



ÇEKME BÖLGESİ LİFLİ BETON OLAN CAM FİBER TAKVİYELİ POLİMER (GFRP) ve ÇELİK DONATILI ETRİYESİZ KİRİŞLERİN EĞİLME ETKİSİ ALTINDAKİ DAVRANIŞI ve HASAR ANALİZİ

¹Lokman GEMİ, ²Mehmet Alpaslan KÖROĞLU

¹Necmettin Erbakan Üniversitesi, Meram Meslek Yüksekokulu, KONYA

²Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, KONYA

¹lgemi@konya.edu.tr, ²makoroglu@konya.edu.tr

(Geliş/Received: 10.03.2018; Kabul/Accepted in Revised Form: 04.05.2018)

ÖZ: Donatı çeliğinde meydana gelen korozyon, yapı elemanlarının önemli problemlerinden biri haline gelmiştir. Bu yüzden son yıllarda, Elyaf Takviyeli Polimerler (FRP), korozyon dayanımı yüksek olması sebebiyle, çelik donatılara alternatif olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca, FRP donatıların yüksek dayanımı, hafif olması ve kimyasal etkilere karşı dayanımı özellikle endüstriyel alandaki kullanımını arttırmıştır. Bu çalışmada, çekme bölgesinde 5 cm yüksekliğinde polipropilen lif katkı betonun kullanıldığı çelik ve Cam Elyaf Takviyeli Polimer (GFRP) donatılı etriyesiz kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışı deneysel olarak incelenmiş ve devamında hasar analizleri yapılmıştır. Bu amaçla geleneksel çelik ve GFRP donatılı etriyesiz kirişler üretilmiş ve üç noktalı eğilme testleri yapılmıştır. Eğilme testleri sonrasında eğilme dayanımları hesaplanarak yük-deplasman grafikleri oluşturulmuş, malzeme davranışındaki farklılıklar incelenmiştir. Deneylerden sonra GFRP donatılarda oluşan hasarlar incelenmiş ve hangi hasar modları olduğu tespit edilmiştir. Çalışmalar sonucunda GFRP donatılı kirişlerin eğilme performanslarının büyük oranda arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Hasar analizi, GFRP donatı, Kompozit beton, Kompozit kiriş,

Bending Behavior and Failure Analysis of GFRP and Steel Rebar Reinforced Beam Without Transverse Reinforcement with Fiber Reinforced Concrete in Tension Zone

ABSTRACT: Corrosion on steel reinforcement has been one of the most essential problems in construction materials. Therefore, in the last decade FRP re-bars have been widely used instead of traditional steel reinforcement because of Fiber Reinforced Polymers (FRP) having high corrosion resistance. FRP composites have attracted the attention of researchers in the field of industry due to high strength, lightweight and non-magnetic properties. In addition, high strength of FRP re-bars, being lightweight and chemical resistant properties have increased its use especially in industrial areas. In this study, bending behaviors of beams having steel and Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) re-bars with 5 cm high polypropylene fiber reinforced concrete in tensile zone were investigated experimentally and damage analysis were carried out. For this purpose, three-point bending tests were performed to conventional steel and GFRP reinforced beams. After bending tests, bending strengths were calculated and load-deflection graphs were created and differences in material behavior were investigated. After the tests, damages GFRP re-bars were investigated and the modes of fractures were determined. As a result of the studies, it is observed that GFRP reinforced beams has increased the bending performance significantly.

Key Words: Failure analysis, GFRP rebar, Composite concrete, Composite beam

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yapıda kesme, çekme, basınç, burulma vb. etkilere maruz kalan elemanlarda sadece basınca dayanıklı olan beton yetersiz kalmış, böylece süneklik sağlayan çelik ile bir arada kullanılarak kompozit malzeme olan betonarme elde edilmiştir. Betonun, havadaki bağıl nem, maruz kaldığı çevresel faktörler sonucu oluşan donma-çözünme olayları, deniz suyu veya yetersiz paspayı nedeniyle donatı çeliğinde meydana gelen korozyon, yapı sektörünün en önemli problemlerinden birini teşkil eder. Korozyon sonucu iki malzeme arasındaki aderans yok olmakta ve beton donatısız kalmaktadır. Bu problem sonucunda betonarme yapının ömrü kısalmakta ve zaman alan yüksek maliyetli onarım ve güçlendirme gerekmektedir. Böylece yapılarda meydana gelebilecek hasarlar veya ani göçmeler ile oluşacak can-mal kayıplarının önüne geçmek amacıyla korozyona dayanıklı malzeme arayışına gerek duyulmuştur.

GFRP donatı elemanı, bu soruna çözüm getirebilecek alternatif bir yapı malzemesidir. Donatıların içeriğinde bulunan cam elyaf kombinasyonları sonucu St37 çeliği mukavemetinin GFRP donatının içinde kullanılan elyafın türüne göre yaklaşık 3 katına ulaşan, kullanım kolaylığı bakımından hafif olan malzeme korozyona oldukça dayanıklıdır. Çelik donatılara kıyasla yüksek çekme dayanımına sahip olan malzeme aynı zamanda daha düşük bir elastisite modülüne sahiptir. Bu nedenle yük altında bulunan GFRP donatılı kirişlerde hasar sonucu önemli rijitlik kaybı ve buna bağlı olarak taşıyabileceği yük düzeyinde bile büyük deplasmanlar oluşur.

Özellikle son 15 yılda FRP donatılı betonarme elemanların eğilme etkisi altındaki davranışlarını inceleyen birçok çalışma yapılmıştır (Kara ve diğ., 2015; Kara ve diğ., 2016; Köroğlu, 2016; Köroğlu ve Özdöner, 2016). Bunun yanında FRP yapılar kolon güçlendirmesinde sargı etkisi de yapacak şekilde kullanılmaktadır (Gemi ve diğ., 2018). Fakat yapılan çalışmalar normal çelik donatılı kirişlerin kesme dayanımı ile ilgili olarak yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında yeterli düzeyde bulunmamıştır. Bu bölümde FRP donatılı betonarme kirişlerin eğilme ve kesme dayanımına yönelik olarak yapılan çalışmalara yer verilecektir. Almusallam tarafından yapılan çalışmada, artımsal deformasyon yöntemine dayandırarak FRP donatılı betonarme kirişlerde oluşan deplasmanların hesabı için numerik bir çözüm yöntemi geliştirmiştir (Almusallam, 1997). Geliştirilen bu yöntemde, betonun basınç etkisi altındaki en uç lifinde oluşan şekil değiştirme değeri ve kesitte oluşan tarafsız eksen değeri iteratif bir yöntemle elde edilmektedir. Barris ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, cam lif takviyeli polimer (GFRP) donatılı betonarme kirişleri iki noktasal yük etkisi altında deneysel olarak yüklemeye tabi tutarak, gerek kirişlerdeki donatı oranının, gerekse etkili derinlik/kesit yüksekliği oranının davranışa olan etkisini araştırmıştır (Barris ve diğ., 2009). Bununla birlikte ACI 440-06 (2006)'nın önerdiği etkili atalet momentleri aracılığı ile elde edilen deplasman değerlerini deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Servis yükleri düzeyinde bu modellerin uygun sonuçlar verdiği fakat yükün taşıma gücüne yaklaştığı durumlarda sonuçlarda farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir.

