



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Çelik, Cam FRP ve Hibrit Donatılı Betonarme Kirişlerin Eğilme Performansının İncelenmesi

 Lokman GEMİ^a,  Emrah MADENCİ^b,  Yasin Onuralp ÖZKILIÇ^{b,*},

^a Meram Meslek Yüksekokulu, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, TÜRKİYE

^b İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: yoozkilic@gmail.com

DOI: 10.29130/dubited.629354

ÖZET

Elyaf takviyeli polimer (FRP) donatılar korozyona karşı direnç, ağırlıkça yüksek mukavemet oranı, iyi yorulma özellikleri ve kullanım kolaylığı gibi avantajlar nedeniyle, çelik donatılara alternatif olarak tercih edilmekte ve kullanımı giderek artmaktadır. İnşaat mühendisliği uygulamalarında düşük maliyetlerinden dolayı en yaygın olarak cam FRP (GFRP) donatılar kullanılmaktadır. Son zamanlarda, kiriş ve kolonlarda kullanılan çelik donatılar yerine cam FRP donatılar ve çelik ile cam FRP donatının birlikte kullanıldığı “hibrit” donatı düzeni üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada; cam FRP ve hibrit donatıların betonarme kirişlerde geleneksel çelik donatılara göre avantajları araştırılmıştır. Çelik çubuklardan ve farklı sayıda cam çubuklardan oluşan betonarme kirişler üretilmiştir. Üretilen betonarme kirişlere dört nokta eğilme testleri yapılmıştır. Deney sonucu her üç numune için yaklaşık eşit maksimum yük taşıma kapasitesi elde edilmiştir. Bununla birlikte, çelik donatılı ve hibrit donatılı kiriş, gevrek bir davranış sergilerken, cam FRP donatılı kiriş sünek bir davranış sergilemiştir. Tamamen cam FRP donatılı numunenin enerji emme kapasitesi diğer numunelere göre ciddi oranda artış göstermiştir. Numunelerde oluşan hasarları açıklamak için hasar analizi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Cam fiber takviyeli polimer (GFRP), Hibrit kiriş, Eğilme analizi, FRP donatı, Kompozit

Investigation of Flexural Performance of Steel, Glass FRP and Hybrid Reinforced Concrete Beams

ABSTRACT

Fiber-reinforced polymer (FRP) reinforcing bars are preferred alternative to steel reinforcements, due to advantages such as resistance to corrosion, high strength to weight ratio, good fatigue properties and ease of handling. Glass-FRP (GFRP) bars are the most commonly used in civil engineering applications due to their low cost. Recently, a lot of research has been done on GFRP reinforcements and steel together with GFRP reinforcements called as “Hybrid” reinforcements instead of using steel reinforcements in beams and columns. In this study; the advantages of GFRP and Hybrid reinforcements over reinforced in concrete beams compared to conventional steel bars have been investigated. Reinforced concrete beams produced consisting of steel bars and

different number of glass bars. Four-point bending test was performed on the produced beams. All three specimens have almost equal maximum load carrying capacity. However, specimen with steel bar and specimen with hybrid bar showed brittle failure while specimen with GFRP bar showed ductile behavior. Energy absorption capacity of the specimen with GFRP bar was significantly higher than the other specimens. In order to explain the damages occurred at the specimen, damage analysis is presented.

Keywords: Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP), Hybrid beams, Flexure analysis, GFRP bar, Composite

I. GİRİŞ

Elyaf takviyeli polimer (FRP) kompozitler, iki farklı malzemeyi bir araya getirerek daha iyi bir malzeme oluşturma konseptinin en son versiyonudur. Bir matris (polimer) içine gömülmüş bir takviye fazından (fiberler) oluşurlar [1-5]. Bileşenler (lifler ve polimer), kompozit yapının işlevinde kendi başlarına değil, bir araya getirildiklerinde görev yaparlar. Elyaf lar kompozite mukavemet ve rijitlik katarken, polimer matrisler elyaf ları bir arada tutarak kompozit üzerine gelen yükü elyaf lar a aktarırlar. Matris malzeme yük aktarımının yanında kompozit yapıda elyaf ları dış etkenlere karşı koruma ve yapının tokluğunu artırma vazifesini de üstlenir. Betonarme yapılarda donatı çeliğinin korozyona uğraması çok büyük problemlere yol açmaktadır. Bu durum betonarme yapılarda zaman alıcı ve yüksek maliyetli bakım, onarım ve güçlendirme işlemleri uygulanmasını gerektirmekte veya kullanılabilirlik sürelerinin kısalmasına neden olmaktadır. Kompozit malzemeler korozyon başta olmak üzere dış etkilere karşı dirençli oldukları için betonarme yapılarda çelik donatı yerine alternatif olarak ortaya çıkmaktadır [6]. FRP kompozitlerin yüksek mukavemet/ağırlık oranı, aşınma ve yorulma direnci gibi avantajlı özellikleri mühendislerin ilgisini çekmiştir [7-9].

