









## CFRP lif takviyesi ile onarılan boşluklu betonarme kirişlerin davranışının deneysel incelenmesi

### Experimental investigation of behaviour of reinforced concrete beam with openings repaired using CFRP sheets

Yasin Mohammady<sup>1</sup> , Sıla Yaman<sup>2</sup> , Abdullah Gündoğay<sup>3</sup> , Ceyhun Yüksel<sup>4</sup> ,  
Nebyi Asmerom Negash<sup>5</sup> , Hamide Tekeli Kabaş<sup>6,\*</sup> 

<sup>1,2,3,6</sup> Süleyman Demirel Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 32260, Isparta, Türkiye

<sup>4,5</sup> Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 20160, Denizli, Türkiye

#### Öz

Bu çalışmada, karbon lif takviyeli polimerler (CFRP) kullanılarak onarılan boşluklu betonarme kirişlerin davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Boşluklu ve boşluksuz referans kirişler literatürden seçilmiştir. Çalışma kapsamında, boşluklu referans kirişe eşdeğer özelliklerde üç adet dikdörtgen kesitli betonarme kiriş numune üretilmiştir. Kirişler, boşluk etrafında CFRP kumaş kullanılarak U şeklinde sargı, FRP çapraz ve ankraj uygulamasının farklı kombinasyonlarıyla onarılmıştır. Düşey yük etkisindeki kirişlerin yük taşıma kapasitesi, rijitliği, sünekliği, enerji tüketme kapasitesi ve göçme modu durumlarını değerlendirmek için dört noktalı eğilme deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, CFRP kumaş kullanılarak yapılan onarım uygulamalarının betonarme kiriş davranışı üzerinde önemli katkılarının olduğunu göstermiştir. Çalışmanın değerlendirme parametreleri için en büyük artışlar üç uygulamanın bir arada yapıldığı (U şeklinde sargı, üzerine çapraz FRP ve ankraj) numunede görülmüştür. Bu numune sonuçları boşluklu referans kiriş ile kıyaslandığında yük taşıma kapasitesi, enerji tüketme kapasitesi ve sünekliğinin sırasıyla %4, %51 ve %47 oranlarında arttığı görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Betonarme kiriş, Boşluk, FRP, Onarım

#### 1 Giriş

Betonarme kiriş elemanlar, üzerine etkiyen düşey ve yatay yükleri güvenli bir şekilde taşıyabilecek şekilde tasarlanırlar. Ancak, bazen bina kullanımında iken tesisat borusu, telefon ve elektrik hatlarının geçirilmesi gibi gereklere betonarme kirişlerin gövdesine hasar verilerek boşluklar oluşturulabilmektedir (Şekil 1). Mevcut bir kirişin gövdesinde boşluk açılması, tasarım aşamasında dikkate alınmadığı için yük etkisi altında zayıflıklar oluşturarak elemanın bu bölgelerden hasar görmesine sebep olmaktadır.

Birçok araştırmacı tarafından, imalat aşamasında ya da imalattan sonra gövde boşluğu açılan betonarme kirişlerin davranışları incelenmiştir. Bu çalışmalarda; dairesel

#### Abstract

In this study, the behavior of reinforced concrete (RC) beam with openings repaired using carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) was experimentally investigated. The reference beams with and without opening were selected from literature. Three rectangular RC beams specimens were casted as similar to beam with opening. The beams were repaired by using CFRP sheets around the beam opening with different details. The CFRP details in specimens were applied as different combination of U-shaped, FRP cross and anchors. The tests of four-point bending in beams carried out to evaluate load capacity, stiffness, ductility, energy assumption capacity and failure mode under vertical load. The obtained results showed that the use of CFRP sheets has a significant effect on behavior of RC beams. The greatest increase was seen in specimen which are applied U-shaped, FRP cross and anchors. The beam was improved the load capacity, energy assumption and ductility to approximately 4%, 51% and 47%, respectively, compared to the reference beam with opening.