Kassem ve arkadaşları, karbon, cam ve aramid lif takviyeli polimer (CFRP, GFRP, AFRP) donatılı 24 adet betonarme kirişi deneysel olarak yüklemeye tabi tutmuşlar ve bu kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışını ayrıntılı bir şekilde irdelemişlerdir. Bu çalışma sonunda deneysel olarak yüklemeye tabi tutulan tüm kirişlerin betonun ezilme birim kısılmasına erişince taşıma gücüne ulaştıkları gözlemlenmiştir (Kassem ve diğ., 2011). Gravina ve arkadaşı, FRP donatılı sürekli betonarme kirişlerin analizi için analitik bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yöntemde uygulanan yüklerin etkisi altında eğilmeden dolayı oluşan çatlama modelleri ve aderans etkisinin ve beton örtü tabakasının davranış üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Gravina ve Smith, 2008). Betonarme kirişlerde eğilme donatısı olarak cam lifli polimer (GFRP) donatının kullanılabilirliğini araştırılmıştır. Deneysel olarak yüklemeye tabi tutulan GFRP donatılı sürekli kirişlerden elde edilen değerleri aynı donatı tipi ve oranına sahip basit mesnetli kirişler ve normal çelik donatılı sürekli kirişlerden elde edilen değerlerle karşılaştırmışlardır. Çalışma kapsamında karşılaştırılan parametreler kirişlerin kırılma şekli, çatlama boyutu ve şekli, donatılardaki şekil değiştirmeler ve yüklerin dağılımını içermektedir (Habeeb ve Ashour, 2008). Razaqpur ve arkadaşları, FRP donatılı betonarme kirişlerde oluşan deplasmanların hesabı için moment eğrilik ilişkisine

dayandırdıkları analitik bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yöntemde ilk etapta tüm kirişi tamamen çatlamış olarak kabul etmekte ve daha sonra çatlamasının oluşmadığı bölgelerde gerekli düzenlemeleri yaparak elde ettikleri eğrilik değerlerinden deplasmanları hesaplamaktadırlar (Razaqpur ve diğ., 2000).

GFRP donatılı basit mesnetli betonarme kirişlerde oluşan deplasmanların elde edilmesi için ACI 440.1.R-06 (2006) tarafından önerilen denklemlerin uygulanabilirliğini araştırılmış ve önerilen bu denklemlerin iyi sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir (Toutanji ve Saafi, 2000). Vijay ve arkadaşı, GFRP donatısı içeren betonarme kirişlerin taşıma gücü momentini hesaplamak için ACI 318-99 (1999) ve ACI 440.1.R-01 (2001) yönetmeliklerinde önerilen denklemlere benzer basit bir model geliştirmiş ve bu modelden elde ettikleri sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasından oldukça uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir (Vijay ve GangaRao, 2001). Kesit içerisinde GFRP ve çelik donatı içeren 12 adet hibrit betonarme kirişi deneysel olarak yüklemeye tabi tutulmuş ve eğilme etkisi altındaki davranışını ayrıntılı bir şekilde araştırılmıştır. Çalışmadan hibrit betonarme kirişlerin FRP donatılı betonarme kirişlere göre daha sünek bir davranış gösterdiğini gözlemlenmiştir. FRP donatılı betonarme kirişe çelik donatı eklenmesiyle birlikte hibrit betonarme kirişlerin sünekliğinin önemli derecede arttığı sonucuna ulaşılmıştır (Lou ve Xiang, 2010). Qu ve arkadaşları, hibrit GFRP-çelik donatı içeren betonarme kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışını deneysel olarak incelemiştir. Bununla birlikte hibrit kirişlerin yük-deplasman ilişkilerini ve taşıma gücü değerlerini elde etmek için teorik bir model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yöntemle elde ettikleri deplasman ve taşıma gücü değerlerini deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlar ve oldukça uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir (Qu ve diğ., 2009).

Razaqpur ve arkadaşları, FRP kayma donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı ve davranışının belirlenebilmesi amacıyla deneysel bir çalışma yapmışlardır. Kirişleri farklı tipte FRP donatısına ve etriye aralığına sahip olacak şekilde oluşturmuşlardır. Tüm kirişler deneyden önce tasarlandığı gibi kesmeden dolayı taşıma gücüne erişmişlerdir. Deneysel olarak elde ettikleri kesme dayanımı değerlerini, birçok ülke yönetmelikleri tarafından önerilen denklemlerle karşılaştırmışlar ve gerek ACI 440.R1-06 gerekse CAN/CSA S6-06 tarafından önerilen modellerden elde ettikleri sonuçların deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Çalışmadan ayrıca, FRP etriyelerinin normal çelik donatılı etriyeler gibi ilk çatlamadan sonra betonun kesme dayanımına olan katkısını artırdığı sonucuna ulaşmışlardır (Razaqpur ve diğ., 2004).

El-Sayed ve arkadaşları, FRP boyuna donatılı yüksek dayanımlı narin ($a/d > 2.5$) betonarme kirişlerin dayanım ve davranışlarını incelemek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında yüksek basınç dayanımına sahip CFRP ve GFRP donatılı betonarme kirişlerde betonun kesme dayanımına olan katkısı irdelenmiştir. Deneysel olarak elde ettikleri kesme dayanımı değerlerini ACI 440.1R-03 tarafından önerilen denklemlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışma ile beton basınç dayanımı arttıkça kesme dayanımının arttığı sonucuna ulaşmışlardır (El-Sayed ve diğ., 2006). Betonun kesme dayanımına olan katkısını belirlemek için farklı boyuna donatı oranına sahip, GFRP donatılı kayma donatısız betonarme kirişleri, iki noktasal yük etkisi altında deneysel olarak teste tabi tutulmuştur. Deneysel çalışma sonuçlarından tüm kirişlerin diyagonal çekme kırılması nedeniyle taşıma gücüne eriştikleri gözlemlenmiştir. Deneysel olarak elde ettikleri kesme dayanımı değerlerini, gerek normal çelik donatılı kirişlerin kesme dayanımı için verilen modeller, gerekse literatürde GFRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı için önerilen modellerle karşılaştırılmıştır. Çalışmada ayrıca kesme dayanımının GFRP boyuna donatısından bağımsız olduğunu ifade etmişlerdir (Joseph, 2000).

GFRP kompozit malzemelerde oluşan hasarın incelenmesi ve hangi hasar modlarının oluştuğunun tespit edilmesi yeni yapılacak çalışmaların tasarımları için oldukça önemlidir (Tarakçıoğlu ve diğ., 2005). Gemi ve arkadaşları birçok çalışmalarında GFRP kompozit malzemelerin hasar modlarını belirlemiş ve hasar analizlerini yapmışlardır (Gemi ve diğ., 2016; Gemi ve diğ., 2017; Gemi, 2018; Morkavuk ve diğ., 2018). GFRP'lerin kullanıldığı yerlere ve üzerlerine gelen yüklere göre optimum tasarımların elde edilebilmesi için bu işlemin önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Bu çalışmada GFRP donatılı etriyesiz ve çelik donatılı etriyesiz betonarme kirişlerin eğilme dayanımları incelenmiş ve kirişin çekme bölgesinde kullanılacak lifli betonun davranışa olan etkisi incelenmiştir. Bütün kirişlerde aynı beton kullanılmıştır. Çalışmada kirişler orta noktasından yüklenerek birbirleri ile hasar durumları ve davranışları kıyaslanmıştır.