FRP kompozit çubukların geleneksel çelik çubuklara göre sahip oldukları avantajlı özelliklerden bazıları: yüksek boyuna çekme dayanımı, kaplamaya bağlı olmayan korozyon dayanıklılığı, yüksek yorulma dayanımı, hafiflik, düşük termal ve elektrik iletkenliği olarak gösterilebilir. FRP materyalleri manyetik olmadığı için FRP çubuklarla korozyondan kaçınılabilir. Ayrıca FRP çubuklar anizotropik yapıya sahip olup yüksek mukavemet ve hafiflik avantajlarına sahiptir. FRP çubuğunun elyaf yönündeki kuvveti ve sertliği, elyaf tiplerinden ve elyaf hacminin FRP'nin toplam hacmine oranından önemli ölçüde etkilenir. Reçine tipi de, hasar mekanizmasını ve kompozitin kırılma tokluğunu etkiler. FRP çubukların özelliklerini etkileyen diğer faktörler lif yönelimi, reçine, kürlenme hızı, üretim süreci ve kalite kontrolüdür. FRP çubuklarını üretmek için yaygın olarak kullanılan lifler cam, karbon, bazalt ve aramiddir. Cam elyaf lı FRP'ler (GFRP) ekonomik olmaları sebebiyle yaygın olarak tercih edilmektedirler. Matris, elyaf ları bağlar ve korur ve gerilmelerin elyaf tan elyafa kayma gerilmeleri yoluyla aktarılmasını sağlar. Matrisler tipik olarak epoksiler, polyesterler ve vinil esterler gibi termoset reçinelerdir. Epoksi, karbon lifleriyle birlikte kullanılan en yaygın matris malzemesi türüdür. Vinil ester reçineleri genellikle cam elyaf larla birleştirilir.

Son yirmi yıl boyunca, laboratuvar testleri FRP çubuklarının beton yapılarda iç takviye olarak başarılı ve pratik bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir [10]. FRP kompozit çubuklar, çelik donatıya göre daha yüksek çekme dayanımlı bir malzeme olmasının yanında daha düşük bir elastisite modülüne sahiptir. Bu malzeme aynı zamanda kırılma konumuna kadar lineer bir gerilme şekil değiştirme davranışı göstermektedir. FRP donatıların düşük elastisite modülüne sahip olmasından dolayı yükler etkisi altında bulunan FRP donatılı kirişlerin rijitliklerinde çatlamalardan sonra önemli azalmalar olmakta ve bu durum, bu elemanlarda kullanılabilirlik yük düzeyinde bile oldukça büyük deplasmanlar oluşmasına neden olmaktadır. FRP kompozit çubuklarla güçlendirilmiş bir beton eğilme elemanı genellikle, kırılmadan önce tipik olarak ani ve yıkıcı olan, geniş çatlaklar ve büyük sapmalar yaşar. Ayrıca, FRP çubuklarının basınç altındaki davranışı çekmede olduğu kadar iyi değildir. Bununla birlikte, FRP ve geleneksel çelik arasındaki fiziksel ve mekanik özelliklerdeki büyük farklılıklar nedeniyle, FRP çubuklarının kullanımı mühendisler için bir zorluk olmaktadır. FRP çubukların son on yıl içerisinde somut olarak davranışının değerlendirilmesi üzerine bazı çalışmalar yapılmıştır [11-18]. Sonuç olarak, FRP ile güçlendirilmiş betonarme bir yapı aşırı bükülmelere ve hizmet verilebilirliğini etkileyen geniş çatlaklara maruz kalmaktadır. Bu durumda, FRP takviyeli yapıların tasarımı, nihai sınır durumlarından ziyade, hizmet verilebilirlik sınır durumları tarafından yönetilmelidir [19]. Bu nedenle, betonarme yapılarda çelik çubukların FRP çubuklarla (hibrit sistem) birleştirilmesi konsepti, tamamen FRP ile güçlendirilmiş yapıların süneklik ve servis kolaylığı sorunlarını gidermek için pratik bir çözüm gibi görünmektedir [20]. Beton elemanlarda hibrit kompozit kullanma yaklaşımı son on yılda ilgi kazanmıştır [20-30]. Hibrit bir sistemde, çelik takviye çubukları eklenmesi, yapının esnekliğini sağlar ve servis kolaylığı sağlarken, FRP çubukları yük taşıma kapasitesini korur.

Bu çalışma hibrit betonarme kirişlerin eğilme davranışını incelemeyi amaçlamaktadır. Bir dizi üretilen betonarme kirişin deneysel eğilme testi gerçekleştirilmiştir. Üretilen kirişler, çelik donatı ve cam FRP donatının beton içerisindeki davranış farklarını ortaya koymak için çelik donatı, cam FRP ve hibrit donatı kombinasyonlarından oluşmaktadır. Tekil yük altında kirişlerin eğilme testleri sonucu gerilme-deplasman değerleri elde edilmiştir. Ayrıca kirişlerin yükleme altında davranışları detaylı bir hasar analizi ile yorumlanmıştır [27].