**Keywords:** Reinforced concrete Beam, Opening, FRP, Repair

boşluklu kirişlerin kare ve dikdörtgen boşluğa sahip kirişlere göre daha büyük yük taşıma kapasitelerinin olduğu [2] ve boşluğun mesnete yaklaşması ile eleman yük taşıma kapasitesinin azaldığı [1, 3-5] görülmüştür. Ayrıca kirişin kesme kırılmasına neden olan bu boşlukların, eleman yük taşıma kapasitesini de önemli ölçüde azalttığı vurgulanmıştır [6,7]. Bu nedenle, farklı amaçlarla sonradan oluşturulan boşluklara sahip kiriş elemanların onarımının mutlaka sağlanması gerekir.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) [8]’nde betonarme kiriş elemanların kesme dayanımlarının ve süneklik kapasitelerinin artırılması için, dıştan etriye eklenmesi ve lifli polimerler ile sarılması önerilmektedir. Son yıllarda onarım ve güçlendirme uygulamalarında lif

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: hamidetekeli@sdu.edu.tr (H. Tekeli Kabaş)

Geliş / Received: 28.02.2022 Kabul / Accepted: 16.05.2022 Yayımlanma / Published: 18.07.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1080586

takviyeli polimerler (FRP), yüksek korozyon dayanımına, yüksek çekme dayanımına ve hafif bir malzeme olma özelliklerine sahip olması nedeniyle tercih sebebi olmuştur [9-12]. Dolayısıyla boşluklu kirişlerin onarımında da kullanılabilir. [1].



Şekil 1. Kirişte sonradan açılan boşluklar [1]

Abdalla vd. [13], kesme bölgesinde boşluk bulunan betonarme kirişlerin güçlendirilmesinde kullanılan FRP miktarının davranış üzerindeki etkinliğini inceleyerek yaklaşık yük taşıma kapasitesinin belirlenmesi için analitik yöntem geliştirmişlerdir. Bu amaçla 10 adet kiriş test edilmiştir. Deney sonuçları; güçlendirme tekniğinin, yük taşıma kapasitesini artırdığını ve hasarın kontrol edilmesinde etkili olduğunu göstermiştir. Pimanmas [14], kesme bölgesinde dairesel ve kare boşluk bulunan 13 adet kirişi FRP ile güçlendirerek, FRP' nin eleman davranışına etkisini analitik ve deneysel olarak incelemiştir. FRP çubukların kiriş derinliği boyunca çapraz şekilde yerleştirildiği numunede, elemanın dayanım ve sünekliği önemli derecede artmıştır. Osman vd. [15], boşluklu betonarme kirişleri, yüzeylerinde aramid elyaf takviye polimerleri (AFRP) kullanarak onarmıştır. Bu amaçla bir adedi boşluksuz ve bir adedi boşluklu referans numune olmak üzere toplam 7 adet kiriş numunesi üretilmiş ve 5 numunede boşluğun etrafı AFRP malzeme ile düşey ve diyagonal olarak sarılmıştır. Sonuçlarda, diyagonal uygulamanın elemanın kesme dayanımını artırmada daha etkili olduğu vurgulanmıştır. Nie vd. [16] tarafından yapılan çalışmada; iki tanesi boşluksuz, diğerleri boşluklu olarak üretilen 8 adet tam ölçekli betonarme kiriş üç noktalı eğilme yükü altında test edilmiştir. Boşluksuz numunelerden biri dikdörtgen kesitli, diğer tüm kirişler ise T-kesitli olarak üretilmiştir. Boşluklu kirişler, CFRP kumaşlar ile güçlendirilmiştir. Çalışma sonucunda; büyük boşlukların eğilme dayanımını düşürebileceğini, gevrek kırılmanın oluşmasını engellemek ve elemanın sünek davranışını sağlamak için CFRP güçlendirme yöntemlerine ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır. Elsanadedy vd. [17], boşluğun elemanın davranışına olan etkisini incelemiştir. Kesme bölgesinde büyük dikdörtgen boşluk bulunan kirişler, FRP uygulaması ile onarılmıştır. Önerilen yöntemin büyük boşluğa sahip kirişlerde etkili olduğu, ancak çok büyük boşluklu kirişlerde etkili olmayabileceği vurgulanmıştır. Salih vd. [18] yaptıkları deneysel çalışmada, CFRP ile onarılan boşluklu betonarme kirişin davranışını incelemiştir. Rijitlik, süneklik, maksimum yük taşıma kapasitesi ve enerji tüketme kapasitesini değerlendirmek amacıyla 7 adet dikdörtgen

kesitli kesme ya da eğilme bölgesinde boşluk bulunan deney numunesi üretilmiştir. Boşluğun konumu, kirişin performansını büyük oranda etkilemiş ve onarım uygulaması ile kiriş kapasite değerlerinin arttığı görülmüştür.