MATERYAL ve METOD (MATERIAL and METHOD)

Kullanılan Betonun Özellikleri (Properties of Used Concrete)

Bu çalışmada üretilen kirişlerde birisi normal beton diğeri de polipropilen lifli olmak üzere 2 çeşit beton kullanılmıştır. Numunelerin üretiminde kullanılan beton karışımında hazır beton tercih edilmiştir. Beton sınıfı C20/25 olup döküm şekli pompalı olmakla beraber CEM II 42,5 çimento seçilmiştir. Katkı maddesi olarak kendiliğinden yerleşen beton (KYB) için hiper akışkanlaştırıcı beton katkısı olan Levelcon KYB 100 kullanılmıştır. Kıvam sınıfı S3, maksimum agrega dane çapı 22,4 mm olarak belirlenmiştir. Birim hacim ağırlığı 2412 ve su/çimento oranının 0,55 olarak tasarlanmıştır. Numuneler dört farklı kiriş olarak üretilmiştir. Birincisi referans olarak alınmış ve polipropilen lif (forto ferro) katkısı kullanılmadan çekme bölgesine çelik donatı konularak üretilmiştir. İkincisi ağırlıkça %0,2 polipropilen lif katkısı ile çekme bölgesine çelik donatı konularak, üçüncüsü polipropilen lif katkısı kullanılmadan çekme bölgesine GFRP donatı konularak, dördüncüsü % 0,2 polipropilen lif katkısı ile çekme bölgesine GFRP donatı konularak üretilmiştir. Bunun dışında küp numuneler üzerinde basınç dayanımı, silindirik numuneler üzerinde basınç tayini, kiriş numuneler üzerinde ise eğilme deneyi tayini yapılmıştır. Numunelerin üretilmesi aşamasında betonun yerleşmesi ve betonu sıkıştırarak hava boşluklarını dışarı atmak amacıyla vibratör kullanılmıştır. Numuneler üretildikten iki gün sonra kalıptan çıkarılmış ve günde üç defa uygun şekilde 28 gün boyunca sulanmıştır. Sipariş edilen hazır beton üzerinde yapılan çökme deneyinden elde edilen sonuç Şekil 1'deki gibi ölçülmüş 15 cm olduğu belirlenmiştir.



Şekil 1. Hazır beton üzerinde yapılan çökme deneyi

Figure 1. Slump test on ready mixed concrete

Sertleşmiş Beton Deneyleri (Hardened Concrete Tests)

Betonun basınç dayanımı; aksel basınç yükü etkisi altındaki betonun kırılmamak için gösterebileceği direnme kabiliyeti (aksel basınç yükü etkisiyle, betonda oluşan maksimum gerilme) olarak tanımlanmaktadır. Bu yöntemin uygulanmasında beton standartlarında belirtilen boyutlara sahip standart silindirik veya küp numuneler kullanılmaktadır. Bu numuneler beton taze iken silindirik veya küp

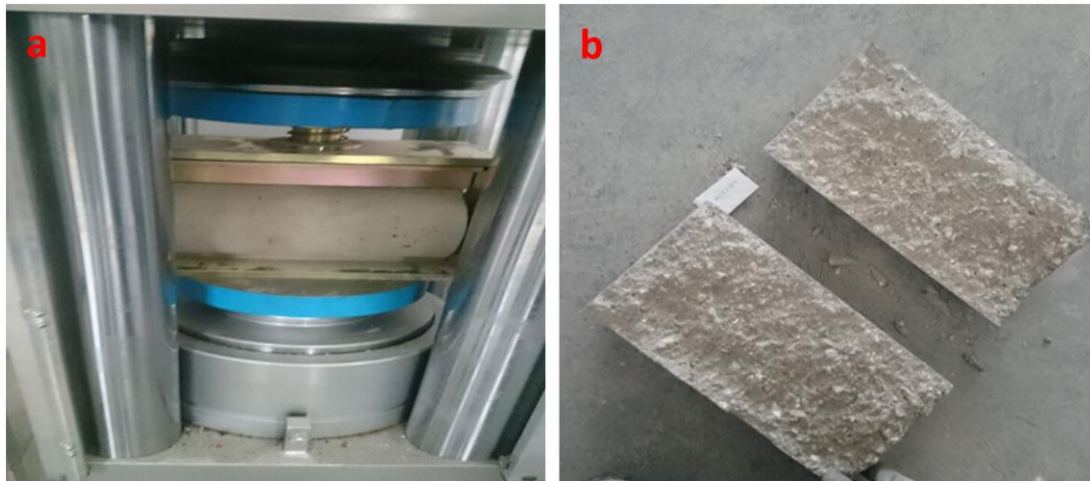
şekil kalıplara, beton standartlarının belirttiği tarzda, yerleştirilmekte ve bir gün sonra kalıplarından çıkartılmaktadır. Kalıplarından çıkartılan sertleşmiş beton numuneleri, deney tarihine kadar (genellikle betonun yaşı 28. güne gelinceye kadar) beton standartlarının belirttiği kür ortamında saklandıktan sonra, deney presi olarak adlandırılan bir alet vasıtasıyla üniform basınç yükü altında kırılmaya tabi tutulmaktadır.

Beton zamana bağlı olarak şekil değiştirme gösteren bir malzeme olduğundan, yükleme hızı, betonun basınç mukavemeti üzerinde etkili bir parametredir. Bu nedenle tüm numuneler sabit bir yükleme hızı altında deneye tabi tutulmuşlardır. TS EN 12390-3 (2010)'e göre bu değer 0,2 MPa/s ile 1,0 MPa/s arasında olmalıdır. Beton numunelerin kırılması işlemi Şekil 2'de görüldüğü gibi, yükleme hızı 0,5 MPa/s seçilerek yapılmıştır.



Şekil 2. a) Basınç dayanımı için küp numunesinin cihaza yerleşimi b) deney sonrası numunenin hasar görünüşü
Figure 2. a- The sample of the cube sample for pressure resistance b- damage appearance of sample after test

Yarmada Çekme Dayanımı; dolaylı çekme yükleri altında betonun çekme dayanımının elde edilebilmesini belirleyen deney yöntemi Türk standardı TS EN 12390-6 standardına göre yapılmıştır. Deney presi vasıtasıyla uygulanan basınç yükü numune kırılıncaya kadar devam ettirilmekte ve kırılma yükü (P) ölçülmektedir. Böyle bir yükleme altında, silindir numunenin kırılma tarzı, Şekil 3b'de görüldüğü gibi numunenin ortadan yarılarak iki parçaya ayrılması şeklinde gerçekleşmektedir. Hazır beton basınç dayanımı deneylerinin sonuçları Çizelge 1 ve Çizelge 2'de toplu halde verilmiştir.