II. MATERYAL VE METOT

Deney numuneleri üretmek için C25 brüt beton hazırlanması planlanmıştır. Bunun için de CEM II AM (PL) 42,5R tipi çimento ve maksimum 12 mm çapında agrega kullanılmıştır. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri Tablo 1. de verilmiştir. Su çimento oranı 0.63 olarak belirlenmiştir. Döküm sırasında üretilen betonun basınç dayanımını belirlemek amacıyla 150x150 küp numuneler üretilmiştir. Bu numuneler 28 gün boyunca kür havuzunda bekletilmiştir ve ardından basınç deneyinde kullanılmıştır. Küp numunelerden elde edilen sonuca göre üretilen betonun basınç dayanımı 28 MPa olarak tespit edilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Agrega Boyutu	Kuru Birim Kütle (kg/m^3)	Karışım Oranı (%)	Su Emme (%)
İnce (0 – 4 mm)	2680	59	0.85
İri (4 – 12 mm)	2690	41	0.70

Çalışma kapsamında 3 farklı çekme donatı konfigürasyonuna sahip betonarme kirişler üretilmiştir. Cam FRP donatı (Şekil 1a), çelik donatı (Şekil 1b) ve ikisinin kombinasyonundan oluşan hibrit donatılar (Şekil 1c) kullanılmıştır. Kullanılan donatıların çapı 8 mm olarak seçilmiştir. Kullanılan çelik ve cam FRP donatıların malzeme özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Tüm numunelerde 2 adet 8 mm çapında çelik donatı basınç bölgesinde kullanılmıştır. Yine 8 mm çapında çelik etriyeler 200 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Donatılar kalıplara yerleştikten sonra beton karışımı hazırlanan 10x10x100 cm boyutundaki kalıplara dökülmüştür. Kirişler prizini aldıktan sonra kalıplardan çıkartılıp kür havuzuna yerleştirilmiştir. Kür havuzunda kirişler 28 gün bekletilmiştir.

Tablo 2. Kullanılan donatıların özellikleri

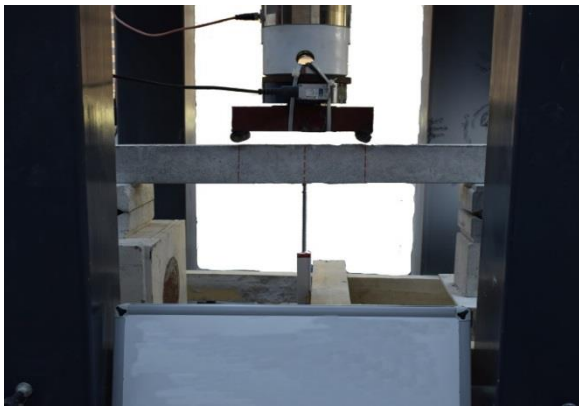
Donatı	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Gerilmesi (MPa)	Elastisite Modülü (Gpa)
Çelik	480	595	195
Cam FRP	-	930	48



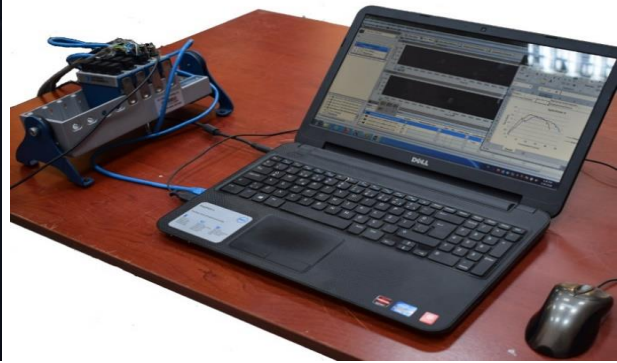


Şekil 1. Donatı detayı a) Cam FRP, b) Çelik c) Hibrit

Üretilen kirişler dört nokta eğilme düzeneği ile test edilmiştir. 50 ton kapasiteli deplasman kontrollü hidrolik piston yardımıyla yük uygulanmıştır. Uygulanan yük dağıtıcı kirişin üzerine yerleştirilen yük hücresi sayesinde ölçülmüştür. Orta noktadaki dikey deplasmanlar ise kiriş alt orta noktasına yerleştiren deplasman ölçer (LVDT) ile ölçülmüştür. Ölçülen yük ve deplasman değerleri “National Instruments” veri sistemi aracılığıyla kaydedilmiştir. Deneysel düzeneği ve veri toplama sistemi Şekil 2’de gösterilmiştir. Deneysel çalışma “Necmettin Erbakan Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarı’nda” gerçekleştirilmiştir.