Literatürdeki çalışmalar genel olarak incelendiğinde, boşluklu kirişlerin onarılması için FRP sargılama uygulamasının sıklıkla tercih edildiği ve böylelikle eleman davranışının iyileştirildiği görülebilir. Ancak, FRP malzemesinin eleman yüzeyinden erken ayrılması durumunda etkinliği azalmaktadır. Yapılan çalışma kapsamında, tasarım hesaplarında dikkate alınmayan ve betonarme kiriş elemanın mesnet bölgesinde sonradan oluşturulan boşlukların davranış üzerindeki olumsuz etkilerini iyileştirmek ve FRP ile onarımın etkinliğinin artırılması amaçlanmıştır. Bunun için Qaderi vd. [1] çalışmasındaki numune özelliklerine eşdeğer toplam üç adet boşluklu betonarme kiriş üretilmiştir. Bu kirişler CFRP kumaş kullanılarak farklı detaylarla onarılmış ve etkinliği incelenmiştir.

## 2 Deneysel çalışma

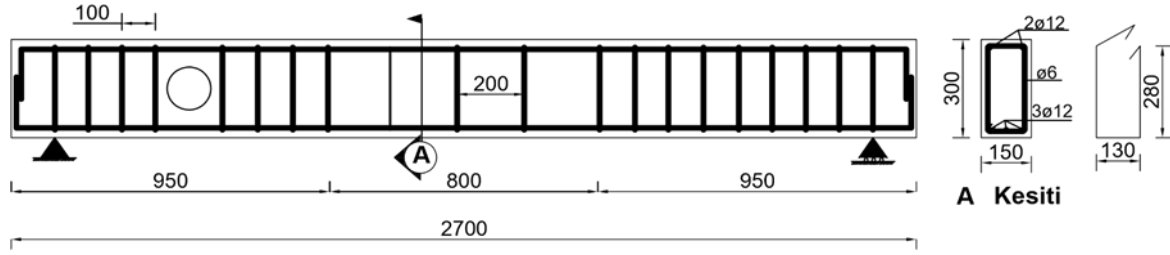
Çalışma kapsamında, Qaderi vd. [1] çalışması ile özdeş olarak kesit boyutları 150 mm×300 mm ve uzunluğu 2700 mm olan üç adet 1/2 ölçekli betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Kirişlerin çekme ve basınç donatıları sırasıyla 3Ø12 ve 2Ø12 olarak seçilmiştir. Enine donatılar Ø6/200/100 aralıklarla yerleştirilmiştir (Şekil 2).

Çalışma kapsamında üç adet kiriş onarılmak üzere boşluklu olarak üretilmiştir. Boşluklar, tüm kirişlerde standart olarak kirişin sol ucundan 525 mm mesafede 150 mm çapında dairesel olarak bırakılmış ve boşluğun hizasında bulunan bir etriye kesilmiştir.

Beton dayanımının belirlenmesi amacıyla 150 mm×150 mm×150 mm boyutlarında küp numuneler alınmıştır. Numunelerin, 28 gün kür işlemi sonundaki eksenel basınç deneylerinden elde edilen ortalama basınç dayanımı 36 MPa'dır. Kiriş üretiminde kullanılan Ø6 ve Ø12 donatıların çekme deneylerinden ortalama akma dayanımları sırasıyla 330 MPa ve 450 MPa olarak elde edilmiştir. Onarım için Spintex SPN U 300 türü CFRP kumaşlar kullanılmıştır. FRP malzemenin mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. FRP uygulamasında; astar, epoksi ve tamir harcı için sırasıyla; Master Brace P3500, Master Brace P4500 SAT ve Master Brace ADH 1406 olmak üzere üç farklı kimyasal malzeme kullanılmıştır. Üç malzeme de iki bileşenli olup kutu üzerinde belirtilen oranlarda karışımları sağlanmıştır.

