşıldığında (60.00 kN) mevcut çatlaklarda kiriş alt yüzünde kollara ayrılmalar tespit edilmiş ve yeni çatlakların oluşumuyla çatlak yayılımının devam ettiği görülmüştür. Kirişin 61.18 kN yük değerinde eğilme bölgesinde çatlak genişliklerinin kılcal düzeyin biraz üzerinde olduğu, mesnete doğru meydana gelen çatlakların hala kılcal düzeyde kaldığı görülmüştür. Yüklemin 66.63 kN değerinde, çatlakların biraz daha belirgin düzeyde genişlediği tespit edilmiş ve yüklemenin artması ile ilave çatlak oluşumunun devam ettiği gözlenmiştir. Deneyde 78.57 kN yük değerinde, sol mesnete yakın 45°'lik bir kesme çatlağı oluşmuştur (Şekil 4.33). Kiriş taşıma gücünün yaklaşık %80'i seviyelerine ulaşıldığı aşamada (90.00 kN) kirişte çok fazla çatlak yayılımı olduğu, kollara ayrılmaların devam ettiği, ilave çatlakların olduğu görülmüş, liflerin etkisine bağlı olarak eğilmedeki ana çatlakların normal beton içeren kiriş numunelerine (Numune CB-1 ) kıyasla çok fazla genişlemediği tespit edilmiştir. Kiriş taşıma gücünün yaklaşık %86 'sı seviyelerinde (97.15 kN) eğilme bölgesinde ana çatlakların bir miktar genişlemiş durumda olduğu diğer çatlakların ise kılcal düzeyde

olduğu gözlenmiştir. Ancak, genişleyen çatlakların normal betonarme kirişlerde oluşan çatlak genişliği seviyesine kadar ulaşmadığı belirlenmiştir. Bu aşamada yükleme noktasının altında betonun ezilmeye başladığı da tespit edilmiştir (Şekil 4.35). Artan yükleme ile birlikte ilave çatlak oluşumu görülmüş, betonda basınç bölgesinde ezilme devam etmiş, ancak normal beton numunelerde olduğu kadar ani ezilme görülmemiştir. Yüklemenin sonuna yaklaşılmamasıyla birlikte sürekli kılcal çatlak oluşumu devam etmiş, kiriş taşıma gücüne ulaşılmasının ardından 112.70 kN yük değerinde deney sonlandırılmıştır. ECCB-4 kirişinde çatlak yayılımının iyi bir düzeyde gerçekleştiği, kirişin iyi derecede deplasman yaptığı görülmüştür. Deney aşamasında kirişte meydana gelen çatlak gelişimi Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te sunulmuştur. Ana çatlak genişliğinin oldukça düşük olması ve kirişte çok fazla kılcal çatlağın varlığı ECC'nin çoklu çatlak oluşturma ve çatlak kontrolü yeteneğini doğrular nitelikte olduğu sonucuna varılmıştır.

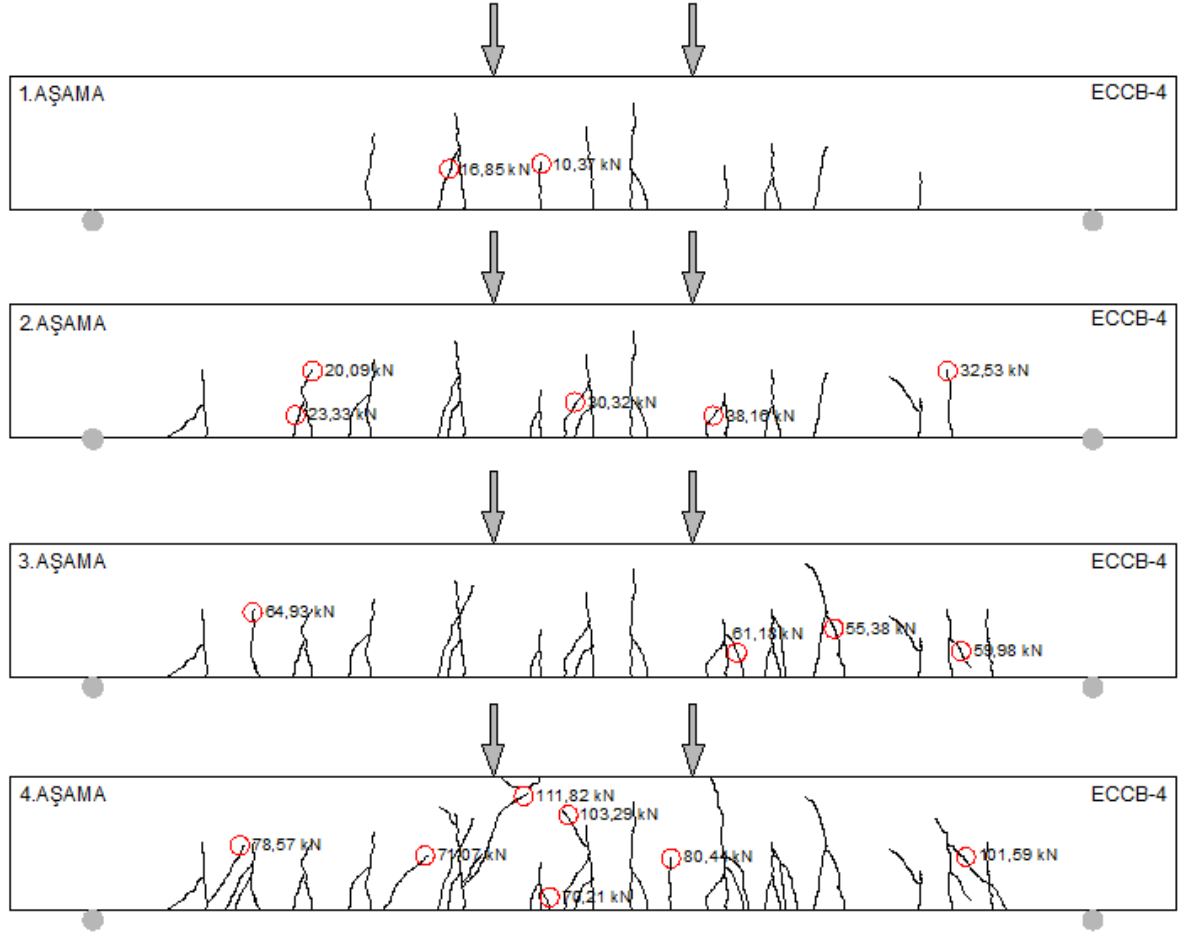
[illegible]

78



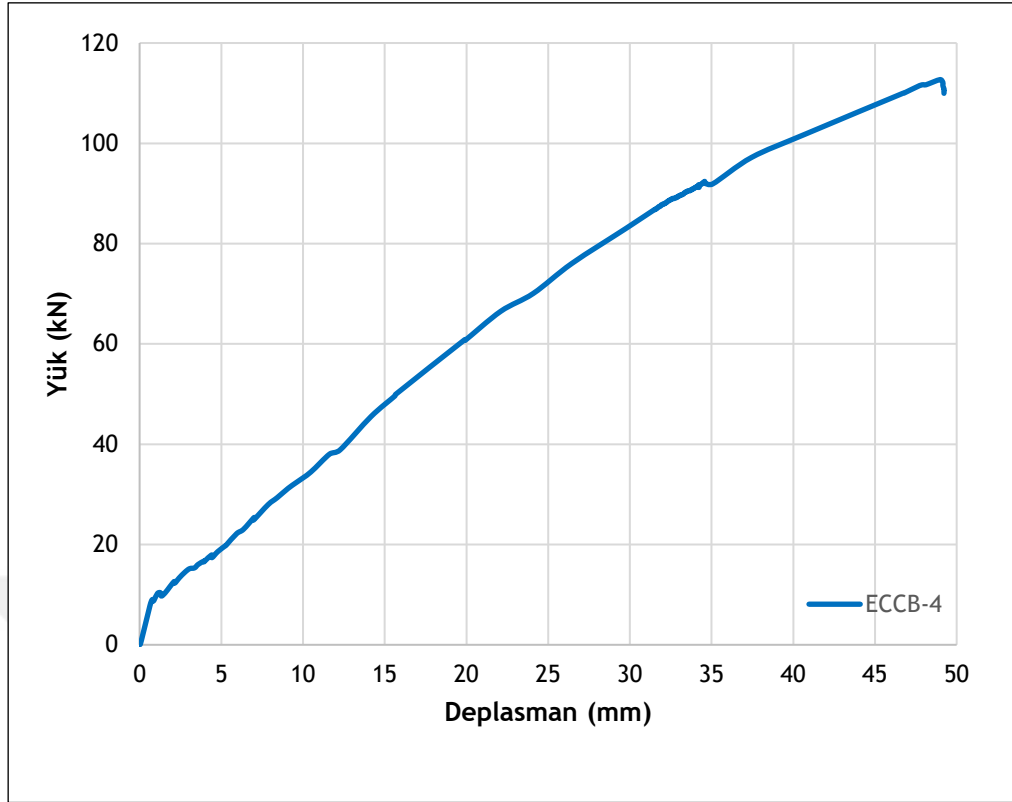
**Şekil 4.35.** ECCB-4 kirişi çatlak gelişimi (diğer yüz)

ECCB-4 kirişinde yükleme boyunca oluşan çatlak gelişimi, şematik olarak Şekil 4.36'da sunulmuştur.

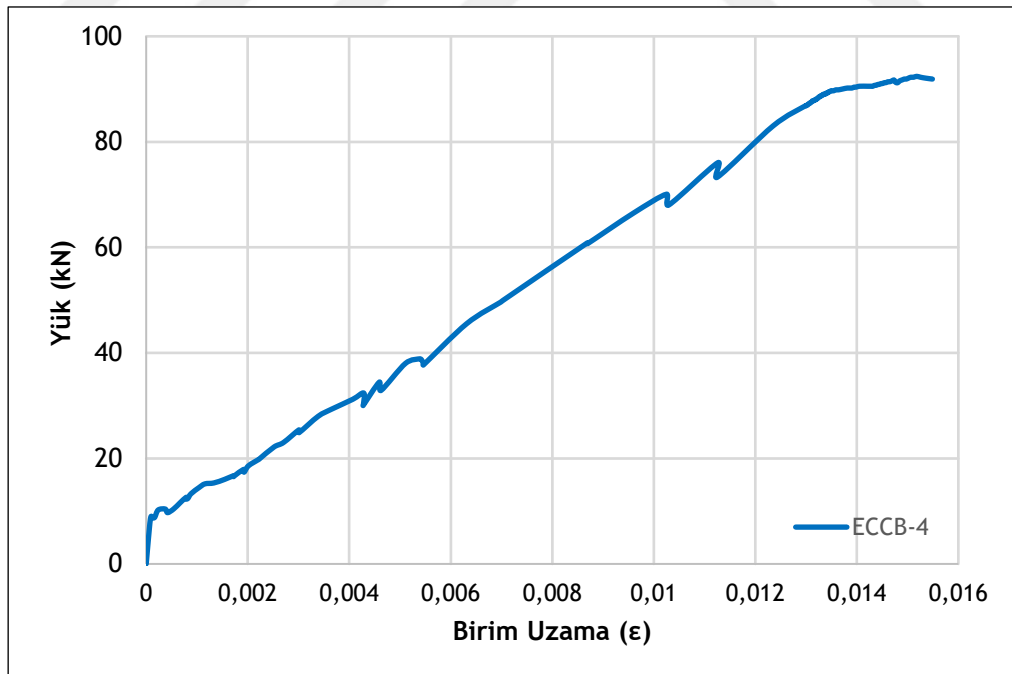


**Şekil 4.36.** ECCB-4 kirişi çatlak gelişimi şematik görünümü

ECCB-4 kirişine ait deneysel yük-deplasman ve yük–birim uzama eğrileri Şekil 4.37 ve 4.38’de sunulmuştur. Yük artışına bağlı olarak deplasmanlarda da artış gözlenmiş olup kiriş orta noktasında 49.23 mm deplasman değerine ulaşılmıştır.