(a)



(b)

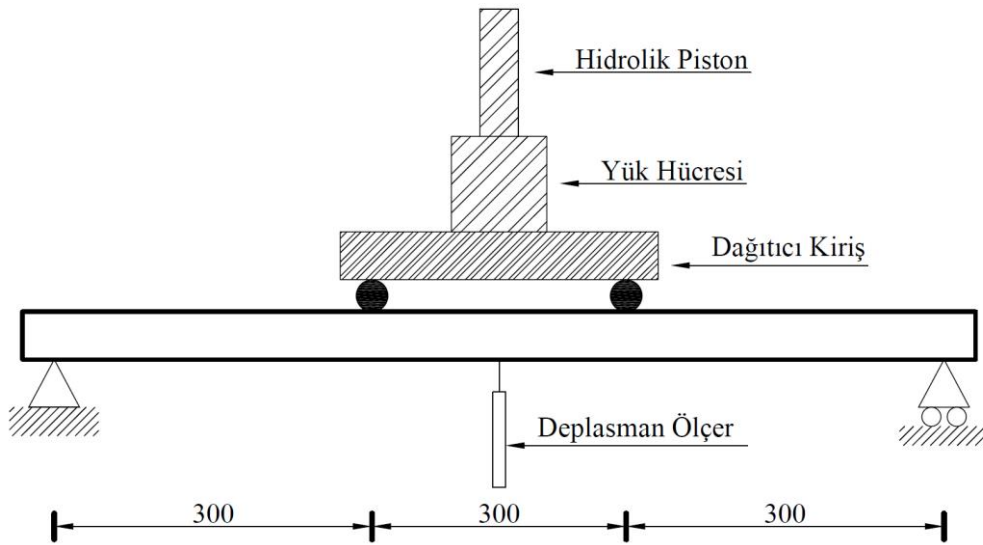
Şekil 2. a) Deneysel düzeneği, b) Veri toplama sistemi

Deney için 3 farklı konfigürasyonda numune hazırlanmıştır. Bu numunelerin özellikleri Tablo 3'te verilmiştir. Tüm numunelerde basınç bölgesinde 2 ϕ 8 montaj donatı kullanılmıştır. Yine tüm numunelerde ϕ 8/200 enine donatılar kullanılmıştır. N1 numunesinde çekme bölgesinde 3 ϕ 8 çelik donatı kullanılmıştır. N2 numunesinde ise 2 ϕ 8 çelik donatının yanında 1 ϕ 8 cam FRP donatı kullanılmıştır. Son olarak N3 numunesinde 3 ϕ 8 cam FRP donatı kullanılmıştır.

Tablo 3. Numunelerin özellikleri

Numune	Numune Ölçüleri (mm)	Boyuna donatı	Enine donatı
N1	100×100×1000	3 ϕ 12 Çelik Donatı	Ø8/200
N2	100×100×1000	2 ϕ 12 Çelik + 1 ϕ 12 Cam FRP Donatı	Ø8/200
N3	100×100×1000	3 ϕ 12 Cam FRP Donatı	Ø8/200

Kirişlerde eğilme hasarının gözlenmesi amaçlandığından oranı kesme açıklığı/faydalı yükseklik 3.5 seçilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Literatürden bilindiği gibi bu oranın 3 ve üzerinde olması durumunda kesme hasarı yerine eğilme ile birlikte kesme ya da eğilme hasarlarının oluşumuna neden olmaktadır [31-32]. Şekil 3'te deney düzeneğinin ölçüleri verilmiştir.