Tablo 1. FRP malzemenin mekanik özellikleri [19]

Kesit Kalınlığı $t_f$	0.18 mm	
Çekme Dayanımı $f_f$	4200 MPa	
Kopma Uzaması $\epsilon_f$	%1.8 = 0.018	
Elastisite Modülü $E_f$	240 GPa	



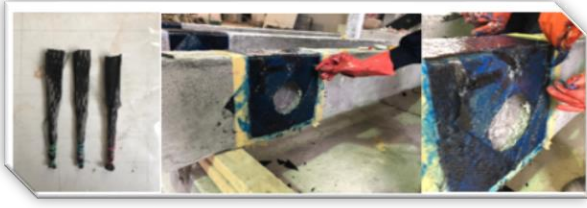
Şekil 2. Donatı krokisi

Tablo 2. Deney numunelerinin detayları

Kiriş İsmi	Onarım Tekniği	Görünümü	Uygulama Detayı
K1-BZR K2-BLR		Boşluksuz referans [1] Boşluklu referans [1]	
K3-OU	U şeklinde FRP sargı		
K4-OUÇ	U şeklinde FRP sargı + FRP çapraz		
5-OUÇA	U şeklinde FRP sargı + FRP çapraz + FRP ankraj		

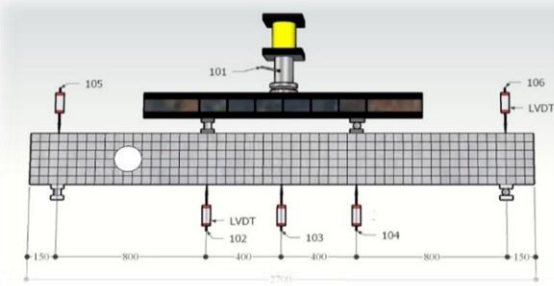
Çalışma kapsamında üretilen boşluklu kirişler FRP kumaş kullanılarak farklı detaylarla onarılmıştır. Tablo 2’de K kısaltması kiriş ifadesini; bu harften sonraki rakam, numune numarasını; BZ, boşluksuz; BL, boşluklu; R, referans; O, onarılan kiriş numunelerini ifade etmektedir. Onarılan tüm numunelerde FRP uygulama detayları, boşluk etrafında U şeklinde sarılarak (U), boşluk etrafında çapraz (Ç) ve FRP ankraj uygulaması (A) şeklinde tanımlanmıştır. Bu üç tanımlama (U, Ç, A) kirişlerde farklı kombinasyonlarla uygulanmıştır. Onarım işlemi, kat döşemesinin varlığı düşünülerek kiriş üstünden 60 mm mesafeye kadar devam ettirilmiştir.

Onarım uygulamasında ilk olarak FRP yapıştırılacak yüzeylerin sivri köşelerinde yuvarlatma yapılmış ve yüzeyi pürüzlendirilmiştir. Daha sonra yüzeye sırasıyla astar, tamir harcı ve epoksi uygulanarak CFRP kumaş yüzeye yapıştırılmıştır. K5-OUÇA numunesinde uygulanacak sekiz adet ankraj için 10 mm çapında ve 65 mm derinliğinde delikler oluşturulmuş ve hava kompresörü yardımıyla toz ve kirden temizlenmiştir. Uygulanacak ankraj için kesilen CFRP kumaş 6 mm çaplı donatı etrafına sarılarak ucu ipe bağlanmıştır. Numune yüzeyinde açılan ankraj delikleri şırınga aracılığıyla epoksi ile doldurulmuştur. Hazırlanan ankraj elemanları bu deliklere yerleştirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. FRP ankrajın uygulanması

Üretimleri tamamlanan kiriş numuneleri dört noktalı eğilme testine maruz bırakılmıştır. Düşey yük, hidrolik silindir ve yük hücresi yardımıyla uygulanmıştır. Deney sırasında oluşturulan yükleme düzeneği ve yerdeğiştirme ölçümü için kullanılan LVDT cihazlarının konumları Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. Yükleme sistemi ve yerdeğiştirme ölçerlerin konumları

### 3 Deneysel sonuçları

Deney numunelerinin onarım işlemi tamamlanarak dört noktalı eğilme deneyleri yapılmıştır. Deney yerdeğiştirme kontrollü ve hasarın farklı aşamalarda kontrol edilebilmesi için tekrarlı olarak uygulanmıştır. Deney numunelerinde gözlenen ve işaretlenen hasarlar Şekil 5’te sunulmuştur. Qaderi vd. [1] çalışmasında, hasarsız numunenin (K1-BZR) eğilme hasarı ve çok sayıda kılcal çatlama sonra beton

ezilmesi ile güç tükenmesine ulaştığı belirtilmiştir. Aynı çalışma sonuçlarına göre, boşluklu numunede (K2-BLR) ilk kılcal çatlama hasarı eğilme çatlama şeklinde ortaya çıkmış ve ilerleyen yükleme adımlarında boşluk kenarında ani olarak gelişen kesme hasarı ile güç tükenmesi görülmüştür. Yapılan çalışmada boşluklu kiriş elemanda meydana gelen bu ani kesme kırılmasının önlenmesi ve davranışın iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