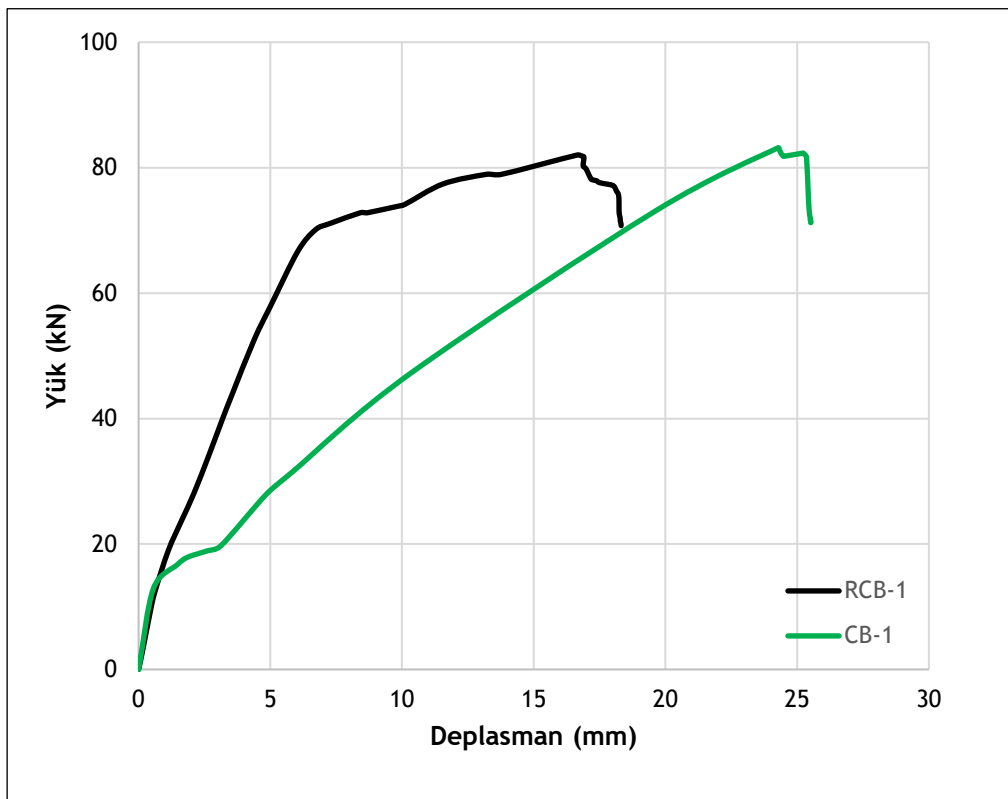
Şekil 4.37. ECCB-4 kirişine ait yük-deplasman eğrisi



Şekil 4.38. ECCB-4 kirişine ait donatı yük birim-uzama eğrisi

Kiriş numunelerin matris tipi, donatı tipi ve donatı oranı gibi parametreleri dikkate alınarak deneyde elde edilen bulgular üzerinden yapılan değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur.

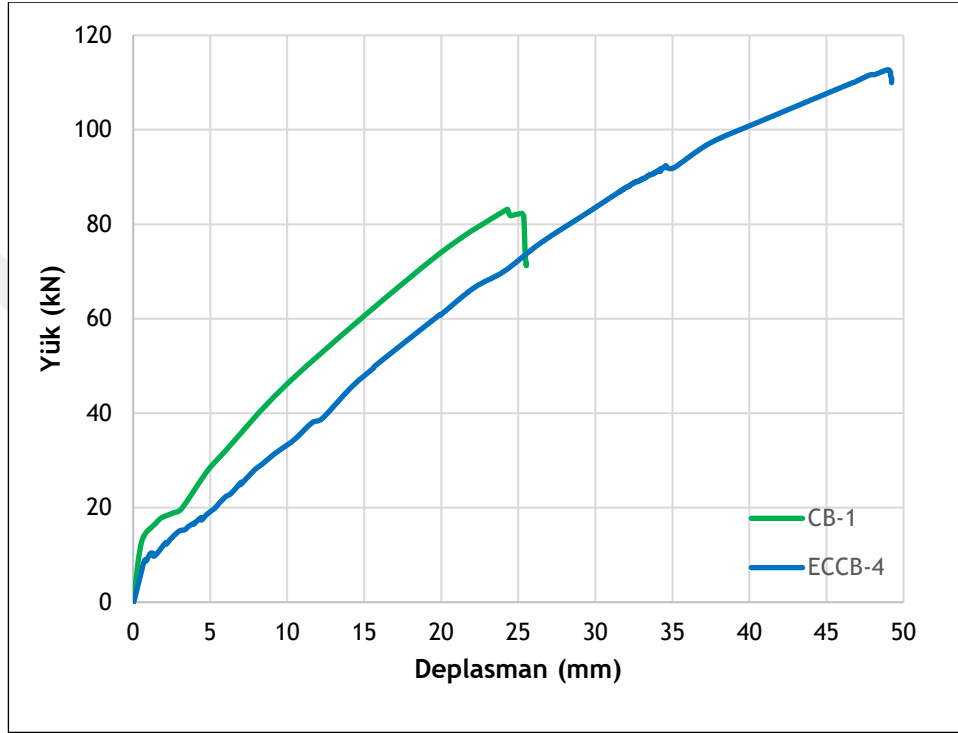
Aynı matris türü (normal beton) ve farklı donatı tipine (çelik veya GFRP) sahip olan RCB-1 ve CB-1 kirişleri incelendiğinde, beklendiği üzere kompozit donatılı CB-1 kirişinde yük-deplasman grafiğinin doğrusala yakın olduğu tespit edilmiştir. Kirişlerde birbirine yakın değerlerde yük taşıma kapasitesine ulaşılırken, GFRP donatılı CB-1 kiriş numunesi orta noktasında daha yüksek deplasman değerine ulaşıldığı görülmüştür (Şekil 4.39).



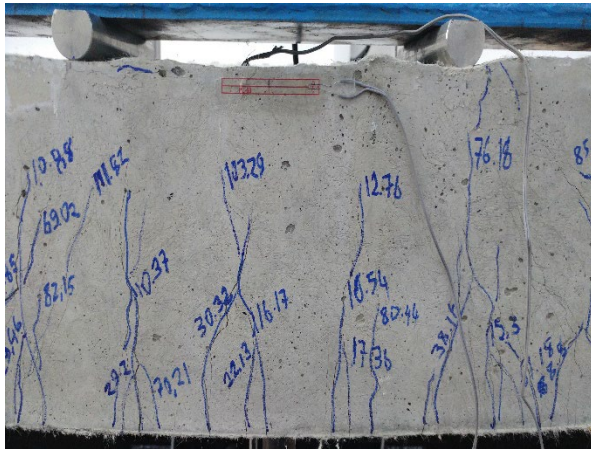
Şekil 4.39. RCB-1 ve CB-1 kirişine ait yük-deplasman eğrileri

ECCB-4 kirişi ve CB-1 kirişi aynı boyuna donatı oranına ve tipine sahiptir, ancak matris türü farklıdır. ECCB-4 kirişi tamamen ECC içermekte, CB-1 kirişi ise normal beton içermektedir. ECCB-4 kirişinde ECC basınç dayanımı 61.95 MPa, CB-1 kirişinde normal betonun basınç dayanımı 48,86 MPa elde edilmiştir. ECCB-4 kirişinin yük taşıma kapasitesi CB-1 kirişinden % 36, maksimum deplasman değeri ise % 93 daha fazla bulunmuştur (Şekil 4.40). Şekil 4.41’de görüldüğü üzere CB-1 kirişinde basınç bölgesi tamamen ezildikten sonra basınç bölgesinde betonda aderans çatlakları, kabuk atma ve dökülmeler görülürken, ECCB-4 kirişinde liflerin

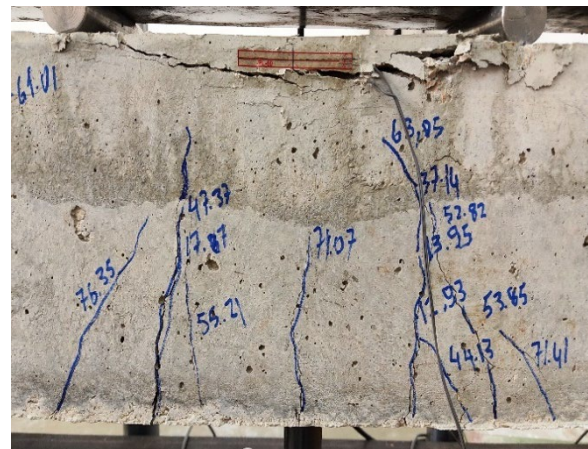
katkısıyla bu tür durumlara rastlanmamıştır. Son aşamada, CB-1 kirişinde belirli sayıda eğilme ve kesme çatlakları görülürken, ECCB-4 kirişinde çok daha fazla sayıda ve kirişe yayılmış biçimde çatlak oluşumu gözlenmiştir. Bu durum, ECC'nin çatlak kontrolü yeteneği ve çoklu çatlak oluşumu sağladığını ve çatlak genişliğini de önemli ölçüde azalttığını sonucunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.40. CB-1 ve ECCB-4 kirişine ait yük-deplasman eğrileri



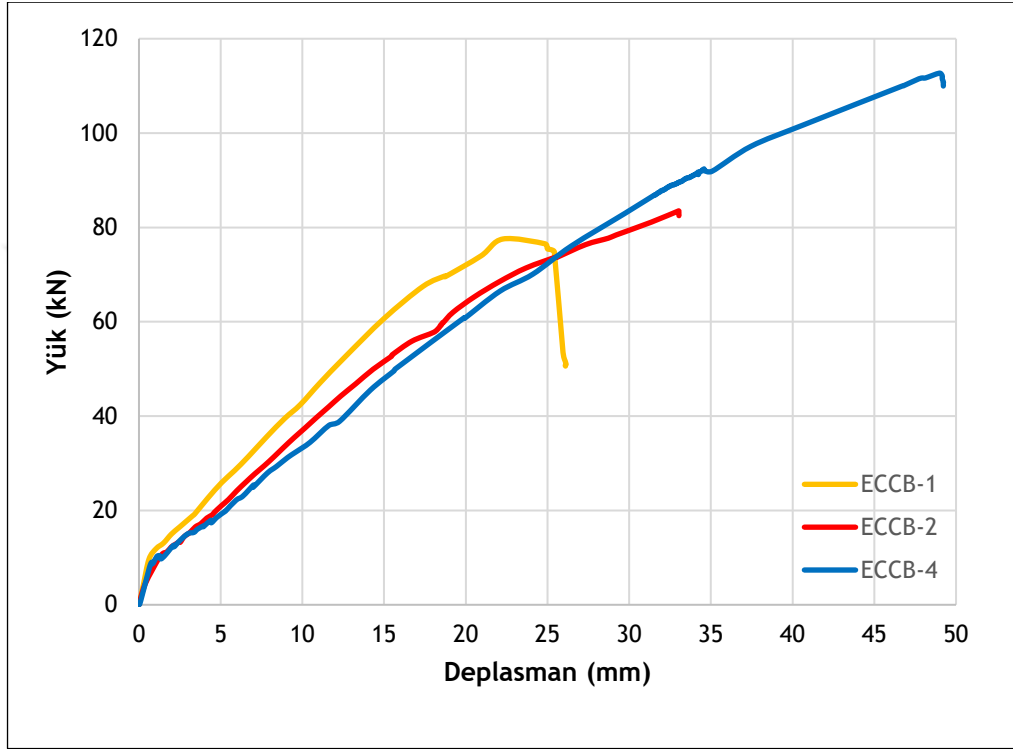
(a)