Şekil 3. a) Betonun yarmada çekme deneyi b) deney sonrası numunenin hasar görünüşü
Figure 3. a- Split-tensile test of concrete b- damage appearance of sample after test

Çizelge 1. Hazır beton basınç dayanımı deneylerinin sonuçları

Table 1. Results of ready-mixed concrete compression strength tests

Numuneler	Boyut	Yük (kN)	Dayanım (N/mm ²)
1	Küp-10x10	283.3	28.33
2	Küp-10x10	275.6	27.56
3	Küp-15x15	574.1	25.51
4	Küp-15x15	600.2	26.67
5	Küp-15x15	605.4	26.91
6	Küp-15x15	622.1	27.64
7	Küp-15x15	614.9	27.32
8	Küp-15x15	607.0	26.97
9	Silindir-15x30	283.6	16.04
10	Silindir-15x30	332.0	18.78
11	Silindir-15x30	273.1	15.45

Çizelge 2. Hazır beton çekme dayanımı deneylerinin sonuçları

Table 2. Results of ready-mixed concrete tensile strength tests

Numuneler	Boyut	Yük (kN)	Dayanım (N/mm ²)
1 (Hazır)	Silindir-15x30	135.1	1.91
2 (Lifli)	Silindir-10x20	125.8	4.00
3 (Lifli)	Silindir-10x20	120.5	3.83

Eğilme Dayanımının (Eğilmede Çekme Dayanımı) Belirlenmesi (Determination of Bending Strength)

Betonun eğilme dayanımının bulunabilmesi ile ilgili deneyler Türk standardı TS EN 12390-5'e göre yapılmıştır. Betonarme kirişler üzerinde eğilme deneyi 40 cm uzunluğundaki kirişin mesnet noktalarına kenardan 5 cm boşluk bırakılarak yerleştirilmiş ve üzerindeki yükleme aparatı ile yükün kirişe aktarılması 3 nokta ve 4 nokta deneyleri ile sağlanmıştır. Şekil 4 ve Çizelge 3'de eğilmede çekme dayanımı ölçüm deney düzeneği ve deneylerin sonuçları verilmiştir.



Şekil 4. Eğilmede çekme dayanımı ölçüm deney düzeneği

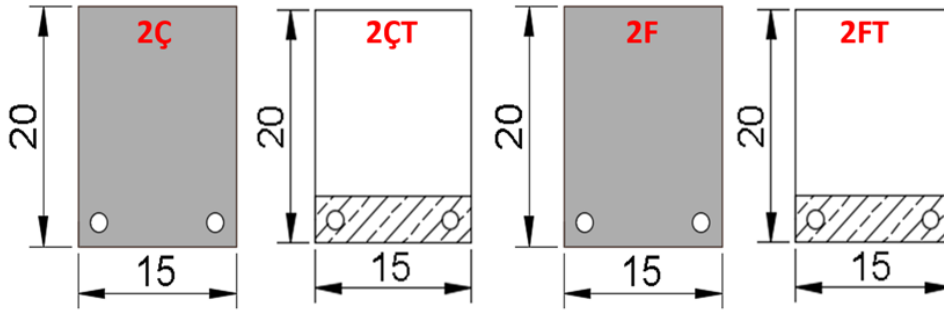
Figure 4. Bending tensile strength measurement test setup

Çizelge 3. Hazır betonun eğilmede çekme dayanımı deneylerinin sonuçları*Table 3.* Results of tensile strength tests of ready-mixed concrete

Numuneler	Boyut	Yük (kN)	Dayanım (N/mm ²)
1 (3 nokta)	Prizma 40x10x10	10.60	2.98
2 (4 nokta)	Prizma 40x10x10	13.24	3.97
3 (Lifli 4 nokta)	Prizma 40x10x10	11.58	3.47

Kirişlerin Özellikleri (Properties of Beams)

Çalışmada incelenmek üzere dört adet 15 x 20 x 210 cm boyutlarında test kirişi üretilmiştir. Kirişlerin geometrik özellikleri ve tipik donatı yerleşimi Şekil 5'te verilmiştir. Kirişlerden bir tanesi diğer kirişlerle karşılaştırmak amacıyla (referans numunesi olarak) lifsiz ve S420 çeliği kullanılarak imal edilmiştir. Numuneler 2Ç, 2F, 2ÇT ve 2FT şeklinde kodlanmıştır. Bunların anlamı 2Ç; çekme bölgesinde 2 adet 8 mm'lik çelik donatı, 2F; çekme bölgesinde 2 adet 8 mm'lik GFRP donatı, 2ÇT; çekme bölgesinde 2 adet 8 mm'lik çelik donatı ve çekme bölgesine 5 cm polipropilen lif takviyesi, 2FT; çekme bölgesinde 2 adet 8 mm'lik GFRP donatı ve çekme bölgesine 5 cm polipropilen lif takviyesi şeklindedir. Benzer isimlendirmeler tüm kirişlere uygulanmıştır. Çalışmada 5 cm polipropilen lif takviyesi yüksekliği kiriş yüksekliğinin dörtte bir oranında tarafsız eksenin altında kalacak şekilde seçilmiştir. Donatıların mekanik özellikleri Tablo 4'te verilmiştir. Kirişlerde GFRP donatılı betonun sadece eğilme davranışının gözlenebilmesi için basınç donatısı ve kesme donatısı (etriye) kullanılmamıştır.

**Şekil 5.** Kirişlerin geometrik özellikleri ve tipik donatı yerleşimi*Figure 5.* Geometric properties of beams and typical reinforcement settlement**Çizelge 4.** Donatıların mekanik özellikleri*Table 4.* Mechanical properties of rebars

Numune Kodu	2Ç	2ÇT	2F	2FT
Donatı Türü	Çelik	Çelik	GFRP	GFRP
Akma Dayanımı (MPa)	435	435	692	692
Kopma Dayanımı (MPa)	560	560	-	-

Test Düzenegi (Test Set-up)

Kirişlerin eğilme testleri, Necmettin Erbakan Üniversitesi Yapı Laboratuvarı'nda bulunan Şekil 6'da resmi verilen üç noktalı eğilme test düzenegi ile yapılmıştır. Yer değiştirme kontrollü olan sistem 500

kN'luk hidrolik yükleme kapasitesine sahiptir. Kirişin düşey yerdeğiştirmesini ölçmek için bütün kirişlerde açıklık ortasında potansiyometrik cetvel kullanılmıştır.

Hidrolik yükleme ünitesinden gelen yük kiriş ortasına 50 mm kalınlığında 10 mm yüksekliğinde bir plaka yardımı ile aktarılmıştır. Kirişe uygulanan bu yük, yükleme plakasının üzerindeki yük hücresi (load cell) yardımı ile okunmuştur. Elde edilen yerdeğiştirme ve yük verileri anlık olarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır.