CFRP kumaş yardımıyla onarılan numunelerin tümünde yine ilk kılcal çatlama eğilme hasarı şeklinde ortaya çıkmıştır. U şeklinde sargılama yapılan K3-OU numunesinde kiriş açıklık ortasında 75 mm yerdeğiştirmeye ulaşıldığında FRP’ de betondan ayrılma ve yırtılmanın meydana gelmesi (Şekil 6.a) ile birlikte boşluk tarafında ani olarak kesme hasarı ortaya çıkmış ve numune güç tükenmesine ulaşmıştır. Dolayısıyla numunenin sadece U şeklinde FRP ile onarılması, istenen davranışın sağlanmasında tam olarak etkili olamamıştır. Boşluk etrafında U-FRP üzerine çapraz şekilde FRP yapıştırılan K4-OUÇ numunesinde ise, yerdeğiştirmenin 27 mm’ye ulaşması ile U şeklindeki FRP’ nin köşesinde ayrılma hasarı ortaya çıkmıştır (Şekil 6.b). Ancak U şeklindeki sargının üzerine çapraz şekilde yerleştirilen FRP ayrılma hasarının ilerlemesini engellediği için bir önceki numunede meydana gelen ani kesme kırılması bu kiriş elemanda gözlenmemiştir. Numune beton basınç bölgesinin ezilmesi ile güç tükenmesine ulaşmıştır. U ve çapraz FRP’ nin üzerine ankraj uygulanan son onarım numunesinde (K5-OUÇA) ise deney boyunca herhangi bir FRP ayrılması veya yırtılması gözlenmemiştir. Dolayısıyla kiriş eleman eğilme çatlaklarının ilerlemesi ve genişlemesi neticesinde basınç bölgesindeki betonun ezilmesi ile güç tükenmesine ulaşmıştır.

Deneyler sırasında tüm numuneler için elde edilen yük-yerdeğiştirme grafikleri ve oluşturulan zarf eğrileri Şekil 7’de verilmiştir.

Tüm numuneler için elde edilen yük-yerdeğiştirme grafiklerinin zarf eğrileri kıyaslamalı olarak Şekil 8’de verilmiştir.



(a) K1-BZR [1]



(b) K2-BLR [1]