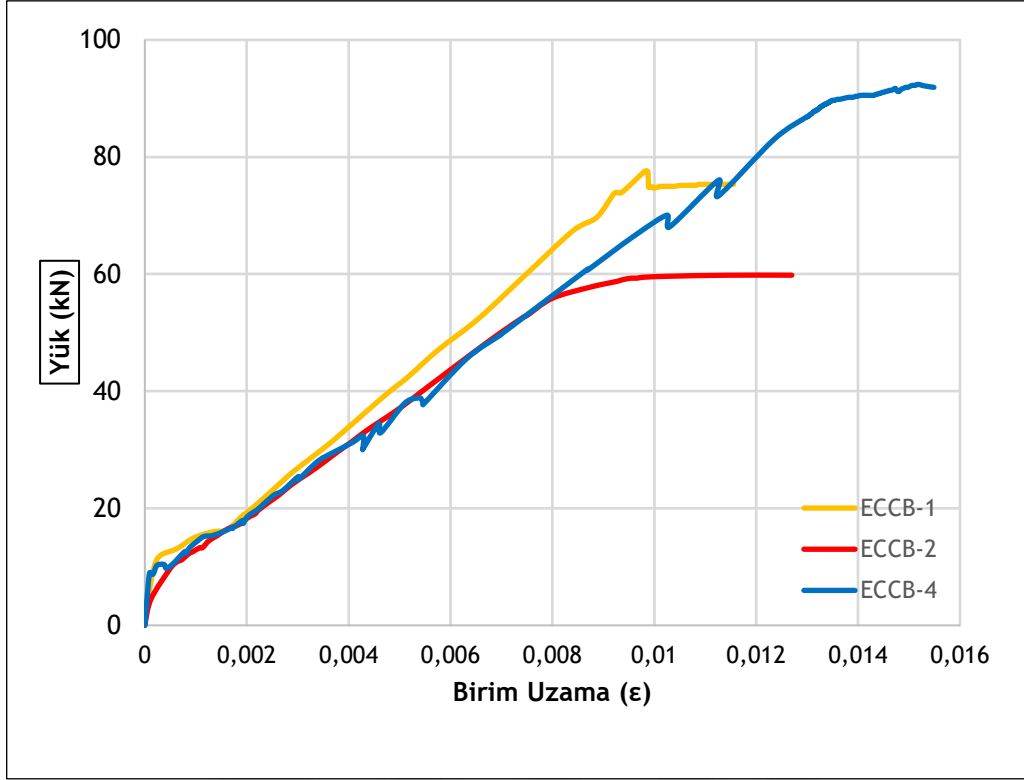
(b)

Şekil 4.41. (a) ECCB-4 (b) CB-1 kirişine ait basınç bölgesi ezilmesi görünümü

Donatı oranları aynı olup farklı derinliklerde ECC içeren kompozit kirişler incelendiğinde, yükleme boyunca beton ile ECC tabakaları arasında ayrışma olmadığı görülmüştür. Kompozit kirişlerde ECC derinliğinin artmasıyla yük taşıma kapasitesinde, orta nokta deplasman değerinde artış olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.42). Ayrıca Şekil 4.43'te görüldüğü üzere ECC derinliğindeki artışın, donatıda daha fazla şekil değiştirmeye izin verdiği görülmüştür.

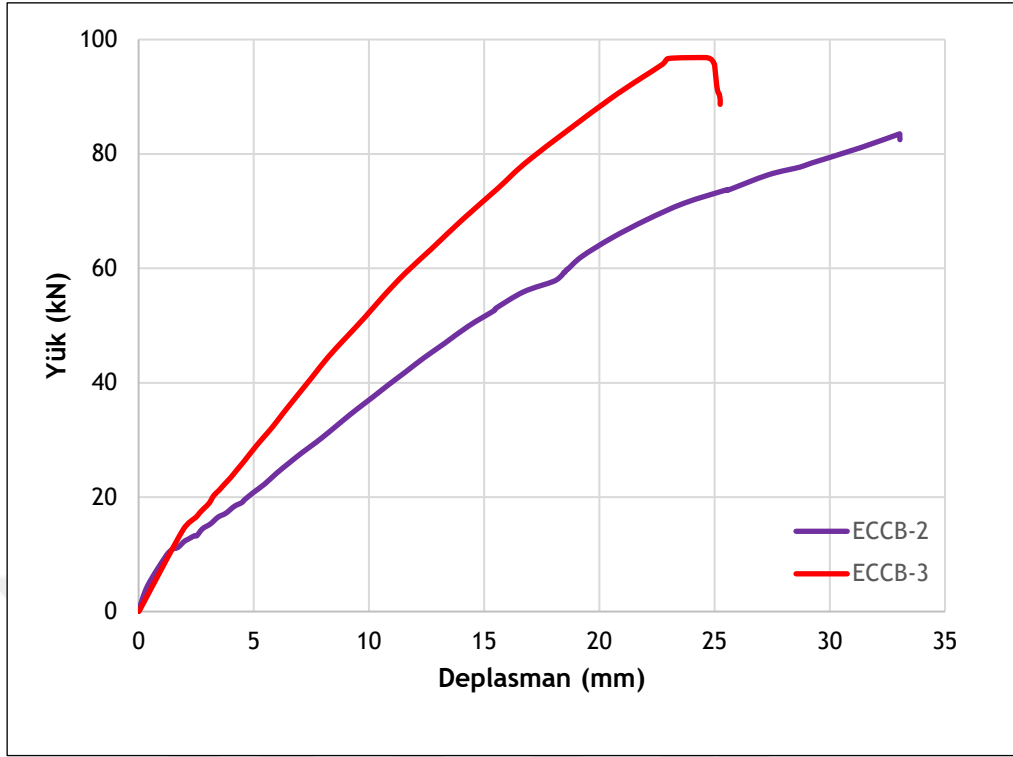


Şekil 4.42. ECCB-1,ECCB-2 ve ECCB-4 kirişine ait yük-deplasman eğrileri



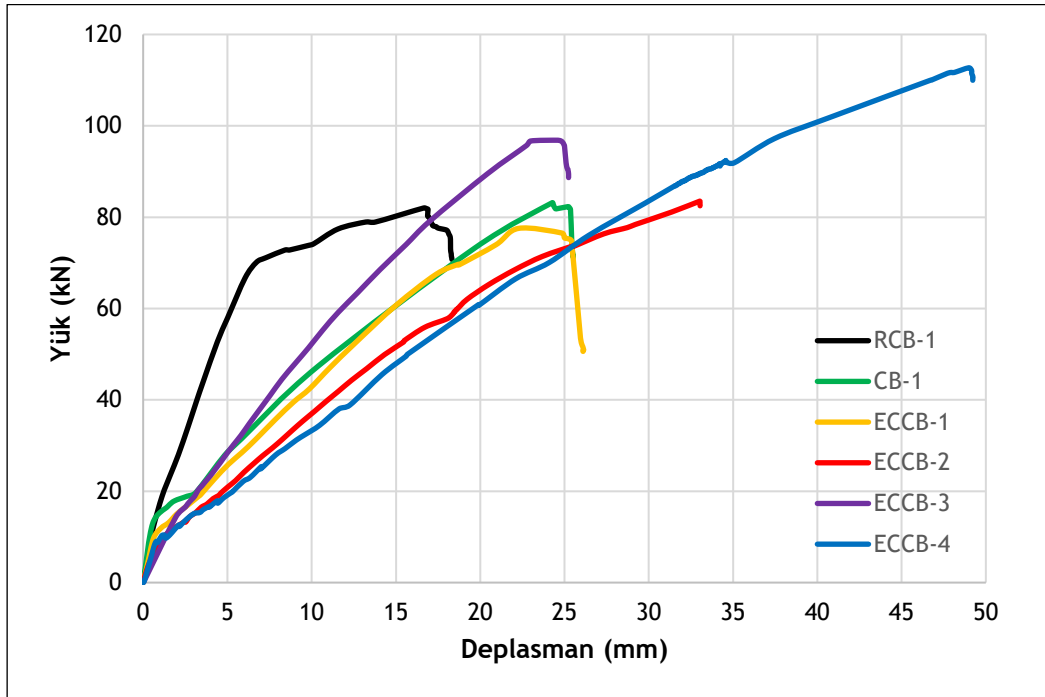
**Şekil 4.43.** ECCB-1,ECCB-2 ve ECCB-4 kirişine ait donatı yük-birim uzama eğrileri

Aynı matris tipine ve farklı boyuna donatı oranına sahip olan ECCB-2 ve ECCB-3 kirişleri incelendiğinde, ECCB-3 kirişi daha yüksek boyuna donatı oranından dolayı daha yüksek yük taşıma kapasitesine ulaşmıştır. Bunun yanında, ECCB-2 kirişi daha yüksek deplasman değerine ulaşmıştır (Şekil 4.44).

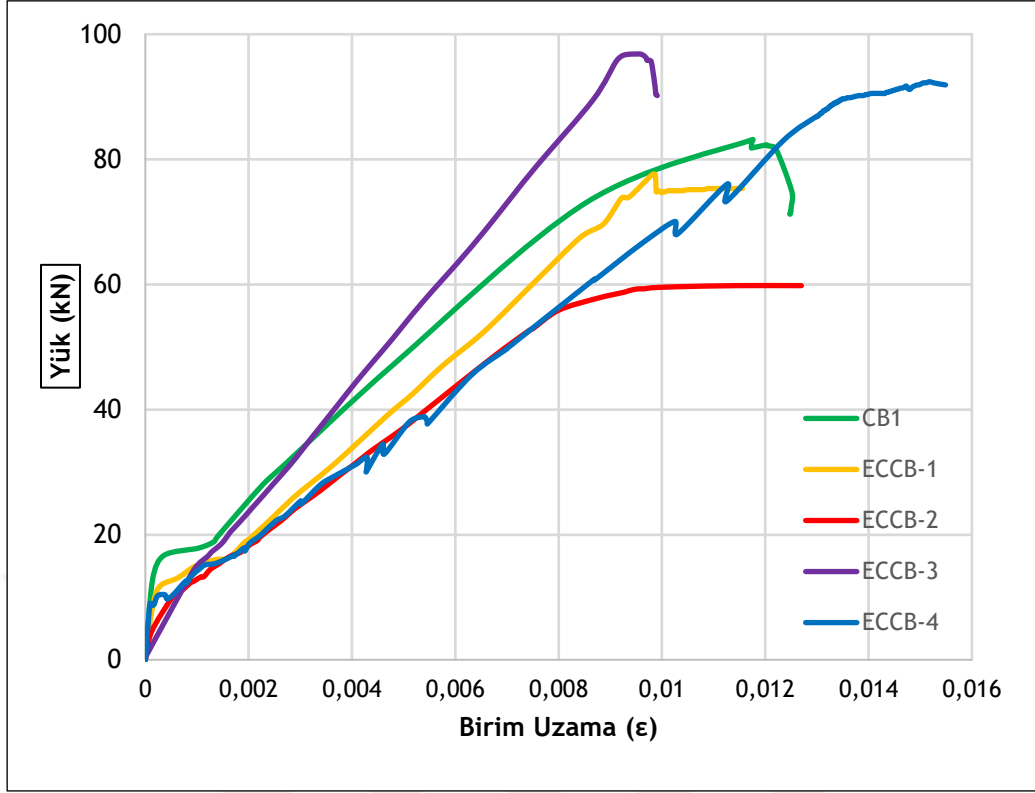


Şekil 4.44. ECCB-2 ve ECCB-3 kirişine ait yük-deplasman eğrileri

Deneyssel çalışma kapsamında test edilen kirişlerden elde edilen yük-deplasman eğrileri ve yük-birim uzama eğrileri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.45'te ve Şekil 4.46'da sunulmuştur.