Şekil 3. Deney düzeneği ölçüleri

III. BULGULAR VE TARTIŞMA

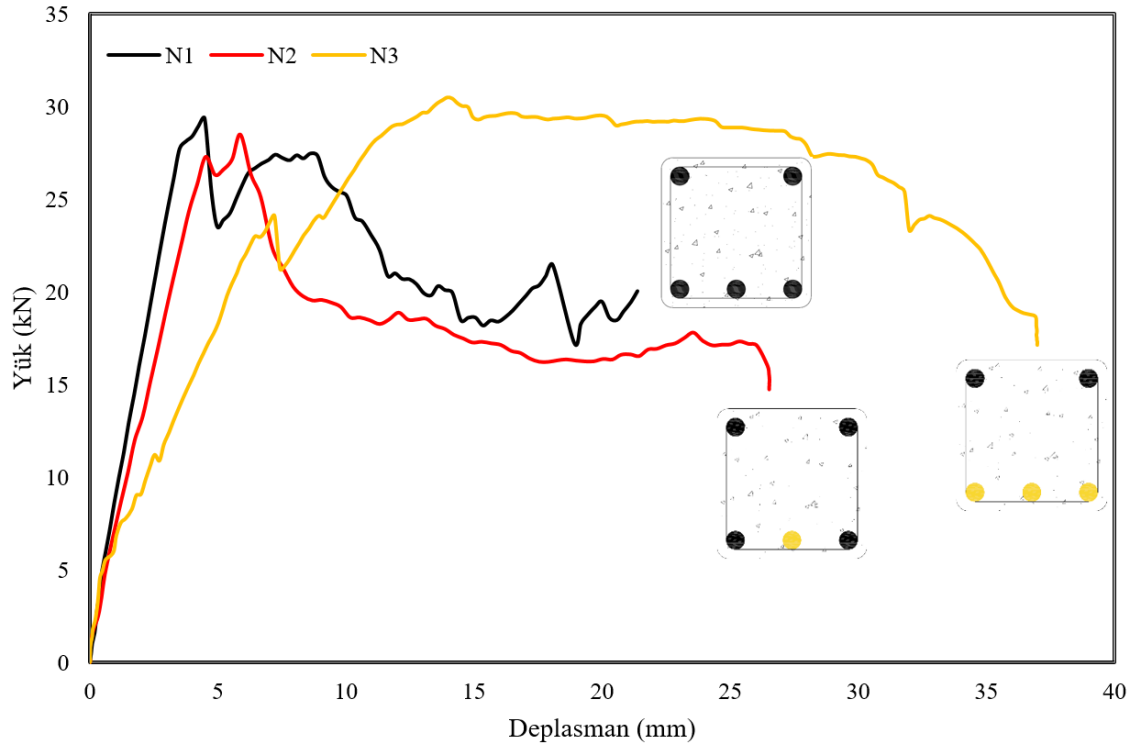
A. DÖRT NOKTA EĞİLME SONUÇLARI

Bu çalışmada çelik, hibrit ve cam FRP donatı olacak şekilde üç farklı donatı konfigürasyonunda kiriş numunesi üretilmiştir. Özellikle son çalışmalarda, deprem bölgelerinde kullanımı artan FRP donatıların homojen yük dağılımı ile birlikte yapı elemanının taşıma kapasitesini artırıcı özelliğe sahip olduğu vurgulanmaktadır. Deney

sırasında gözlem notları alınmış ve deney verileri kaydedilip yük taşıma ve deplasman grafikleri elde edilmiştir.

Şekil 4'te üç farklı donatı konfigürasyonu için deney sonuçları karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir. Numunelerin yük-deplasman eğrilerine bakıldığı zaman N3 numunesinin, N1 ve N2 numunelerine göre daha sünek bir davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra üç numunenin de yük taşıma kapasitelerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Tablo 2'de üç numunenin yük taşıma kapasitesi, süneklik değeri ve enerji sönümlenme kapasitesi verilmiştir. Yük taşıma kapasitesi deney esnasında elde edilen maksimum yük olarak belirlenmiştir. Süneklik değerleri ise [31-32] çalışmalarında açıklandığı şekilde hesaplanmıştır. Süneklik değeri deplasman sünekliği olarak en yüksek deplasmanın akma deplasmanına oranı olarak tanımlanmıştır. Nihai deplasman, elemanın maksimum düşey yük taşıma kapasitesinin %85 değerine düştüğü noktadaki deplasman değeri olarak kabul edilmiştir. Akma deplasman değeri ise orijin noktasından başlayan ve eleman maksimum düşey yük taşıma kapasitesinin tepe öncesinde %85 değerine ulaştığı noktalar arasında çizilen sekant ile tanımlanmış ve bu sekant doğrusu ile maksimum düşey yük seviyesinden yatay olarak uzatılan doğrunun kesiştiği noktadaki tepe deplasmanı değeri akma deplasmanı olarak kabul edilmiştir. Enerji sönümlenme kapasitesi ise yük ve deplasman eğrisi altında kalan alandan hesaplanmıştır.

Tablo 4'teki verilere bakıldığı zaman numunelerin yük taşıma kapasiteleri arasında maksimum %4'lük bir fark olduğu görülmektedir. Ancak N3 numunesi daha sünek davranış gösterdiği için hem enerji sönümlenme kapasitesi hem de süneklik değeri diğer iki numuneden yüksektir. N3 numunesinin süneklik değeri N1 ve N2 numunesinin süneklik değerlerinden sırasıyla %105 ve %76 daha fazladır. Yine aynı şekilde N3 numunesinin enerji sönümlenme kapasitesi N1 ve N2 numunesinin enerji sönümlenme kapasitesinden sırasıyla %131 ve %100 daha fazladır.



Şekil 4. Yük ve deplasman sonuçları

Tablo 4. Deney sonuçlarının karşılaştırılması

Deney Numuneleri	Donatı Düzeni	Süneklik (mm/mm)	Yük Taşıma Kapasitesi (kN)	Enerji Sönümleme Kapasitesi (kN.mm)
N1 (Çelik Donatılı)		1.71	29.3	334
N2 (Hibrit Donatılı)		2.00	28.5	384
N3 (Cam FRP Donatılı)		3.52	30.5	770

B. HASAR ANALİZİ

Şekil 5'te N1 numunesinde gerçekleşen göçme hasarı gösterilmiştir. Şekil 3 ve Şekil 4 birlikte incelendiğinde; çelik donatı kullanılan N1 numunesi elastik bölgede gevrek bir davranış sergilemiş, 29.3 kN yük taşıma kapasitesinde 4.5 mm düşük bir deplasmanla kesme hasarına uğramıştır. Çelik donatılarda belirgin bir deformasyon gözlenmiştir.