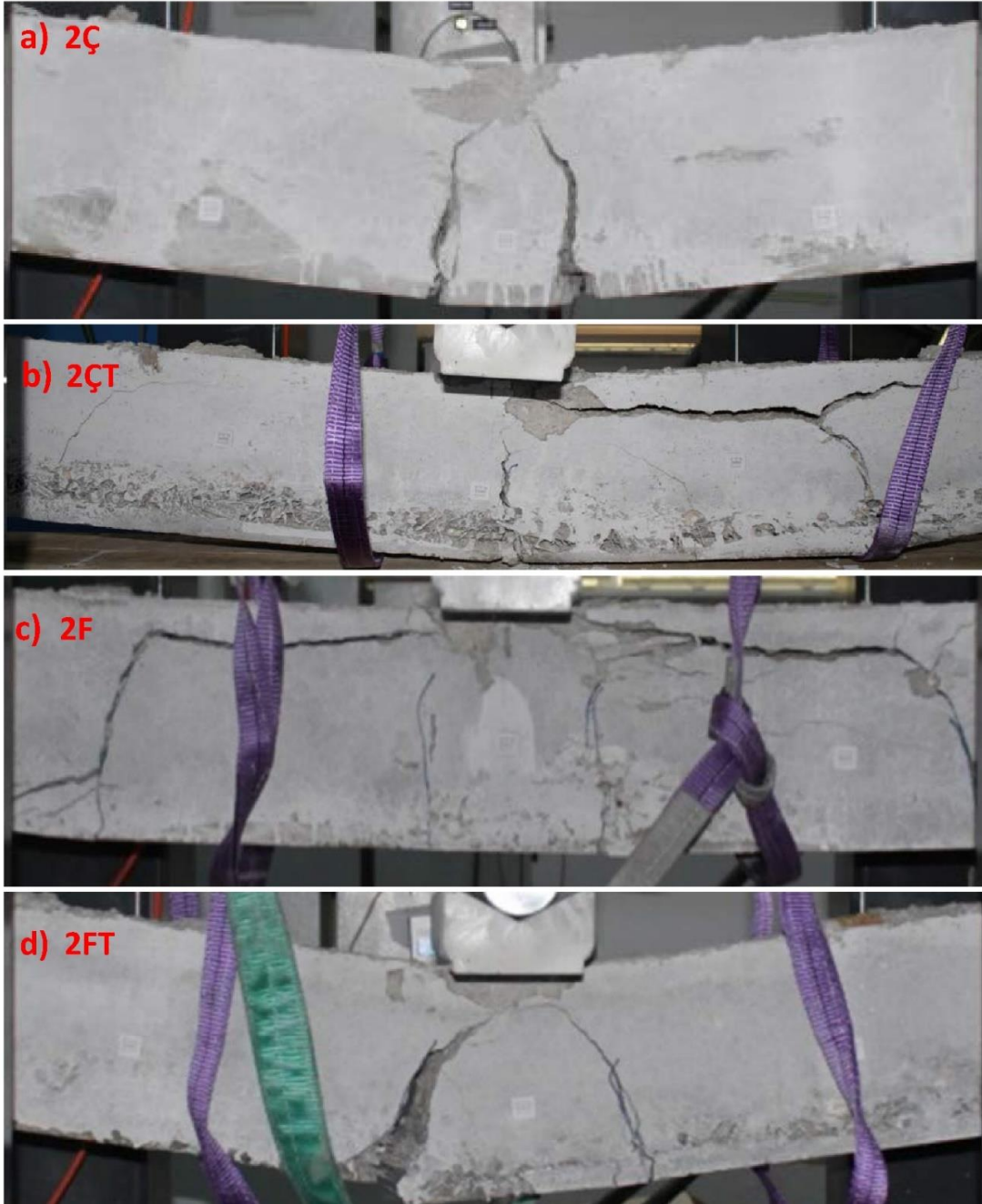
Şekil 6. Üç noktalı eğilme test düzeneği

Figure 6. Three point bending test set-up

DENEYSEL ÇALIŞMANIN SONUÇLARI (EXPERIMENTAL STUDY RESULTS)

Bütün kiriş numunelerinin deney sonu kırılma fotoğrafları Şekil 7'de verilmiştir. Kırılma şekilleri incelendiğinde çelik donatılı kirişlerde sünek eğilme kırılması olduğu, GFRP donatılı kirişlerde ise gevrek kesmeden kırılan etriyersiz bir betonarme kiriş davranışı olduğu gözlemlenmiştir. Deney esnasında alınan kayıtlar ve Şekil 8 birlikte incelendiğinde; çekme bölgesinde 2 adet 8 mm'lik çelik donatı bulunan 2Ç kiriş numunesinde ilk çatlak 1886 N yük mertebelerinde gözlemlenmiştir. 2Ç kirişinde ikinci çatlak 7500 N yük seviyelerinde gözlemlenmiştir. Yük seviyesi 14500 N seviyelerine geldiğinde kiriş içindeki donatı akmış ve orta nokta deplasmanı 9 mm olarak ölçülmüştür. Bu noktadan sonra yük taşıma kapasitesinde donatının pekleşmesinden dolayı bir miktar daha artış olmuş ve kiriş sünek davranarak deplasman yapmaya devam etmiştir. Kiriş üzerinde çok fazla çatlak meydana gelmemiş ve oluşan çatlaklar genişleyerek 14200 N yük mertebelerinde yaklaşık 171 mm orta nokta deplasmanı yaparak taşıma kapasitesine ulaşmıştır (Şekil 7a).

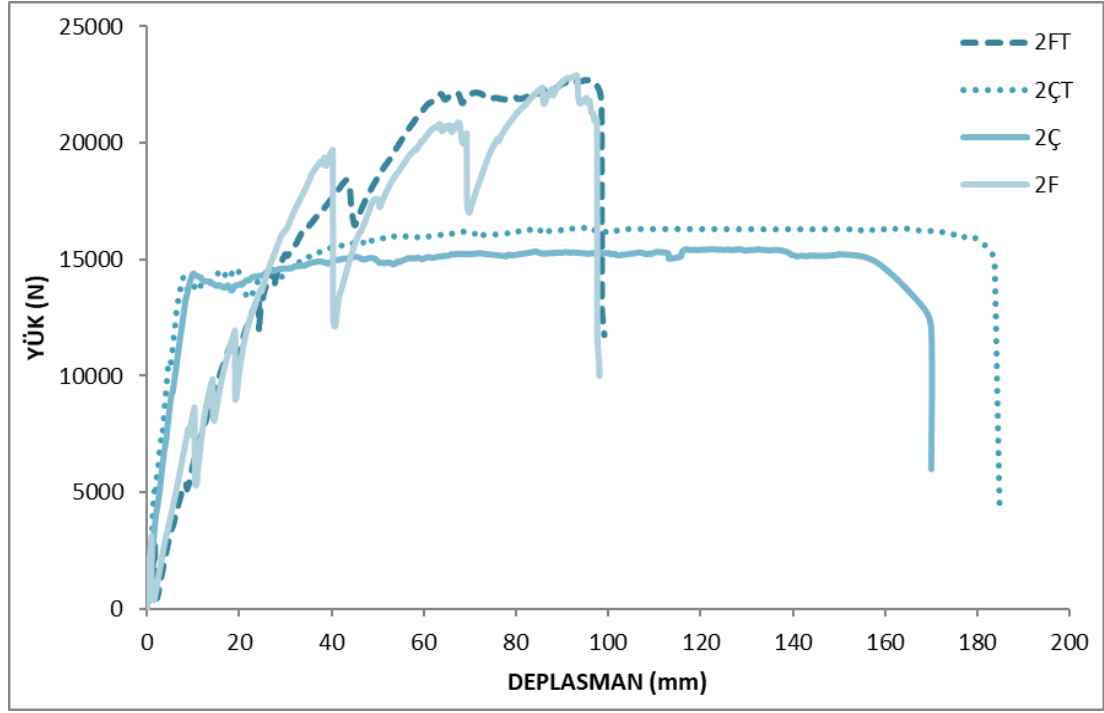
Çekme bölgesinde 2 adet 8 mm'lik çelik donatı bulunan 2Ç kiriş ile aynı özelliklere sahip 2ÇT numunesinde 5 cm yüksekliğinde lifli beton vardır. 2ÇT kirişindeki ilk çatlak 4094 N seviyelerinde ve 1.9 mm orta nokta deplasmanında oluşmuştur. 2ÇT kirişi çekme bölgesinde kullanılan lifli betonun da katkısıyla akma dayanımı 14400 N seviyelerine kadar çıkmış ve 15300 N yük seviyelerinde 186 mm orta nokta deplasmanı yaparak göçmüştür (Şekil 7b).