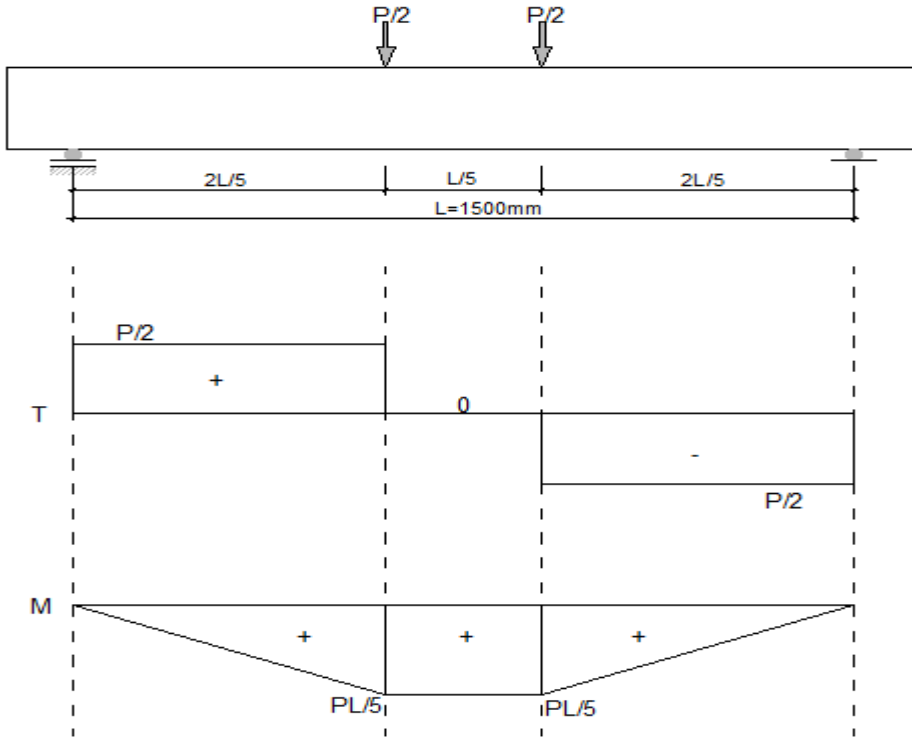


Şekil 4.45. Kirişlere ait yük-deplasman eğrileri



Şekil 4.46. Kirişlere ait donatı yük-birim uzama eğrileri

GFRP donatı içeren kirişlerde denge üstü donatı tasarımı yapıldığından dolayı kirişlerde kırılma biçimini matris yönetmiş ve beton liflerinin tamamen ezilmesiyle taşıma gücüne ulaşılmıştır. GFRP donatıda herhangi bir kopma oluşmamıştır. Deneysel çalışmada ilk çatlak yükü, ilk çatlama esnasında oluşan deplasman, kirişlerin ulaştığı maksimum yük ve deplasman değerleri Tablo 4.3'te verilmiştir. Dört nokta yüklemesi altında kirişte oluşan kesme kuvveti ve moment diyagramı Şekil 4.47'de sunulmuştur. Moment diyagramı yardımıyla kirişin deneysel çatlama momenti ve taşıma gücü momentleri belirlenmiştir.



Şekil 4.47. Kiriş numunelere ait moment diyagramı

Tablo 4.3. Kirişlere ait deneysel sonuçlar

| Numune Adı | Çekme Donatısı | $f'_c$ (MPa) | $P_{cr}$ (kN) | $M_{cr}$ (kN.m) | $\Delta_{cr}$ (mm) | $P_n$ (kN) | $M_n$ (kN.m) | $\Delta$ (mm) | Kırılma Biçimi |
|------------|----------------|--------------|---------------|-----------------|--------------------|------------|--------------|---------------|----------------|
| RCB1       | 2Ø12 (Çelik)   | 45.95 (N.B.) | 12.58         | 3.77            | 0.62               | 81.98      | 24.59        | 18.32         | Çekme          |
| CB1        | 2Ø12 (FRP)     | 48.86 (N.B.) | 12.93         | 3.88            | 0.56               | 83.17      | 24.95        | 25.52         | Basınç         |
| ECCB-1     | 2Ø12 (FRP)     | 48.54 (N.B.) | 11.90         | 3.57            | 1.05               | 77.55      | 23.27        | 26.14         | Basınç         |
|            |                | 61.95 (ECC)  |               |                 |                    |            |              |               |                |
| ECCB-2     | 2Ø12 (FRP)     | 44.31 (N.B.) | 10.88         | 3.26            | 1.46               | 83.51      | 25.05        | 33.04         | Basınç         |
|            |                | 57.48 (ECC)  |               |                 |                    |            |              |               |                |
| ECCB-3     | 3Ø12 (FRP)     | 44.31 (N.B.) | 11.00         | 3.30            | 1.21               | 96.84      | 29.05        | 25.24         | Basınç         |
|            |                | 57.48 (ECC)  |               |                 |                    |            |              |               |                |
| ECCB-4     | 2Ø12 (FRP)     | 57.78 (ECC)  | 10.37         | 3.11            | 1.09               | 112.70     | 33.81        | 49.23         | Basınç         |

(\*) N.B. normal betonu ifade etmektedir.

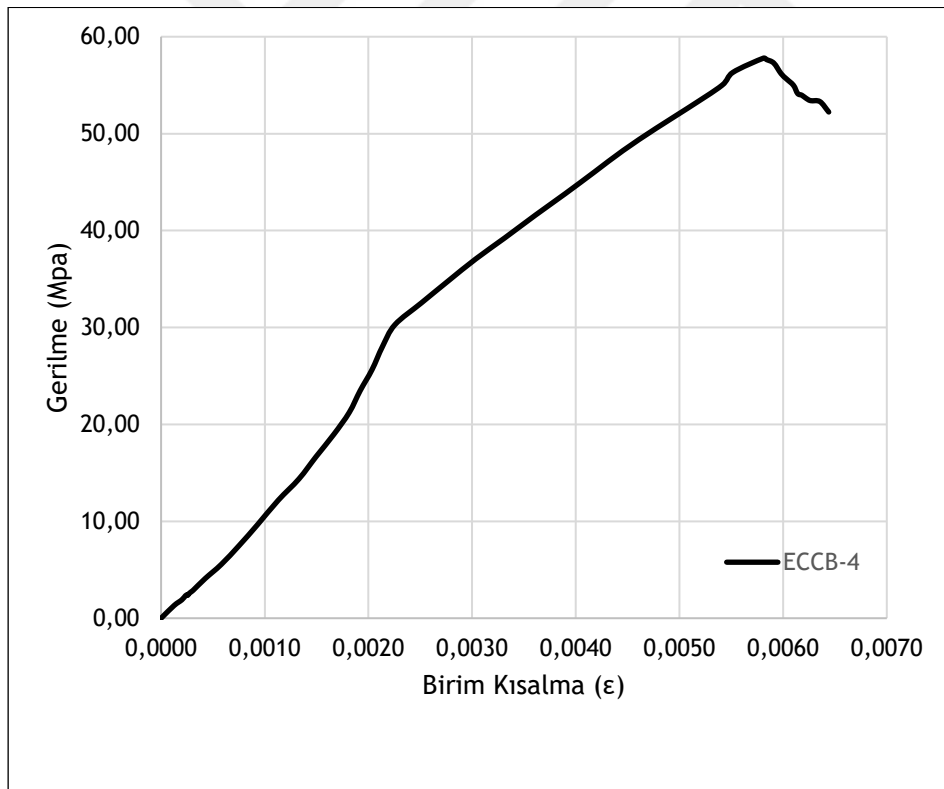
(\*)  $f'_c$ : Beton basınç dayanımı

## 4.2. Analitik Bulgular

Tez çalışması kapsamında test edilen kirişlerin Bölüm (3.2)'de yer alan teorik yöntemlere göre taşıma gücü ve yük-deplasman eğrilerinin belirlenmesi için yapılan analiz sonucu elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur.

### 4.2.1. Kiriş Taşıma Gücü Momenti ve Kırılma Yüğü

Tamamı ECC malzeme ile üretilen ECCB-4 kirişinin analizinde kirişin basınç bölgesi için silindir numuneden elde edilen gerilme-birim deformasyon verileri kullanılmıştır (Şekil 4.48). Yapılan analizler sonucunda, ECCB-4 kirişinde beton birim kısalmasının 0.0064 değerine karşılık bulunan yük taşıma kapasitesi ve taşıma gücü momenti değerleri ile diğer normal beton içeren kirişlerde betonda birim kısalmanın 0.0035 değerine karşılık elde edilen yük taşıma kapasitesi ve taşıma gücü momenti değerleri Tablo 4.4'te sunulmuştur.



Şekil 4.48. ECCB-4 kirişi silindir numune deneysel gerilme-birim deformasyon eğrisi

**Tablo 4.4.** Kirişlere ait teorik sonuçlar

| Numune Adı | A <sub>f</sub><br>(mm <sup>2</sup> ) | b<br>(mm) | d<br>(mm) | f' <sub>c</sub><br>(MPa) | E <sub>s</sub> , E <sub>f</sub><br>(MPa) | ε <sub>cu</sub> | f <sub>tu</sub><br>(MPa) | M <sub>cr</sub><br>(kN.m) | P <sub>cr</sub><br>(kN) | M <sub>n</sub><br>(kN.m) | P <sub>n</sub><br>(kN) |
|------------|--------------------------------------|-----------|-----------|--------------------------|------------------------------------------|-----------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|
| RCB1       | 226                                  | 150       | 171       | 45.95<br>(N.B.)          | 200000                                   | 0.0035          |                          | 4.2                       | 14.00                   | 20.12                    | 67.07                  |
| CB1        | 226                                  | 150       | 171       | 48.86<br>(N.B.)          | 50000                                    | 0.0035          | 1100                     | 4.33                      | 14.43                   | 27.87                    | 92.97                  |
| ECCB-1     | 226                                  | 150       | 171       | 48.54<br>(N.B.)          | 50000                                    | 0.0035          | 1100                     | 3.57                      | 11.90                   | 26.51                    | 88.35                  |
|            |                                      |           |           | 61.95<br>(ECC)           |                                          |                 |                          |                           |                         |                          |                        |
| ECCB-2     | 226                                  | 150       | 171       | 44.31<br>(N.B.)          | 50000                                    | 0.0035          | 1100                     | 4.50                      | 15.00                   | 25.65                    | 85.49                  |
|            |                                      |           |           | 57.48<br>(ECC)           |                                          |                 |                          |                           |                         |                          |                        |
| ECCB-3     | 339                                  | 150       | 171       | 44.31<br>(N.B.)          | 50000                                    | 0.0035          | 1100                     | 4.80                      | 16.00                   | 29.11                    | 97.03                  |
|            |                                      |           |           | 57.48<br>(ECC)           |                                          |                 |                          |                           |                         |                          |                        |
| ECCB-4     | 226                                  | 150       | 171       | 57.78<br>(ECC)           | 50000                                    | 0.0064          | 1100                     | 5.4                       | 18.00                   | 35.14                    | 117.14                 |

Tablo (4.4) incelendiğinde, analiz sonucu elde edilen teorik değerlerin deneysel değerlerle (Tablo 4.3) uyumlu olduğu görülmektedir. Kirişlerden elde edilen deneysel ve teorik sonuçlar arasındaki oransal değerler Tablo 4.5'te sunulmuştur.