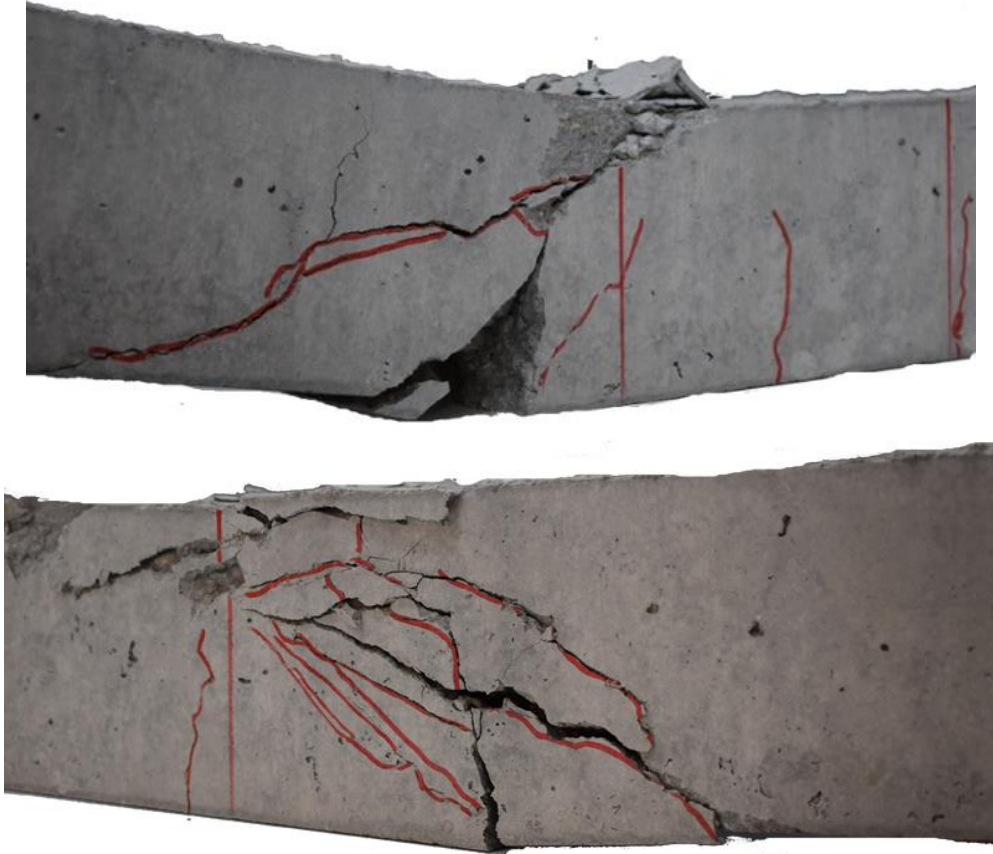
Şekil 5. N1 numunesi göçme hasarı

Şekil 6'da verilen N2 hibrit numunesi incelendiğinde; deplasmanda N1 numunesine göre küçük bir artış gösterse bile yük taşıma kapasitesinde küçük bir düşüşte gözlenmiştir. N1 numunesine göre sünek davranış sergileyen numunede FRP donatının etkisi baskın olarak gözlenmemiştir. Numunenin kesme hasar bölgesi hasarlı beton parçacıklarından temizlenerek yakından incelendiğinde çelik donatılarda ve FRP donatıda belirgin bir hasar gözlenmiştir. Bunun sebebi 2 adet çelik donatı kesme hasar bölgesinde eğilmenin etkisi ile baskın olarak plastik deformasyona uğrar iken FRP donatıda çelik donatılarla birlikte hareket etmiştir. Bu numunede hasar gelişimi N1 çelik donatılı numuneye benzer şekilde gerçekleşmesi ve yük-deplasman grafiklerinin benzer eğilimde olması çelik donatıların hasar gelişiminde baskın olduğunu göstermektedir. Özellikle göçmenin uç bölgede ve kesme hasarı şeklinde oluşması cam FRP donatısının N3 numunesinin hasar gelişimindeki görülen elastik davranışı sergilemesini engellemiştir.



Şekil 6. N2 numunesi göçme hasarı

Şekil 7’de verilen ve çekme bölgesi tamamen cam FRP donatılı N3 numunesi diğer numunelerden tamamen farklı bir davranış sergilemiştir. Çekme bölgesinde yükü homojen bir şekilde taşıyan FRP donatılar numunenin yük taşıma kapasitesini bir miktar artırmakla beraber 14.1 mm deplasman ile enerji sönümleme kapasitesinde N2 numunesine göre yaklaşık %131’e varan ciddi bir artış sağlamıştır. N1 ve N2 numunelerinde kesme çatlakları kirişin tek kenarında oluşurken N3 numunesinde hasarlar kiriş boyunca yayılmıştır. Numune akma anından sonra basma noktalarından başlayarak kesmeli eğilme davranışı sergileyerek göçme konumuna ulaşmıştır. N3 numunesinde oluşan sünek davranış enerji tüketme kapasitesini artırarak tipik eğilme kirişlerine benzer davranışın oluşmasını sağlamıştır. . Hasar bölgeleri incelendiğinde FRP donatılarda belirgin bir hasar oluşmazken donatı sıyrılması da gözlenmemiştir. Hasarlı deney numunesi üzerinden yük kaldırıldığında numunede oluşan sehimde belli bir oranda gerileme oluşmuştur. Bunun sebebi olarak çekme bölgesine yerleştirilen cam FRP donatılarının birlikte uyum içinde elastik bir davranış sergilemesi şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 7. N3 numunesi göçme hasarı

IV. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında üç farklı donatı düzenine sahip (çelik, cam FRP ve hibrit donatı) 1 metre uzunluğundaki betonarme kirişler dört nokta eğilme testine tabi tutulmuşlardır. Bu çalışma kapsamında yapılan sınırlı sayıda deney ile elde edilen bulgular ışığında aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