Şekil 7. Test numunelerinin deney sonrası göçme durumları

Figure 7. Post-test collapse cases of test specimens

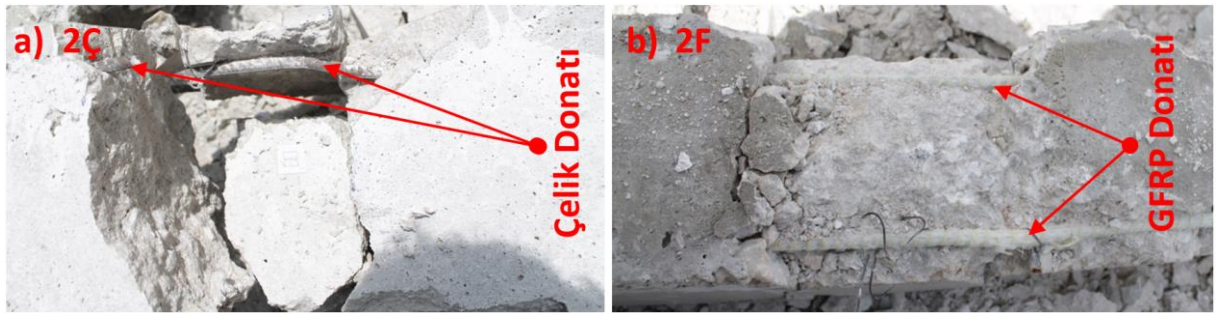
2F kiriş numunesinde çekme bölgesinde 2 adet 8 mm çapında GFRP donatı kullanılmıştır. 2F numunesinde betonda ilk çatlak 2706 N yük seviyelerinde 9 mm orta nokta deplasmanı seviyelerinde olmuştur. GFRP donatılı 2F kirişinde ilk çatlaklar kiriş ortasında meydana gelmiş ancak 10000 N yük seviyesinde çatlaklar yanlarda da meydana gelmiştir. 19000 N'da GFRP'lerden ses gelmeye başlamıştır. Devamında 20000 N'da basınç bölgesinde ezilme gözlemlenmiş ve deplasman 67,9 mm olarak ölçülmüştür. Yükleme kaldırıldığında kirişte kalıcı deformasyonun çok az olduğu gözlemlenmiş eski haline geri dönmüştür. Bu kirişte donatı sıyrılmalarıyla beraber GFRP donatılarda yarıma hasarı meydana gelmiştir (Şekil 7c). Çekme bölgesinde lifli betonun kullanıldığı 2FT numunesinde betonda ilk çatlak 5050 N yük mertebesinde 8 mm orta nokta deplasmanında olmuştur. 2FT numunesi 22000 N yük mertebesinde 99 mm orta nokta deplasmanı yaparak göçmüştür.



Şekil 8. Test numunelerinin yük-deplasman grafiği

Figure 8. Load-displacement graph of test specimens

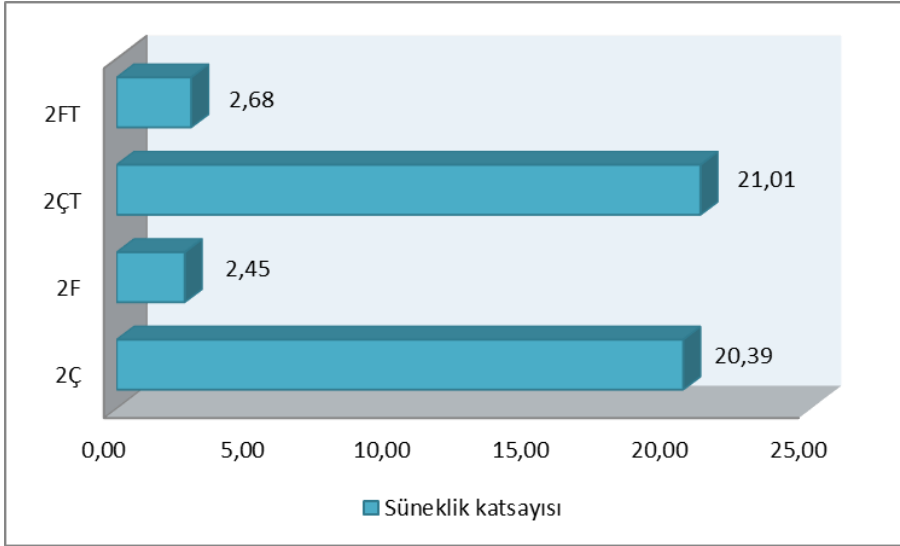
Şekil 9’da donatılarda meydana gelen hasarlar incelendiğinde çelik donatının akarak şekil değiştirdiği, GFRP donatının liflerinin yarılarak ve koparak kiriş yükünü taşıyamaz hale geldiği görülmüştür. GFRP donatılı numunelerde yüklemeye devam ettikçe donatının sıyrılarak ani yük boşalmalarına sebep olduğu gözlemlenmiş buna rağmen yük taşıma kapasitesindeki artış devam etmiştir. Maksimum deplasman değerlerinde GFRP çubuklarda yarıлма hasarı ve akabinde elyafların kopması ile çökme gerçekleşmiştir.



Şekil 9. Test numunelerinin deney sonrası donatı hasarları

Figure 9. Rebars damage of test specimens after test

Kirişler için deplasman süneklik katsayıları Yük deplasman grafiğinden hesaplanmış ve Süneklik katsayısı=Kopma Birim Deformasyon / Akma Birim Deformasyon bölünmesi ile bulunmuştur. Kirişlere ait süneklik katsayısı grafiği Şekil 10’da verilmiştir. Şekil 10’da gösterildiği üzere kirişlerin süneklik katsayıları karşılaştırıldığında çelik donatılı kirişlerin daha sünek olduğu görülmüştür. Kirişler ayrı ayrı karşılaştırılınca lifli kirişlerin sünekliği lifsiz olan kirişlere nazaran daha fazladır. Bu sonuca göre polipropilen liflerin sünekliği artırdığı sonucuna varılabilir.

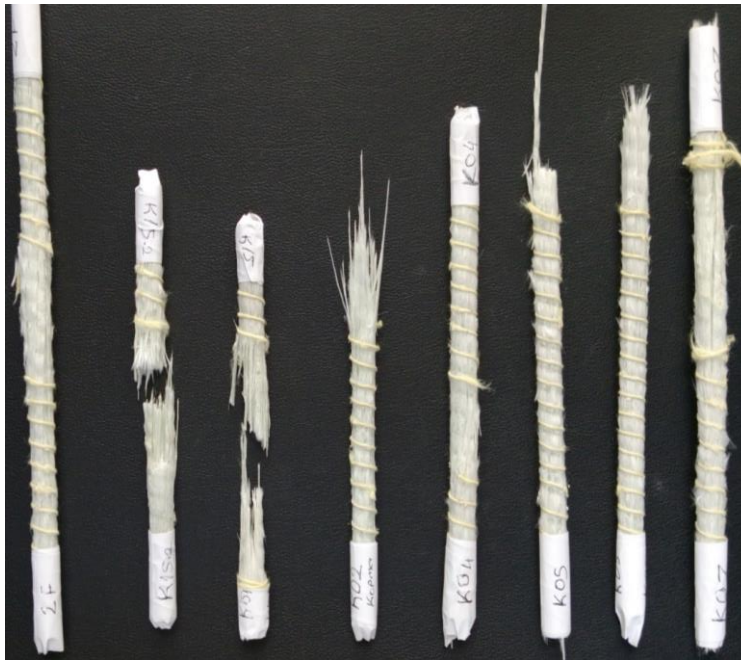


Şekil 10. Kirişlerin süneklik düzeyleri

Figure 10. Ductility levels of beams

GFRP Donatı Hasar Analizi (GFRP Rebars Damage Analysis)

Deney sonrası donatılarda oluşan hasarları incelemek için donatılar betonun içerisinde titizlikle çıkartılmıştır. Üç noktadan eğme deney sonrası GFRP donatılarda oluşan hasarların genel görünüşleri Şekil 11’de verilmiştir. GFRP’lerde oluşan sonuç hasarları incelendiğinde, eğilmeden kaynaklı olarak elyaf doğrultusunda yarıma çatlakları ve kesit yönünde elyaf kopması şeklinde oluştuğu görülmüştür.