**Tablo 4.5.** Kirişlerden elde edilen deneysel ve teorik sonuçlar ile oransal değerler

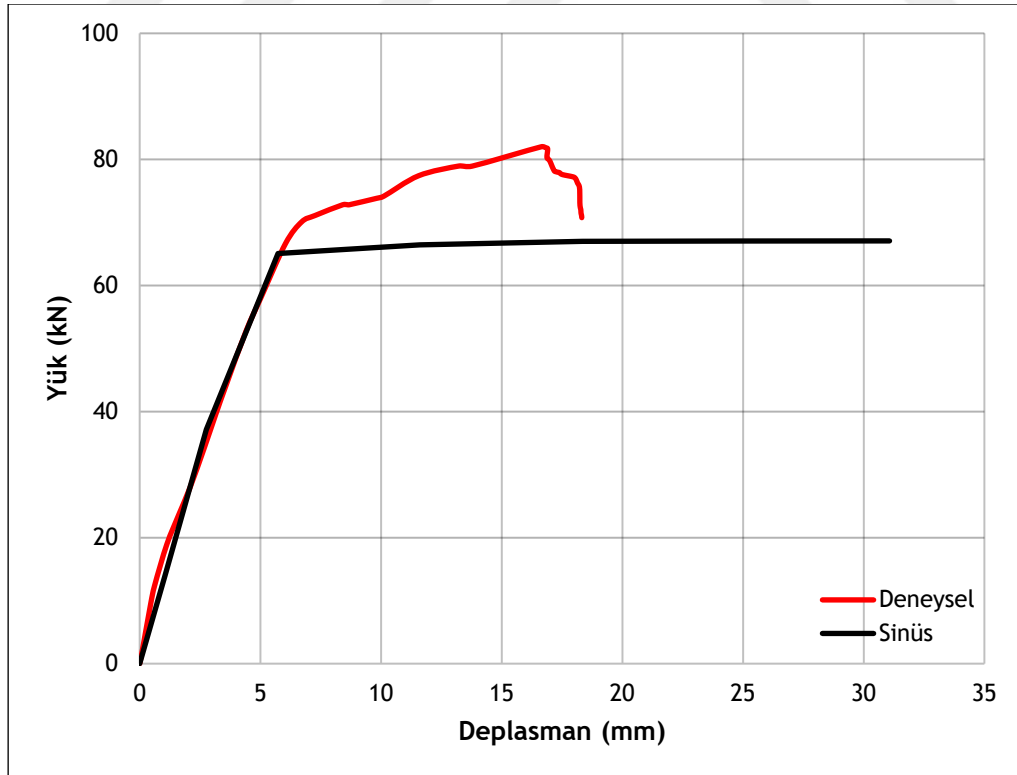
| Kiriş İsmi | Deneysel               |                          | Teorik                 |                          | Oran                           |
|------------|------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------------|
|            | P <sub>d</sub><br>(kN) | M <sub>d</sub><br>(kN.m) | P <sub>t</sub><br>(kN) | M <sub>t</sub><br>(kN.m) | P <sub>t</sub> /P <sub>d</sub> |
| RCB-1      | 81.98                  | 24.59                    | 67.07                  | 20.12                    | 0.82                           |
| CB-1       | 83.17                  | 24.95                    | 92.97                  | 27.87                    | 1.12                           |
| ECCB-1     | 77.55                  | 23.27                    | 88.35                  | 26.51                    | 1.14                           |
| ECCB-2     | 83.51                  | 25.05                    | 85.49                  | 25.65                    | 1.02                           |
| ECCB-3     | 96.84                  | 29.05                    | 97.03                  | 29.11                    | 1.00                           |
| ECCB-4     | 112.70                 | 33.81                    | 117.14                 | 35.14                    | 1.04                           |

#### 4.2.2. Kiriş Deplasmanı

FRP donatılı kirişlerin deplasmanlarının hesaplanmasına yönelik Bölüm 3.2.8’de sunulan ACI 440.1R-15 Yönergesi ve Sinüs Eğrisi Yöntemine göre kiriş deplasmanları teorik olarak hesaplanmıştır. Bu bölümde elde edilen teorik yük-deplasman eğrileri, deneysel yük-deplasman eğrileri ile karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

##### 4.2.2.1. RCB-1 Kiriş Numunesi

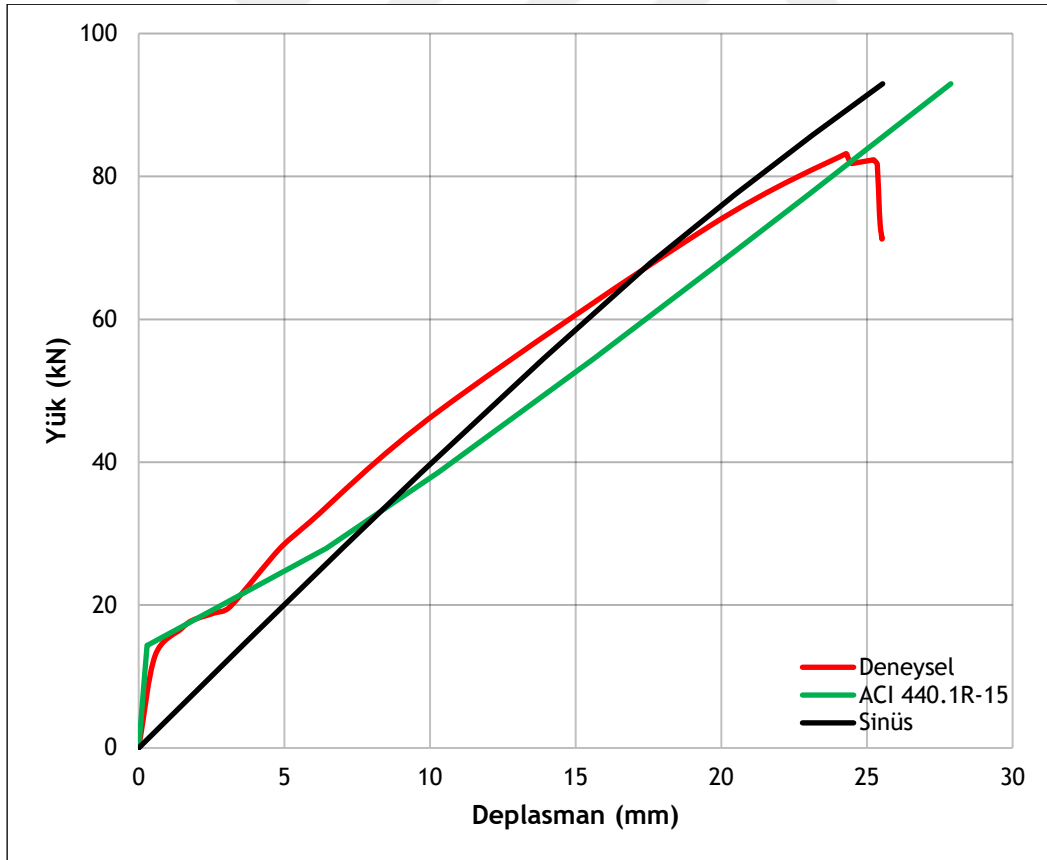
RCB-1 kirişi deplasman hesabında Sinüs Eğrisi Yöntemi kullanılarak analiz yapılmıştır. Şekil 4.49’da RCB-1 kirişinden elde edilen teorik ve deneysel yük-deplasman eğrisi sunulmuştur. Kirişte yükleme başlangıcından yaklaşık olarak taşıma gücü kapasitesine ulaşana kadar deneysel ve teorik sonuçlardan elde edilen eğrilerin büyük oranda birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir. Deneysel eğriden görüleceği üzere, RCB-1 kiriş testinde yaklaşık olarak 70 kN yük değerinden sonra deneysel yük taşıma kapasitesinde artışın yavaşladığı söz konusu noktadan sonra deplasmanda ise önemli düzeyde artış oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.49. RCB-1 kirişinde deneysel ve teorik sonuçlardan elde edilen yük-deplasman eğrileri

#### 4.2.2.2. CB-1 Kiriş Numunesi

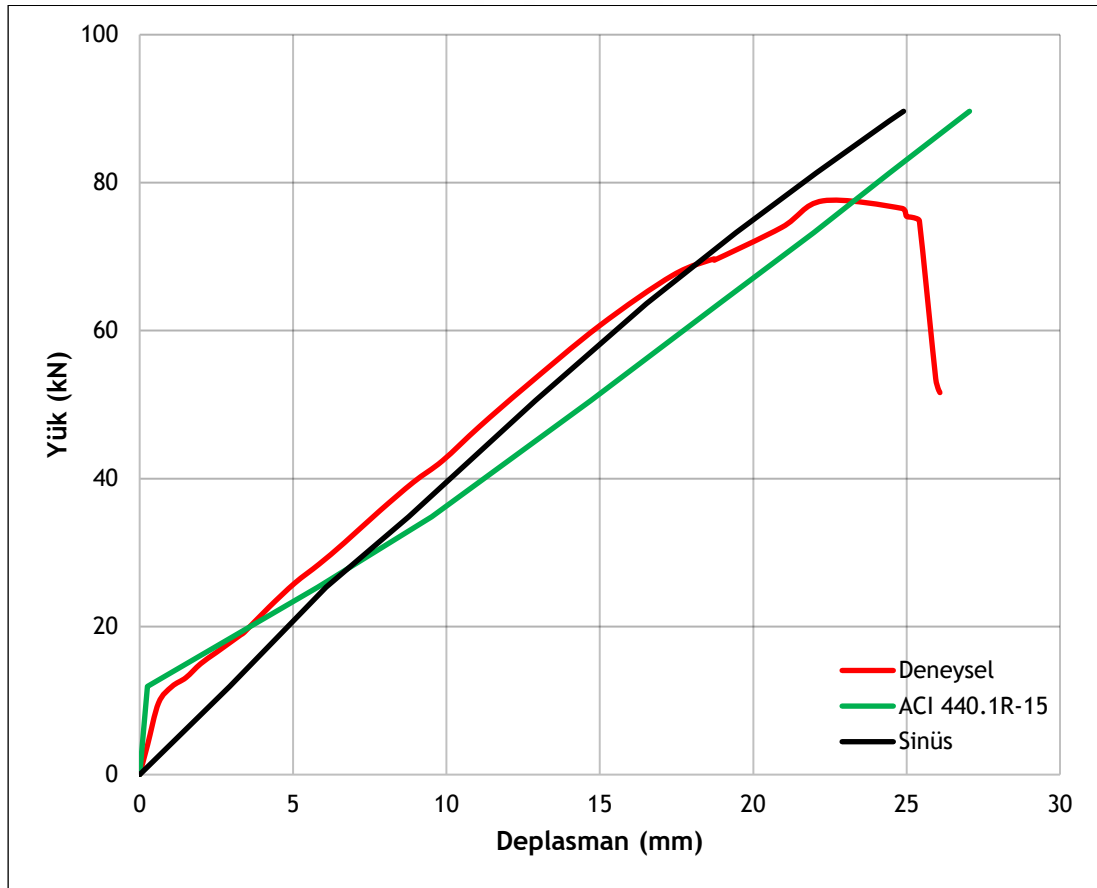
Şekil 4.50’de sunulan, CB-1 kirişinden elde edilen teorik ve deneysel yük-deplasman eğrisi incelendiğinde, yükleme başlangıcından ilk çatlak oluşumuna kadar ACI 440.1R-15’e göre yapılan deplasman hesabı sonucu elde edilen teorik yük deplasman eğrisi ile deneysel yük deplasman eğrisinin oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir. İlk çatlak oluşumu sonrası nihai kırılma yüküne ulaşana kadar teorik eğrinin deneysel eğriden bir miktar uzaklaşarak deneysel eğriye paralel ilerlediği görülmektedir. Grafikten görüleceği üzere yaklaşık olarak aynı yük seviyesi için ACI 440.1R-15’e göre yapılan analiz sonucu kirişin deplasman değeri deneysel değere göre az miktarda daha büyük elde edilmiştir. Sinüs Eğrisi Yöntemi ile elde edilen yük-deplasman eğrisi incelendiğinde, ilk çatlak oluşumuna kadar davranışın deneysel eğriden farklı seyrettiği görülmektedir. Sonraki aşamada kiriş taşıma gücünün yaklaşık %75’i seviyesine kadar gittikçe deneysel yük-deplasman eğrisine yaklaşarak teorik eğrinin deneysel eğri ile uyum içinde olduğu görülmektedir.