- ✚ Çekme donatısını cam FRP, çelik veya hibrit olarak kullanmak kirişin maksimum taşıma kapasitesine benzer etki yapmıştır.
- ✚ Çelik ve hibrit donatılı kirişlerin süneklik değerleri birbirine yakın çıkarken cam FRP donatılı kirişin süneklik değeri diğer iki kirişin süneklik değerinin neredeyse iki katıdır. Bu durum FRP malzemesinin klasik betonarme yapıların davranışından farklı olduğunun göstergesidir.
- ✚ Deneysel çalışmada N1 ve N2 numunelerinin başlangıç ve maksimum yük değerindeki rijitlikleri benzerdir. Ancak N3 numunesinin rijitlik değeri diğer iki numuneye göre düşük olsa da maksimum yük taşıma kapasitelerinin benzer olması FRP donatılı betonarme kirişlerin davranışının klasik betonarme kiriş davranışına göre farklılığını belirgin olarak ortaya koymaktadır.
- ✚ Cam FRP donatılı kirişin enerji tüketme kapasitesi çelik donatılı kiriş ve hibrit donatılı kirişin enerji tüketme kapasitesinin 2 katından fazladır.
- ✚ Çelik ve hibrit donatılı kirişlerde donatı hasarı gözlemlenirken cam FRP donatılı kirişte donatı hasarı gözlemlenmemiştir.
- ✚ Cam FRP donatılı kirişte (N3), FRP donatılarda akma gözlenmediğinden göçme konumuna kadar eğilme davranışı sergilemiş ancak göçme konumuna kesme hasarıyla ulaşmıştır. Ayrıca bu numunede meydana gelen kesme hasarı klasik betonarme yapılarda gözlenen ani hasar yerine kademeli olarak ve haberli gerçekleşmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar FRP donatıların klasik yapı çeliğine alternatif olarak kullanılabilmesini göstermektedir. Yapılan sınırlı sayıda çalışma çekme bölgesine boyuna doğrultuda yerleştirilen FRP donatıların betonarme kirişlerin kesme hasarına karşı da katkı sağladığını göstermesi oldukça önemlidir. Bu durum yapı çeliğinin korozyonu düşünüldüğünde FRP donatıların gelecek çalışmalarda alternatif olarak kullanılabilmesine işaret etmektedir.

V. KAYNAKLAR

- [1] E. Madenci. "A refined functional and mixed formulation to static analyses of FGM beams," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 69, no. 4, pp. 427-437, 2019.
- [2] A. Özütok, E. Madenci. "Static analysis of laminated composite beams based on higher-order shear deformation theory by using mixed-type finite element method," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 130, pp. 234-243, 2017.
- [3] E. Madenci, A. Özütok. "Variational approximate and mixed-finite element solution for static analysis of laminated composite plates," *Solid State Phenomena*, vol. 267, pp. 35-39, 2017.
- [4] A. Özütok, E. Madenci. "Free vibration analysis of cross-ply laminated composite beams by mixed finite element formulation," *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, vol. 13, no. 2, pp. 1250056-17, 2013.
- [5] L. Gemi, U. Köklü, Ş. Yazman, S. Morkavuk. "The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-1 mechanical characterization and drilling tests," *Composites Part B: Engineering*, vol. 186, pp. 107787, 2020.
- [6] S. Kocaoz, V. Samaranayake, A. Nanni. "Tensile characterization of glass FRP bars," *Composites Part B: Engineering*, vol. 36, no. 2, pp. 127-134, 2005.
- [7] L. Gemi, M. Kayrıçı, M. Uludağ, D.S. Gemi, Ö.S. Şahin. "Experimental and statistical analysis of low velocity impact response of filament wound composite pipes," *Composites Part B: Engineering*, vol. 149, pp. 38-48, 2018.
- [8] L. Gemi, M.A. Köroğlu, A. Ashour. "Experimental study on compressive behavior and failure analysis of composite concrete confined by glass/epoxy $\pm 55^\circ$ filament wound pipes" *Composite Structures*, vol. 187, pp. 157-168, 2018.
- [9] L. Gemi, S. Morkavuk, U. Köklü, Ş. Yazman. "The effects of stacking sequence on drilling machinability of filament wound hybrid composite pipes: Part-2 damage analysis and surface quality," *Composite Structures*, vol. 235, pp. 111737, 2020.
- [10] A. Ashour. "Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars," *Construction and Building Materials*, vol. 20, no. 10, pp. 1005-1015, 2006.
- [11] M. Robert, P. Cousin, B. Benmokrane. "Durability of GFRP reinforcing bars embedded in moist concrete," *Journal of Composites for Construction*, vol. 13, no. 2, pp. 66-73, 2009.
- [12] M. Robert, B. Benmokrane. "Behavior of GFRP reinforcing bars subjected to extreme temperatures," *Journal of Composites for Construction*, vol. 14, no. 4, pp. 353-360, 2010.
- [13] F. Yan, Z. Lin, M. Yang. "Bond mechanism and bond strength of GFRP bars to concrete: A review," *Composites Part B: Engineering*, vol. 98, pp. 56-69, 2016.
- [14] M.N. Hadi, H. Karim, M.N. Sheikh. "Experimental investigations on circular concrete columns reinforced with GFRP bars and helices under different loading conditions," *Journal of Composites for Construction*, vol. 20, no. 4, pp. 04016009-12, 2016.