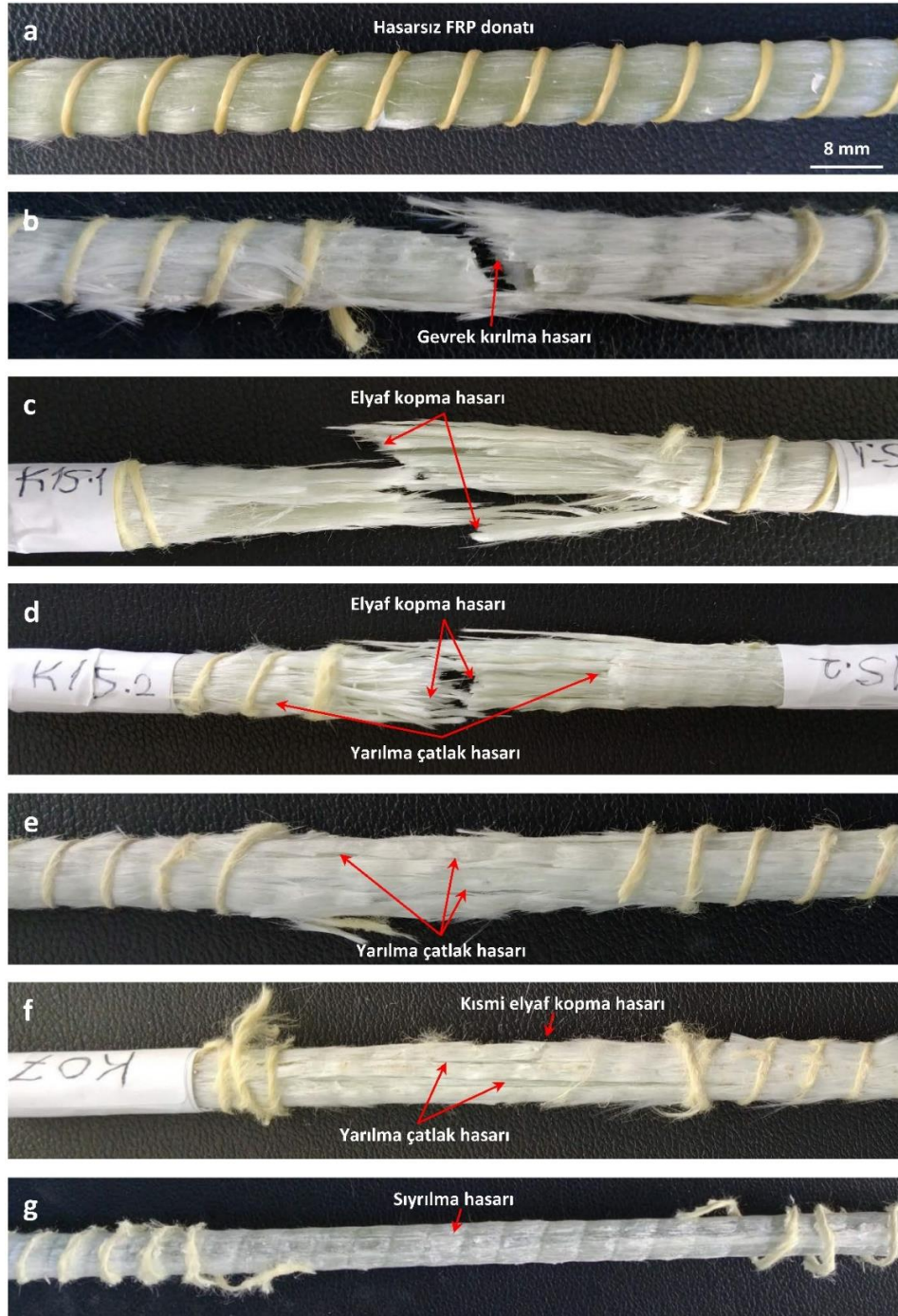


Şekil 11. GFRP donatılarda oluşan sonuç hasarların genel görünüşü

Figure 11. Overall appearance of the resulting damage to GFRP rebars

Şekil 12’de hasarsız numune ve oluşan hasar modlarının belirlendiği hasarlı numuneler verilmiştir. Şekil 12b incelendiğinde GFRP de herhangi bir yarıma olmaksızın yaklaşık 45° açıyla gevrek bir kırılma hasarının olduğu görülmüştür. Şekil 12c-d de eğilmeden kaynaklı elyaf doğrultusunda yarıma

çatlaklarının oluşumu sonrasında elyaflarda dağınık bir kopma hasarı gözlenmiştir. Şekil 12e-f incelendiğinde elyaf doğrultusunda yarıma çatlaklarının yoğun olarak görüldüğü ve bunların yanında kısmi elyaf kopmalarının oluştuğu tespit edilmiştir. Elyaf doğrultusunda yarıma çatlakları şeklinde sonuç hasarı oluşan beton kiriş numunelerde yükün kalkması sonrasında azda olsa eski haline geri gelme gerçekleşmiştir. Şekil 12g incelendiğinde GFRP'de elyaf doğrultusunda yarıma çatlakları ve gevrek kırılma olmaksızın sıyrılmaya hasarının meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 12. GFRP donatılarda hasarlı numuneler ve oluşan hasar modları
Figure 12. Damaged samples in GFRP rebars and damage modes