Şekil 4.50. CB-1 kirişinde deneysel ve teorik sonuçlardan elde edilen yük-deplasman eğrileri

#### 4.2.2.3. ECCB-1 Kiriş Numunesi

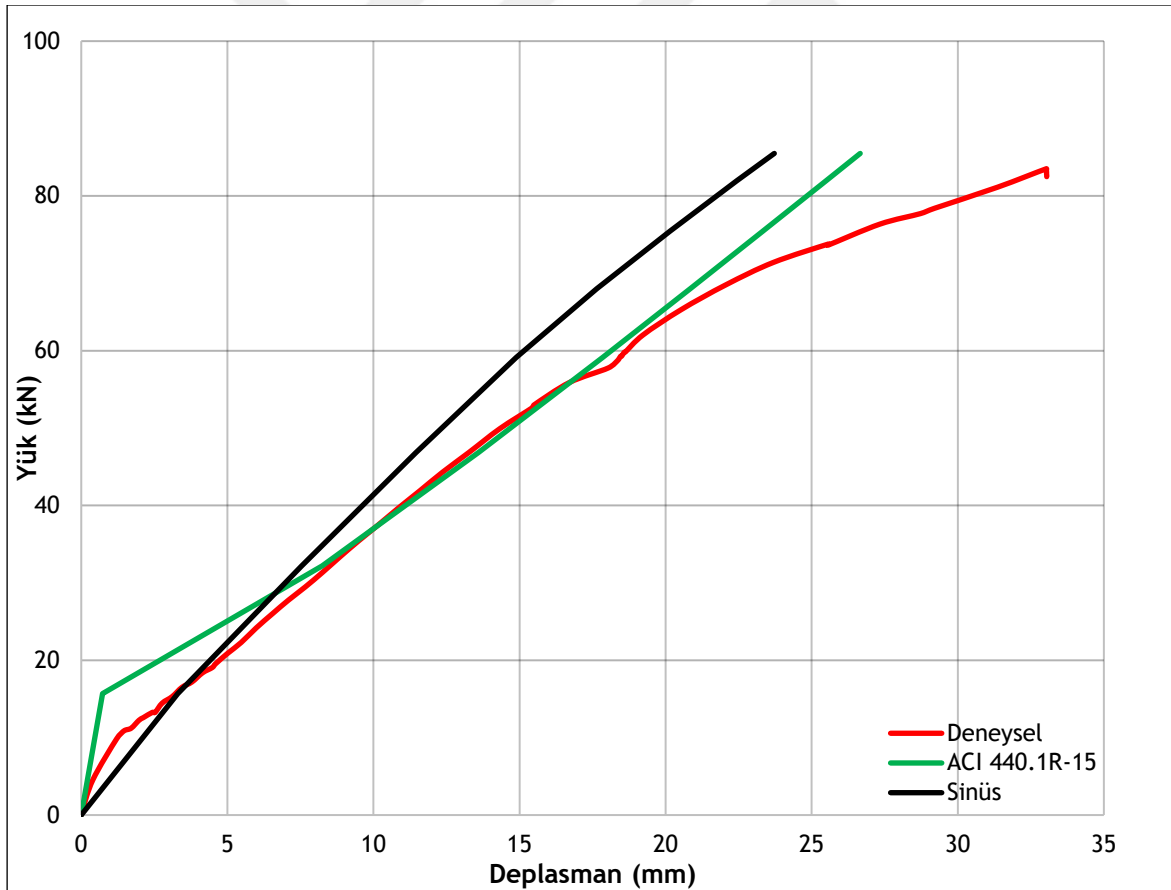
Şekil 4.51’de sunulmuş olan ECCB-1 kirişine ait deneysel ve teorik yük-deplasman eğrileri incelendiğinde ilk çatlak oluşana kadar ACI 440.1R-15’e göre yapılan analiz sonucu elde edilen yük-deplasman eğrisinin deneysel yük-deplasman eğrisi ile oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Bu aşama sonrası maksimum kırılma yüküne ulaşana kadar teorik eğrinin deneysel eğriden az miktarda uzak kaldığı göze çarpmaktadır. Sinüs Eğrisi Yöntemine göre elde edilen teorik eğri incelendiğinde, ilk çatlama aşamasının belirgin biçimde görülmediği belirlenmiştir. Bu aşama sonrası taşıma gücü seviyesine kadar teorik yük-deplasman eğrisi ile deneysel eğrinin oldukça uyumlu olduğu göze çarpmaktadır.



Şekil 4.51. ECCB-1 kirişinde deneysel ve teorik sonuçlardan elde edilen yük-deplasman eğrileri

#### 4.2.2.4. ECCB-2 Kiriş Numunesi

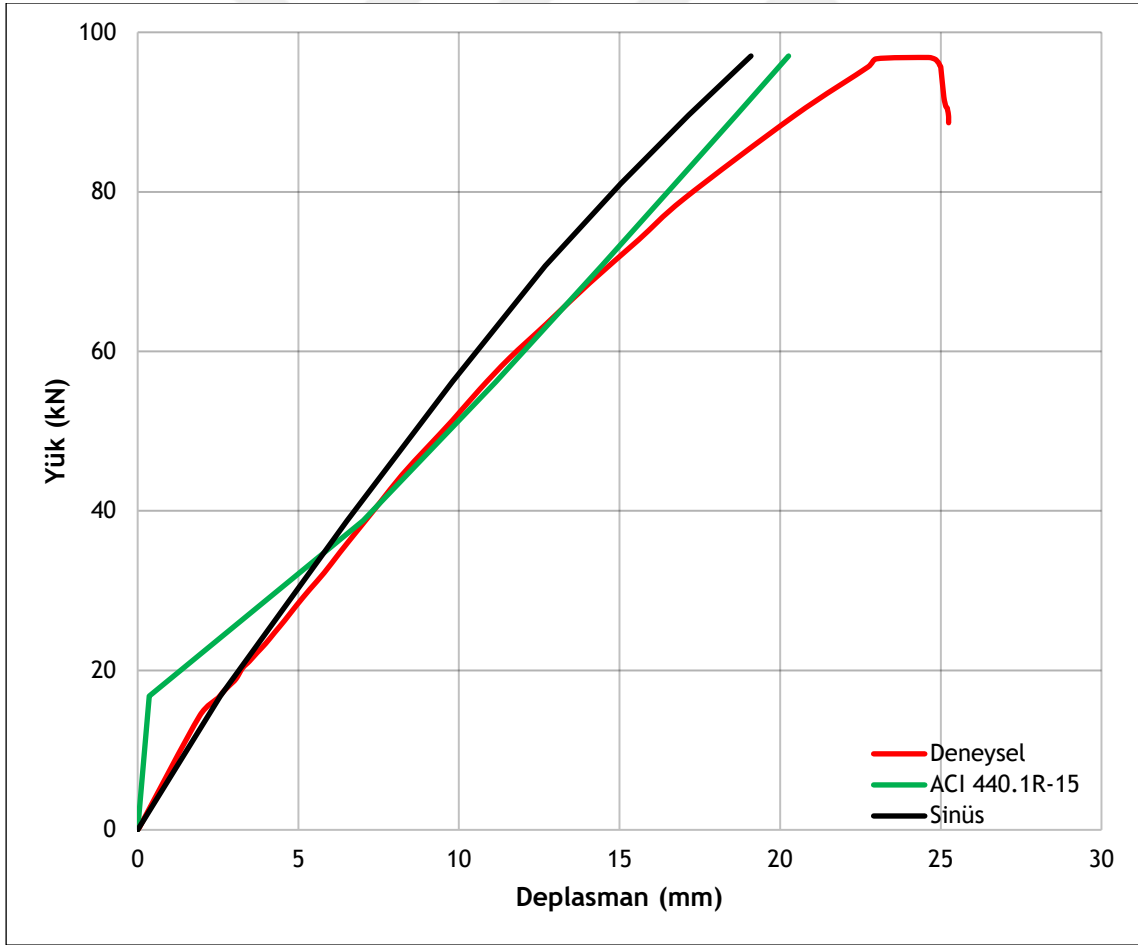
ECCB-2 kirişine ait deneysel ve teorik yük-deplasman eğrileri Şekil 4.52’de sunulmaktadır. ACI 440.1R-15’e göre yapılan analiz sonucu elde edilen yük-deplasman eğrisi incelendiğinde, ilk çatlama esnasında oluşan deplasman açısından teorik eğrinin deneysel eğri ile uyumlu olduğu ancak ilk çatlama yükünün deneysel değerden fazla olduğu görülmektedir. İlk çatlama sonrası nihai kırılma yükünün yaklaşık %30’u seviyelerine kadar teorik eğri ile deneysel eğrinin az miktarda uzak olduğu ancak bu aşamadan sonra taşıma gücünün yaklaşık %75’i seviyesine kadar oldukça uyumlu oldukları göze çarpmaktadır. Bu aşamadan kırılma durumuna kadar teorik eğrinin deneysel eğriden biraz uzaklaştığı görülmektedir. Sinüs Eğrisi Yöntemi ile elde edilen yük-deplasman eğrisi incelendiğinde, diğer FRP donatılı kirişlerde de görüldüğü üzere ilk çatlama anının belirgin olarak görülmediği gözlemlenmiştir. Genel itibarıyla teorik eğrinin deneysel eğriden biraz miktar uzak kaldığı görülmektedir.



Şekil 4.52. ECCB-2 kirişinde deneysel ve teorik sonuçlardan elde edilen yük-deplasman eğrileri

#### 4.2.2.5. ECCB-3 Kiriş Numunesi

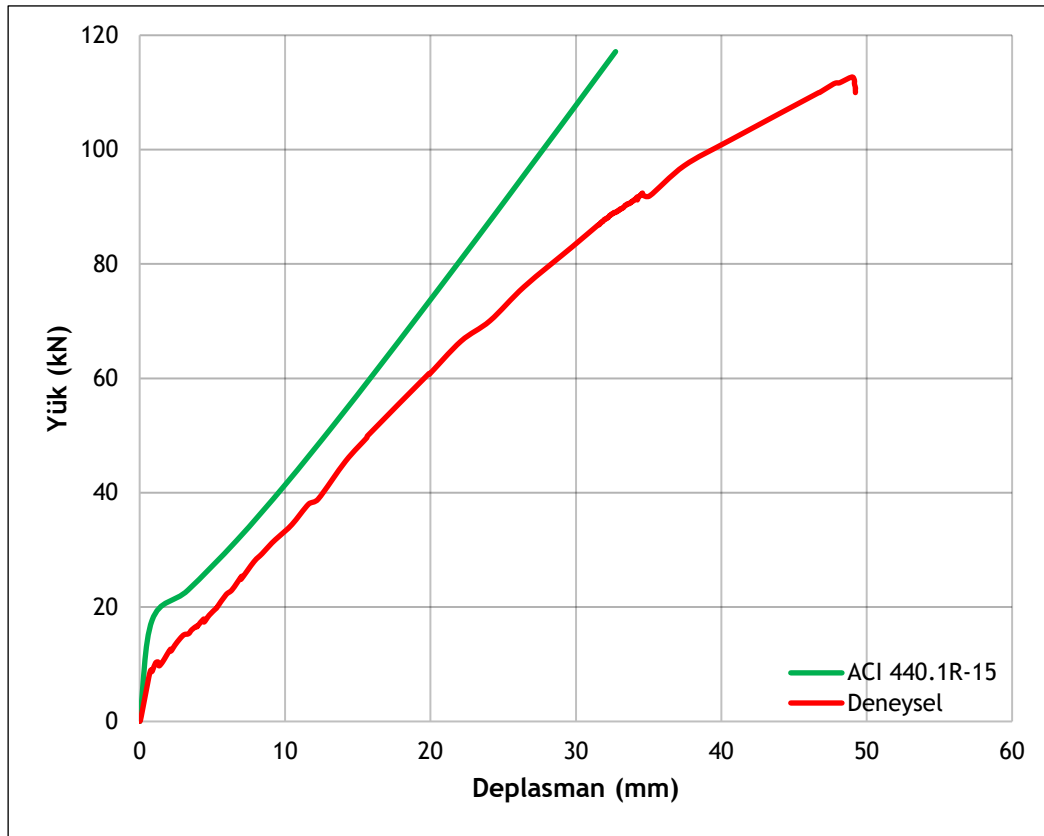
ECCB-3 kirişinden elde edilen Şekil 4.53'te sunulmuş olan deneysel ve teorik yük- deplasman eğrileri incelendiğinde, ACI 440.1R-15'e göre yapılan analiz sonucu elde edilen teorik eğride ilk çatlama yükünün deneysel değer ile uyumlu olduğu bununla birlikte ilk çatlama yüküne denk gelen deplasman değerinin deneysel değerden az olduğu görülmektedir. Kırılma yükünün %35'i ile %75'i arasında teorik eğri ile deneysel eğrinin birbiri ile çok uyumlu olduğu göze çarpmaktadır. Bu aşamadan sonra taşıma gücüne ulaşmaya kadar teorik eğrinin deneysel eğriden bir miktar uzaklaştığı görülmüştür. Sinüs Eğrisi Yöntemi ile elde edilen teorik yük-deplasman eğrisi incelendiğinde, kırılma yükünün yaklaşık %35'i seviyesine kadar teorik yük-deplasman eğrisinin deneysel yük-deplasman eğrisi ile oldukça uyumlu olduğu bu aşamadan sonra nihai kırılma yüküne ulaşmaya kadar teorik eğrinin deneysel eğriden az miktarda uzaklaştığı görülmüştür.