- [15] G. Maranan, A. Manalo, B. Benmokrane, W. Karunasena, P. Mendis. "Behavior of concentrically loaded geopolymer-concrete circular columns reinforced longitudinally and transversely with GFRP bars," *Engineering Structures*, vol. 117, pp. 422-436, 2016.
- [16] Z. Wang, X.L. Zhao, G. Xian, G. Wu, R.S. Raman, S. Al-Saadi. "Long-term durability of basalt-and glass-fibre reinforced polymer (BFRP/GFRP) bars in seawater and sea sand concrete environment," *Construction and Building Materials*, vol. 139, pp. 467-489, 2017.
- [17] M. Goldston, A. Remennikov, M.N. Sheikh. "Experimental investigation of the behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars under static and impact loading," *Engineering Structures*, vol. 113, pp. 220-232, 2016.
- [18] L. Gemi, M.A. Koroğlu. "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*, vol. 6, pp. 654-667, 2018.
- [19] A. El Refai, F. Abed, A. Al-Rahmani. "Structural performance and serviceability of concrete beams reinforced with hybrid (GFRP and steel) bars," *Construction and Building Materials*, c. 96, ss. 518-529, 2015.
- [20] E. Madenci, L. Gemi, Y.O. Özkılıç. "An Investigation on Flexure Behavior of Pultruded Glass Fiber Reinforced Polymer Composite Beams," *1st International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology*, pp. 379-384, 2019.
- [21] E. Madenci, Y.O. Özkılıç, L. Gemi. "The Effects of Length to Depth Ratio on the Reinforced Concrete Pultruded GFRP Beams," *1st International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology*, pp. 386-391, 2019.
- [22] Y.O. Özkılıç, E. Madenci, L. Gemi. "Performance of Pultruded Glass Fiber Reinforced Polymer Composite Beams under Quasistatic Load," *5th International Conference on Engineering Science*, pp. 207-2212, 2019.
- [23] Y.O. Özkılıç, L. Gemi, E. Madenci. "Hybrid Reinforced Concrete Filled Pultruded GFRP Beams Strengthened by GFRP Composites," *5th International Conference on Engineering Science*, pp. 213-217, 2019.
- [24] L. Gemi, E. Madenci, Y.O. Özkılıç. "Investigation of Reinforced Concrete-Filled Pultruded Beams Strengthened By GFRP Composite," *The International Aluminium-Themed Engineering and Natural Sciences Conference*, pp. 313-316, 2019.
- [25] L. Gemi, Y.O. Özkılıç, E. Madenci. "An Experimental Investigation on Buckling Behavior of The Pultruded Gfrp Beam," *The International Aluminium-Themed Engineering and Natural Sciences Conference*, ss. 306-308, 4-6 October, Seydişehir, 2019.
- [26] L. Gemi, Y.O. Özkılıç, E. Madenci. "Investigation of Flexural Behavior of FRP Wrapped and Concrete Filled GFRP Box Profile Beams," *VI. International Earthquake Symposium*, pp. 605-610, 25-27 September, Kocaeli, 2019.
- [27] L. Gemi, E. Madenci, Y.O. Özkılıç. "An Investigation on Effect of Steel/Glass Fiber Bars in Concrete Beams," *VI. International Earthquake Symposium*, ss. 651-656, 25-27 September, Kocaeli, 2019.

- [28] Y.O. Özkılıç, E. Madenci, L. Gemi. "Tensile and compressive behaviors of the pultruded GFRP lamina," *Turkish Journal of Engineering (TUJE)*, c. 4, s. 4, ss. 169-175, 2020.
- [29] E. Madenci, Y.O. Özkılıç, L. Gemi. "Experimental and theoretical investigation on flexure performance of pultruded GFRP composite beams with damage analyses," *Composite Structures*, c. 242, ss. 112162, 2020.
- [30] F. Aydın, A. Sarıbıyık, M. Sarıbıyık, M. Ipek, "Experimental Study of Flexural Performance of Reinforced Concrete Beams and Hybrid Beams," *Acta Physica Polonica A*, c. 134, ss. 244-247, 2018.
- [31] L. Gemi, C. Aksoylu, Ş. Yazman, Y.O. Özkılıç, M.H. Arslan. "Experimental investigation of shear capacity and damage analysis of thinned end prefabricated concrete purlins strengthened by CFRP composite," *Composite Structures*, c. 229, ss. 111399, 2019.
- [32] C. Aksoylu, Ş. Yazman, Y.O. Özkılıç, L. Gemi, M.H. Arslan. "Experimental analysis of reinforced concrete shear deficient beams with circular web openings strengthened by CFRP composite," *Composite Structures*, c. 249, ss. 112561, 2020.