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Çekme bölgesinde 5 cm yüksekliğinde polipropilen lif katkılı betonun kullanıldığı çelik ve GFRP donatılı etriyesiz kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışının ve hasar analizlerinin incelendiği bu çalışmada 4 adet deneysel çalışma yapılmıştır. Çalışmada öne çıkan bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- Yapılan kiriş eğilme deneylerinde içerisinde yalnızca çelik donatı bulunan kiriş (2Ç) ve çekme bölgesinde hem çelik hem lif (2ÇT: Çekme bölgesinde 2 adet çelik donatı ve çekme bölgesinde 5 cm lif takviyeli) olan kirişlerin sünek bir davranış sergilediği görülmüştür.
- Donatı olarak yalnızca GFRP kullanılan kiriş numunesi (2F) ve çekme bölgesinde hem GFRP hem de lif olan kiriş (2FT: Çekme bölgesinde 2 adet GFRP donatı ve çekme bölgesinde 5 cm lif takviyeli kiriş) numunelerinde ise farklı davranışlar gözlemlenmiştir. GFRP gevrek bir malzeme niteliğine sahip olduğundan gevrek kırılmalar görülmüş olup daha geniş çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir.
- GFRP donatılı kiriş numunelerinde eğilme çatlakları ilk yükleme aşamasında olmasına rağmen, etriyesiz ve kesme dayanımı yetersiz olan kiriş denge üstü donatılı bir betonarme kiriş davranışı sergileyerek büyük ve geniş kesme çatlaklarının mesnet bölgelerine doğru oluşması suretiyle ani kırılma gerçekleştirmiştir.
- GFRP donatılı kiriş numunelerinin gevrek ve aniden kırılmasına rağmen çelik donatılı kirişlerden daha fazla yük taşıdığı görülmüştür.
- Aynı kesit boyutları ve aynı beton sınıfından oluşan kirişlerin çekme bölgesinde lifli beton kullanımının, dayanımı artırdığı, oluşan çatlak genişliğini ve çatlak sayısını azalttığı, yükleme sonucu meydana gelen deplasmanı azalttığı gözlemlenmiştir. Aynı çekme donatısı oranına sahip kirişlerde çekme bölgesinde lifli beton bulunduran kiriş, lifli beton bulundurmayan kirişe kıyasla daha fazla yük ve moment taşıma kapasitesine sahiptir.
- GFRP donatılı kiriş numunelerinin orta nokta deplasmanının 100 mm'ye kadar çıktığı görülmüş ve GFRP donatılı kirişlerde her hasardan sonra kayda değer rijitlik kaybı olduğu tespit edilmiştir.
- GFRP donatılı kiriş numunelerinde eğilme çatlakları ilk yükleme aşamasında olmasına rağmen, etriyesiz ve kesme dayanımı yetersiz olan kiriş denge üstü donatılı bir betonarme kiriş davranışı sergileyerek büyük ve geniş kesme çatlaklarının mesnet bölgelerine doğru oluşması suretiyle ani kırılma gerçekleştirmiştir. GFRP donatı miktarı azaltıldığında yani denge altı donatılı kirişte sünek eğilme kırılması olacağı literatürden bilinmektedir.
- GFRP'lerde oluşan sonuç hasarları incelendiğinde, eğilmeden kaynaklı olarak elyaf doğrultusunda yarıma çatlakları ve kesit yönünde elyaf kopması şeklinde oluştuğu görülmüştür.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Almusallam, T. H., 1997, "Analytical Prediction of Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced by FRP Bars", *Journal of Composite Materials*, Cilt 3, Sayı 7, ss 640-657.
- Barris, C., Torres, L., Turon, A., Baena, M., Catalan, A., 2009, "An Experimental Study of the Flexural Behaviour of GFRP RC Beams and Comparison with Prediction Models", *Composite Structures*, Cilt 91, Sayı 3, ss. 286-295.
- El-Sayed, A. K., El-Salakawy, E. F., Benmokrane, B., 2006, "Shear Capacity of High-Strength Concrete Beams Reinforced with FRP Bars", *ACI Structural Journal*, Cilt 103, Sayı 3, ss. 383.
- Gemi, L., Kara, M., Avci, A., 2016, "Low Velocity Impact Response of Prestressed Functionally Graded Hybrid Pipes" *Composites Part B: Engineering*, Cilt 106, ss. 154-163.
- Gemi, L., Şahin, Ö. S., Akdemir, A., 2017, "Experimental Investigation of Fatigue Damage Formation of Hybrid Pipes Subjected to Impact Loading under Internal Pre-stress", *Composites Part B: Engineering*, Cilt 119, ss. 196-205.

- Gemi, L., Köroğlu, M. A., Ashour, A., 2017, "Experimental Study on Compressive Behavior and Failure Analysis of Composite Concrete Confined by Glass/epoxy $\pm 55^\circ$ Filament Wound Pipes", *Composite Structures*, Cilt 187, ss. 157-168.
- Gemi, L., 2018. "Investigation of the Effect of Stacking Sequence on Low Velocity Impact Response and Damage Formation in Hybrid Composite Pipes under Internal Pressure. A comparative study", *Composites Part B: Engineering*, Cilt 153, ss. 217-232.
- Gravina, R. J., Smith, S. T., 2008, "Flexural Behaviour of Indeterminate Concrete Beams Reinforced with FRP Bars", *Engineering Structures*, Cilt 30, Sayı 9, ss. 2370-2380.
- Habeeb, M., Ashour, A. F., 2008, "Flexural Behavior of Continuous GFRP Reinforced Concrete Beams", *Journal of Composites for Construction*, Cilt 12, Sayı 2, ss. 115-124.
- Joseph, E., 2000, "A Prospective, Randomized Trial of Vacuum-Assisted Closure Versus Standard Therapy of Chronic Non-Healing Wounds", *Wounds*, Cilt 12, ss. 60-67.
- Kara, I. F., Ashour, A. F., Köroğlu, M. A., 2015, "Flexural behavior of hybrid FRP/steel reinforced concrete beams", *Composite Structures*, Cilt 129, ss. 111-121.
- Kara, I. F., Ashour, A. F., Köroğlu, M. A., 2016, "Flexural Performance of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed Near-Surface-Mounted FRP Reinforcements", *Composites Part B: Engineering*, Cilt 91, ss. 371-383.
- Kassem, C., Farghaly, A. S., Benmokrane, B., 2011, "Evaluation of Flexural Behavior and Serviceability Performance of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars", *Journal of Composites for Construction*, Cilt 15, Sayı 5, ss. 682-695.
- Köroğlu, M. A., 2016, "Mechanical Characterization of Recycled Tires in Concrete", *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, Cilt 4, Sayı 4, ss. 330-336.
- Köroğlu, M. A., Özdöner, N., 2016, "Behavioural Study of Steel Fiber and Polypropylene Fibre Reinforced Concrete", *Paper presented at the Key Engineering Materials*, ss. 59-63.
- Lou, T., Xiang, Y., 2010, "Numerical Analysis of Second-Order Effects of Externally Prestressed Concrete Beams", *Structural Engineering and Mechanics*, Cilt 35, Sayı 5, ss. 631-643.
- Morkavuk, S., Köklü, U., Bağcı, M., Gemi, L., 2018, "Cryogenic Machining of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Composites and the Effects of Cryogenic Treatment on Tensile Properties: A Comparative Study", *Composites Part B: Engineering*, Cilt 147, ss. 1-11.
- Qu, W., Zhang, X., Huang, H., 2009, "Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Hybrid (GFRP and Steel) Bars", *Journal of Composites for Construction*, Cilt 13, Sayı 5, ss. 350-359.
- Razaqpur, A., Svecova, D., Cheung, M. S., 2000, "Rational Method for Calculating Deflection of Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Beams", *Structural Journal*, Cilt 97, Sayı 1, ss. 175-184.
- Razaqpur, A. G., Isgor, B. O., Greenaway, S., Selley, A., 2004, "Concrete Contribution to the Shear Resistance of Fiber Reinforced Polymer Reinforced Concrete Members", *Journal of Composites for Construction*, Cilt 8, Sayı 5, ss. 452-460.
- Tarakçioğlu, N., Gemi, L., Yapıcı, A., 2005, "Fatigue Failure Behavior of Glass/epoxy $\pm 55^\circ$ Filament Wound Pipes under Internal Pressure", *Composites Science and Technology*, Cilt 65(3-4), ss. 703-708.
- Toutanji, H. A., Saafi, M., 2000, "Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars", *ACI Structural Journal*, Cilt 97, Sayı 5, ss. 712-719.
- Vijay, P., GangaRao, H. V., 2001, "Bending Behavior and Deformability of Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Members", *Structural Journal*, Cilt 98, Sayı 6, ss. 834-842.