Şekil 4.53. ECCB-3 kirişinde deneysel ve teorik sonuçlardan elde edilen yük-deplasman eğrileri

#### 4.2.2.6. ECCB-4 Kiriş Numunesi

ECCB-4 kirişine ait deneysel ve teorik yük-deplasman eğrileri Şekil 4.54'te sunulmaktadır. ACI 440.1R-15'e göre yapılan analiz sonucu elde edilen teorik eğri incelendiğinde, deneysel eğri ile şekil olarak çok uyumlu oldukları göze çarpmaktadır. Teorik eğride ilk çatlama yük değeri deneysel değere göre daha fazla olup çatlama yüküne denk gelen deplasman değeri hemen hemen aynıdır. İlk çatlak sonrası nihai kırılma yüküne ulaşana kadar teorik eğrinin deneysel eğriden biraz uzak kaldığı görülmektedir.



Şekil 4.54. ECCB-4 kirişinde deneysel ve teorik sonuçlardan elde edilen yük-deplasman eğrileri

Sunulan çalışmada dört nokta yükleme altında test edilen FRP donatılı kiriş numunelerinin yapılan analiz sonucu elde edilen yük-deplasman eğrileri incelendiğinde, genel olarak teorik yük deplasman eğrilerinin deneysel eğrilerle uyumlu olduğu görülmektedir. ACI 440.1R-15'e göre elde edilen teorik eğrinin ilk çatlak oluşumuna kadar deneysel eğri ile uyum içinde olduğu görülmüştür. İlk çatlak sonrası taşıma gücüne ulaşmaya kadar hem ACI 440.1R-15'e göre elde edilen eğrinin hem de Sinüs Eğrisi Yöntemine göre elde edilen eğrinin deneysel eğriden az miktarda uzak kaldığı gözlemlenmiştir.

## 5. SONUÇLAR

Sunulan tez çalışması kapsamında, kiriş yüksekliği boyunca farklı derinliklerde ECC içeren FRP donatılı kirişler ile normal beton içeren kontrol kiriş numunesi üretilerek kirişler eğilme davranışının belirlenmesi amacıyla dört nokta yüklemesi altında test edilmiştir. Deneysel çalışmada test edilen kirişlerin yük taşıma kapasiteleri ve yük-deplasman eğrileri deneysel olarak belirlenmiştir. Çalışmada, ECC derinliğinin ve çekme bölgesindeki GFRP donatı oranının kirişin davranışına etkisi araştırılmıştır. Aynı zamanda kirişlerin analizi için ECC ve normal beton malzemenin doğrusal olmayan davranışını esas alan teorik bir yöntem önerilmiştir. Analizde kirişlerin yük taşıma kapasiteleri belirlenerek, kirişlerin ACI 440.1R-15 Yönergesine göre ve Sinüs Eğrisi Yöntemine göre yük-deplasman eğrileri teorik olarak elde edilmiştir. Çalışmada, test edilen kirişlere ait deneysel sonuçlar ile teorik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

1. Dört nokta yüklemesi altında test edilen ECC içeren kirişlerde kiriş boyunca çok fazla çatlak oluştuğu gözlemlenmiştir. ECC'nin çoklu çatlak oluşturma ve çatlak kontrolü mekanik özelliklerine bağlı olarak kirişte oluşan çatlakların ana çatlak özelliğinde genişlemediği, çatlakların kiriş boyunca yayılım gösterdiği ve kılcal düzeyde kaldığı belirlenmiştir. Yapılan testlerde, kirişlerin yük etkisi altında iyi derecede deplasman sergilediği görülmüştür.
2. Yapılan deneylerde, GFRP donatı içeren kirişlerde beton liflerinin tamamen ezilmesiyle taşıma gücüne ulaşılmış, GFRP donatıda herhangi bir kopma oluşmamıştır. Bu durum GFRP donatı içeren kirişlerde denge üstü kırılma türünün oluştuğunu göstermektedir.
3. Aynı boyuna donatı tipine ve oranına sahip tamamı ECC veya normal beton içeren kirişlerin davranışı incelendiğinde, ECC içeren kirişin yük taşıma kapasitesinin ve kiriş maksimum deplasman değerinin normal beton içeren kirişe kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür. Normal beton içeren kirişte belirli sayıda çatlak görülürken ECC içeren kirişte, kiriş boyunca yayılmış biçimde çok sayıda çatlak olduğu belirlenmiştir. ECC'nin özelliğinden dolayı yükleme boyunca çatlakların gelişiminden çok, sayısının çokça kılcal düzeyde arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum ECC'nin çoklu çatlak oluşturma yeteneğini ve çatlak kontrolü sağlayarak, çatlak genişliğini önemli ölçüde azalttığını doğrular niteliktedir.

4. Donatı oranları aynı olan farklı derinliklerde ECC içeren kirişlerde yükleme boyunca beton ile ECC tabaka arasında ayrışma olmadığı belirlenmiştir. ECC kısmında oluşan çatlakların normal beton boyunca ilerlediği görülmüştür. Kirişlerde ECC derinliğinin artmasıyla taşıma gücü kapasitesinde ve açıklık ortası deplasman değerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte kiriş içerisinde ECC derinliğindeki artışın, donatının daha fazla deformasyon yapmasına izin verdiği tespit edilmiştir.
5. Farklı boyuna donatı oranına sahip ECC içeren kirişler incelendiğinde yüksek donatı oranından dolayı kirişte daha fazla değerde yük taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Bununla birlikte donatı oranı az olan kirişin daha fazla deplasman yaptığı belirlenmiştir.
6. ACI 440.1R-15 Yönergesi ve Sinüs Eğrisi Yöntemine göre yapılan analiz sonucu elde edilen yük-deplasman eğrileri incelendiğinde, ilk çatlak oluşumuna kadar ACI 440.1R-15 Yönergesine göre elde edilen eğrinin deneysel eğri ile uyum içinde olduğu görülmüştür. Elastik bölgede ACI 440.1R-15 Yönergesinin, Sinüs Eğrisi Yöntemine göre deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. İlk çatlak oluşumu sonrası hem ACI 440.1R-15 Yönergesine göre hem Sinüs Eğrisi Yöntemine göre elde edilen eğrinin genel anlamda deneysel eğri ile uyum içinde olduğu teorik eğrilerin deneysel eğriden az miktarda uzak kaldığı belirlenmiştir.

## 6. ÖNERİLER

Yüksek çekme sünekliği ve sıkı çatlak genişliği kontrolüne sahip olan ECC'nin FRP donatılı elemanlarda kullanımının elemanların sünekliğini ve eğilme kapasitesi arttırmada uygun bir yapı malzemesi olabileceği yapılan çalışmalardan görülmektedir. Literatürde, ECC içeren betonarme elemanlar ile normal beton içeren FRP donatılı elemanların davranışı üzerine çok sayıda çalışma yer alırken bu iki malzemenin birlikte kullanımının yapısal elemanlar üzerindeki etkilerinin araştırılması üzerine yeterli sayıda çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, ECC içeren FRP donatılı kirişlerde ECC'nin kirişin eğilme performansına katkısını doğrulamak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışma kapsamında kiriş numunelerden elde edilen deneysel ve teorik sonuçlar değerlendirildiğinde, ECC içeren FRP donatılı kirişlerin davranışının belirlenmesi üzerine daha fazla çalışma yapılmasının mevcut literatüre önemli ölçüde katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Abid, S.R., Shamkhi, M.S., Mahdi N.S. and Daek Y.H. (2018). Mechanical Properties of PP-Based Engineered Cementitious Composites. International Conference on Advances in Sustainable Engineering and Applications (ICASEA), Wasit University, Kut, Iraq. doi: 10.1109/ICASEA.2018.8370972
- American Concrete Institute (ACI), (2006). Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. *Technical Committee Document No: ACI 440.1R-06*, Farmington Hills, Mich. Erişim adresi: <https://www.iranfrp.ir/wp-content/uploads/2018/12/13.pdf>
- American Concrete Institute (ACI). (2015). Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. *Technical Committee Document No: ACI 440.1R-15*, Farmington Hills, MI 48331. Erişim adresi: [https://v1.cedn.yun300.cn/100001\\_1907305015/ACI%20440.1R-.pdf](https://v1.cedn.yun300.cn/100001_1907305015/ACI%20440.1R-.pdf)
- Ali, Y. ve Khan, S.W. (2017). Experimental Study on the Flexural Behavior of Composite RC Beams Having an Engineered Cementitious Composite Layer at the Bottom. *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*, 4(4). Erişim adresi: [http://www.iraj.in/journal/journal\\_file/journal\\_pdf/13-395-150849538144-49.pdf](http://www.iraj.in/journal/journal_file/journal_pdf/13-395-150849538144-49.pdf)
- Ashour. A. (2006). Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars. *Construction and Building Materials*, 20(10), 1005-1015. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.06.023
- Benmokrane, B., Chaallal, O. ve Masmoudi, R. (1995). Glass fibre reinforced plastic (GFRP) rebars for concrete structures. *Construction and Building Materials*, 9(6), 353-364. doi: 10.1016/0950-0618(95)00048-8
- British Institution of Structural Engineers (BISE). (1999). Interim Guidance on the Design of Reinforced Concrete Structures Using Fibre Composite Reinforcement. IstructE, SETO Ltd., London, UK.
- Cai, J., Pan, J. ve Zhou, X. (2017). Flexural behavior of basalt FRP reinforced ECC and concrete beams. *Construction and Building Materials*, 142, 423-430. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.087
- Canadian Standards Association (CSA). (2002). Design and construction of building components with fiber-reinforced polymers. CSA S806-02, Mississauga, Ontario, Canada Erişim adresi: <http://www.ictturkey.com/assets/images/can.csa.s806-02.pdf>

- Ehsani, M. R., Saadatmanesh, H., ve Tao, S. (1996). Design Recommendations for Bond of GFRP Rebars to Concrete. *Journal of Structural Engineering*, 122(3), 247–254. doi:10.1061/(asce)0733-9445(1996)122:3(247)
- Fico, R. (2006). Limit States Design of Concrete Structures Reinforced with Frp Bars. *Doktora tezi*. Erişim adresi: [http://www.fedoa.unina.it/1896/1/Fico\\_Ingegneria\\_dei\\_Materiali\\_e\\_delle\\_Strutture.pdf](http://www.fedoa.unina.it/1896/1/Fico_Ingegneria_dei_Materiali_e_delle_Strutture.pdf)
- Ge, W.J., Ashour, A.F., Ji, X., Cai, C. ve Cao, D.-F. (2018). Flexural behavior of ECC-concrete composite beams reinforced with steel bars. *Construction and Building Materials*, 159, 175-188. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.10.101
- Ge, W.J., Ashour, A. F., Cao, D., Lu, W., Gao, P., Yu, J., ... Cai, C. (2019). Experimental study on flexural behavior of ECC-concrete composite beams reinforced with FRP bars. *Composite Structures*, 208, 454-465. doi:10.1016/j.compstruct.2018.10.026
- Ge, W.J., Ashour, A.F., Yu, J., Gao, P., Cao, D.-F., Cai, C. ve Ji, X. (2019). Flexural Behavior of ECC-Concrete Hybrid Composite Beams Reinforced with FRP and Steel Bars. *Journal of Composites for Construction*, 23(1). doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000910
- Gemi, L., Köroğlu, M.A. (2018). Çekme Bölgesi Lifli Beton Olan Cam Fiber Takviyeli Polimer (GFRP) ve Çelik Donatılı Etriyesiz Kirişlerin Eğilme Etkisi Altındaki Davranışı ve Hasar Analizi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(4), 654-667. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/572577>
- Goldston, M.W. (2016). Behaviour of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars Under Static and Impact Loading. *Doktora tezi*. Erişim adresi: <https://ro.uow.edu.au/theses/4846/>
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE). (1997). Recommendations for design and construction of concrete structures using continuous fibre reinforced materials. *Research Committee on Continuous Fiber Reinforced Materials*, A. Machida, ( Ed.), Tokyo. Erişim adresi: <http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00670/No30/CLI-30-0001.pdf>
- Kanda, T. Watanabe, S. ve Li, V.C. (1998). Application of Pseudo Strain-Hardening Cementitious Composites to Shear Resistant Structural Elements. *Fracture Mechanics of Concrete Structures Proceedings FRAMCOS-3*, 1477-1490. AEDIFICATIO Publishers, D-79104 Freiburg, Germany. Erişim adresi: [https://www.researchgate.net/publication/244296416\\_Application\\_of\\_pseudo\\_strain\\_hardening\\_cementitious\\_composites\\_to\\_shear\\_resistant\\_structural\\_elements](https://www.researchgate.net/publication/244296416_Application_of_pseudo_strain_hardening_cementitious_composites_to_shear_resistant_structural_elements)
- Kara, İ.F. ,Cullazoğlu, F. ve Severcan, M.H. (2016). Enine ve Boyuna FRP Donatılı Betonarme Kirişlerin Kesme Dayanımı. *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(2), 157-167. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/280424>

- Kassem,C., Farghaly,A.S. ve Benmokrane, B. (2011 ). Evaluation of Flexural Behavior and Serviceability Performance of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars. *Journal of Composites for Construction* 15(5), 682-695. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000216
- Keoleian,G.A. ,Kendal, A.M. ,Lepech, M.D.ve Li,V.C. (2006). Guiding the Design and Application of New Materials for Enhancing Sustainability Performance: Framework and Infrastructure Application. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 895. doi: 10.1557/PROC-
- Lau, D., ve Pam, H. J. (2010). Experimental study of hybrid FRP reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 32(12), 3857–3865. doi:10.1016/j.engstruct.2010.08.028
- Li, V.C. (1993). From micromechanics to structural engineering – the design of cementitious composites for civil engineering applications. *JSCE J. of Struc. Mechanics and Earthquake Engineering* 10(2), 37-48. Erişim adresi: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/1993/471/1993\\_471\\_1/\\_pdf](https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej1984/1993/471/1993_471_1/_pdf)
- Li, V.C. (2003). On Engineered cementitious composites (ECC) - a review of the material and its applications. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 1(3), 215-230. Erişim adresi:[https://www.researchgate.net/publication/237783722\\_On\\_Engineered\\_Cementitious\\_Composites\\_ECC\\_A\\_Review\\_of\\_the\\_Material\\_and\\_Its\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/237783722_On_Engineered_Cementitious_Composites_ECC_A_Review_of_the_Material_and_Its_Applications)
- Li, V.C. (2007). Engineered Cementitious Composites (ECC) Material, Structural, and Durability Performance. *Concrete Construction Engineering Handbook*. Erişim adresi: [https://www.researchgate.net/publication/268273534\\_Engineered\\_Cementitious\\_Composites\\_ECC\\_-\\_Material\\_Structural\\_and\\_Durability\\_Performance](https://www.researchgate.net/publication/268273534_Engineered_Cementitious_Composites_ECC_-_Material_Structural_and_Durability_Performance)
- Li, V.C. ve Kanda, T. (1998). Innovations Forum: Engineered cementitious composites for structural applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(2), 66-69. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1998)10:2(66)
- Li, V.C.ve Wang, S. (2002). Flexural Behaviors of Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Reinforced Engineered Cementitious Composite Beams. *ACI Materials Journal*, 99 (1), 11-21  
Eriřimadresi:[https://www.researchgate.net/publication/279577689\\_Flexural\\_Behavior\\_s\\_of\\_glass\\_fiberreinforced\\_polymer\\_GFRP\\_reinforced\\_engineered\\_cementitious\\_composite\\_beams](https://www.researchgate.net/publication/279577689_Flexural_Behavior_s_of_glass_fiberreinforced_polymer_GFRP_reinforced_engineered_cementitious_composite_beams)
- Liu, H., Zhang, Q., Li, V.C., Su, H. ve Gu,C. (2017). Durability study on engineered cementitious composites (ECC) under sulfate and chloride environment. *Construction and Building Materials*, 133, 171-181. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.074
- Mansour, F.R., Parniani, S. ve Ibrahim, I.S. (2011). Experimental Study on Effects of Steel Fiber Volume on Mechanical Properties of SFRC. *Advanced Materials Research*, 214,144-148. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.214.144

- Maranan, G. B., Manalo, A. C., Benmokrane, B., Karunasena, W., Mendis, P. ve Nguyen, T. Q. (2019). Flexural behavior of geopolymer-concrete beams longitudinally reinforced with GFRP and steel hybrid reinforcements. *Engineering Structures*, 182, 141-152. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.12.073
- Meng, D., Lee, C.K. ve Zhang, Y.X. (2017). Flexural and shear behaviours of plain and reinforced polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite beams. *Engineering Structures*, 151, 261-272. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.08.036
- Rana, M.M, Lee, C. K., Al-Deen S., Zhang, Y. X. (2018). Flexural Behaviour of Steel Composite Beams Encased by Engineered Cementitious Composites. *Journal of Constructional Steel Research*, 143, 279-290. doi: 10.1016/j.jcsr.2018.01.004
- Rangan, B. V.(1990). Strength of Reinforced Concrete Slender Columns. *ACI Structural Journal*, 87(1), 32–38.
- Razaqpur, A.G., Isgor, B.O., Greenaway, S. ve Selley, A. (2004). Concrete contribution to the shear resistance of fiber reinforced polymer reinforced concrete members. *Journal of Composite for Construction*, 8(5), 452–460. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2004)8:5(452)
- Rizkalla, S., Hassan T., ve Hassan, N. (2003). Design Recommendations for the use of FRP for Reinforcement and Strengthening of Concrete Structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 5 (1), 16–28. doi: 10.1002/pse.139
- Qin, F., Zhang, Z.,Yin, Z.,Di, J., Xu,L.ve Xu, X. (2020) .Use of high strength, high ductility engineered cementitious composites (ECC) to enhance the flexural performance of reinforced concrete beams. *Journal of Building Engineering* 32, 101746. doi: 10.1016/j.jobe.2020.101746
- Said, M., Mustafa ,T.S. , Shanour, A.S. ,Khalil, M.M. (2020). Experimental and Analytical Investigation of High Performance Concrete Beams Reinforced with Hybrid Bars and Polyvinyl Alcohol Fibers. *Construction and Building Materials*, 259. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120395
- Shanour , A.S., Said, M., Arafa A.I. ve Maher, A.(2018) Flexural performance of concrete beams containing engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials* 180, 23-34. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.238
- Siva,M., Sasikumar T., Aravind Raj, P.S. ve Divahar R.(2020) Ductility enhancement of reinforced concrete beam using Engineered Cementitious Composites in the tension zone. *Materials Today:Proceedings*, 33,189-195. doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.792
- Sun, Z., Wu, G., Zhang, J., Zeng, Y., ve Xiao, W. (2017). Experimental study on concrete columns reinforced by hybrid steel-fiber reinforced polymer (FRP) bars under

- horizontal cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 130, 202–211. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.10.001
- Şahmaran, M., ve Li, V.C. (2008). Durability of mechanically loaded engineered cementitious composites under highly alkaline environments. *Cement and Concrete Research*, 30 (2), 72-81. doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.09.004
- Şahmaran, M., Özbay, E., Yücel, H.E., Lachemi, M. ve Li, V.C. (2012). Frost resistance and microstructure of Engineered Cementitious Composites: Influence of fly ash and micro poly-vinyl-alcohol fiber. *Cement and Concrete Composites*, 34(2),156-165. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.10.002
- Taşdemir, M.A. ve Bayramov, F. (2002). Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı. *İTÜ Dergisi/d Mühendislik* 1(2), 125-144. Erişim adresi: [http://itudergi.itu.edu.tr/index.php/itudergisi\\_d/article/viewFile/829/753](http://itudergi.itu.edu.tr/index.php/itudergisi_d/article/viewFile/829/753)
- Triantafillou, T. C., Deskovic, N. ve Deuring, M. (1992). Strengthening of Concrete Structures With Prestressed Fiber Reinforced Plastic Sheets. *ACI Structural Journal*, 89(3), 235-244.Erişimadresi:[https://www.researchgate.net/publication/279622980\\_Strengthening\\_of\\_concrete\\_structures\\_with\\_prestressed\\_FRP\\_sheets](https://www.researchgate.net/publication/279622980_Strengthening_of_concrete_structures_with_prestressed_FRP_sheets)
- Ünsal, İ., Tokgöz, S., Çağatay, İ.H. ve Dündar, C. (2017). A study on load-deflection behavior of two-span continuous concrete beams reinforced with GFRP and steel bars. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 63(5), 629-637. doi: <https://doi.org/10.12989/sem.2017.63.5.629>
- Ünsal, İ., Tokgöz, S., Çağatay, İ.H. ve Dündar, C. (2018). Hibrit Donatılı Basit Mesnetli Kirişlerin Yük-Deplasman İlişkisinin İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33(2), 45-56. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/619040>
- Vandewalle, L., Nemegeer, D., Balazs, L., Barr, B., Barros, J., Bartos, P.,... Walraven, J.(2003). RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete' - sigma-epsilon-design method - Final Recommendation. *Materials and Structures* 36, 560-567.Erişim adresi: <https://www.rilem.net/images/publis/1507.pdf>
- Yavuz, G. (2011). Lif Takviyeli Polimerlerin Betonarme Kirişlerde donatı Olarak Kullanımı. *e-Journal of New World Sciences Academy* , 6( 4). Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/186152>
- Yinghao, L. ve Yong, Y. (2013). Arrangement of Hybrid Rebars on Flexural Behavior of HSC Beams. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 22-31.doi: 10.1016/j.compositesb.2012.08.023
- Yuan, F. , Pan, J., Dong, L. ve Leung, C. K. Y. (2014). Mechanical Behaviors of Steel Reinforced ECC or ECC/Concrete Composite Beams under Reversed Cyclic Loading. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(8). Erişim adresi:

[https://www.researchgate.net/publication/276099873\\_Mechanical\\_Behaviors\\_of\\_Steel\\_Reinforced\\_ECC\\_or\\_ECCConcrete\\_Composite\\_Beams\\_under\\_Reversed\\_Cyclic\\_Loading](https://www.researchgate.net/publication/276099873_Mechanical_Behaviors_of_Steel_Reinforced_ECC_or_ECCConcrete_Composite_Beams_under_Reversed_Cyclic_Loading)

- Yuan, F., Pan, J. ve Leung, C. K. Y , (2013). Flexural Behaviors of ECC and Concrete/ECC Composite Beams Reinforced with Basalt Fiber-Reinforced Polymer. *Journal of Composite for Construction*, 17, 591-602. doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000381
- Zhang, Y., Bai, S., Zhang, Q., Xie, H. ve Zhang, X. (2015). Failure behavior of strain hardening cementitious composites for shear strengthening RC member. *Construction and Building Materials*, 78, 470–473. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.01.037
- Zhang, Y., Deng, M., Dong Z. (2019). Seismic response and shear mechanism of engineered cementitious composite (ECC) short columns. *Engineering Structures*, 192, 296–304. doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.019