(c) K3-OU

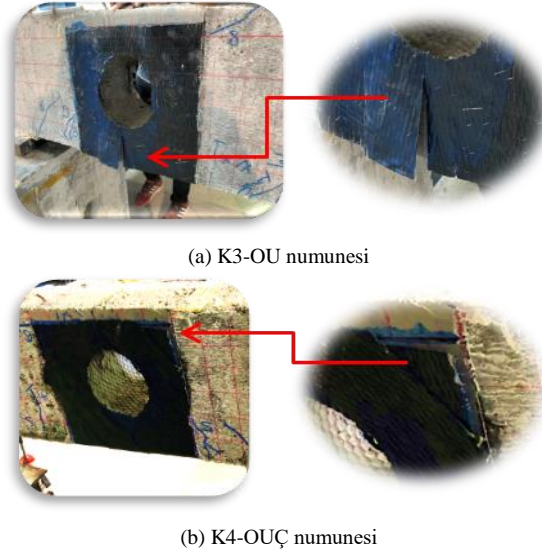


(d) K4-OUÇ

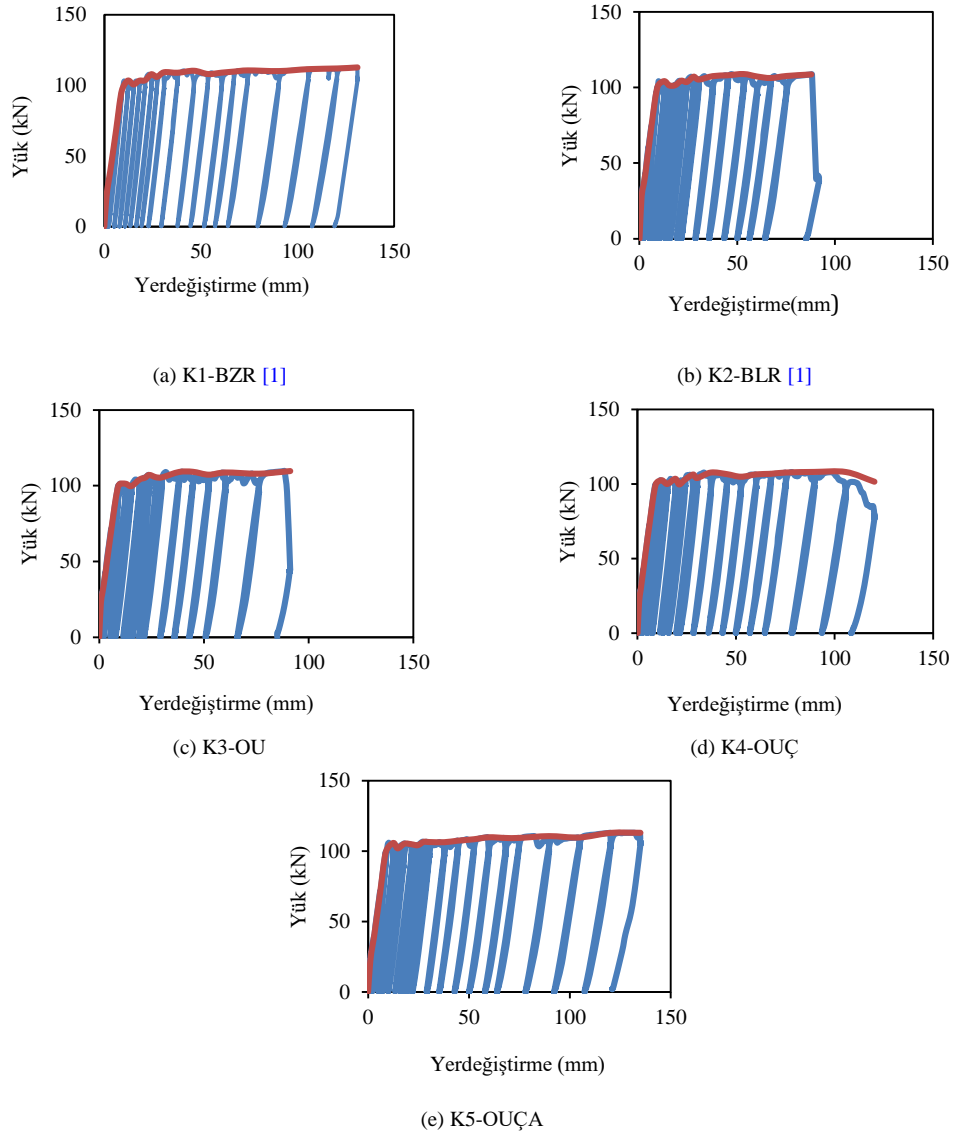


(e) K5-OUÇA

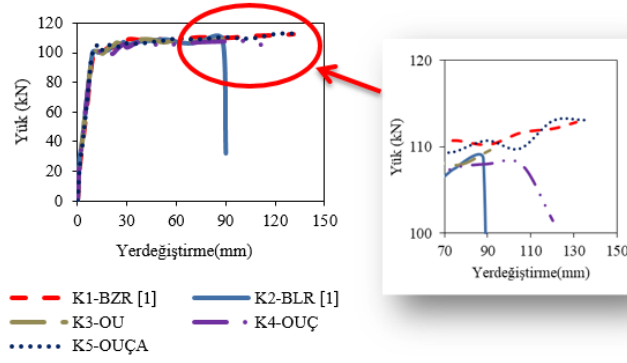
Şekil 5. Numunelerin güç tükenme seviyesindeki hasar durumları



Şekil 6. Numunelerde meydana gelen FRP ayrılma ve yırtılmaları



Şekil 7. Numunelere ait yük-yerdeğiştirme grafikleri



Şekil 8. Tüm numunelere ait yük-yerdeğiştirme grafiklerinin zarf eğrileri

Deney numunelerine ait yük taşıma kapasiteleri (P), kümülatif enerji tüketme kapasiteleri (E), başlangıç rijitlikleri (K), akma anındaki yerdeğiştirmeleri ( $\Delta y$ ), güç tükenmesi durumundaki yerdeğiştirmeleri ( $\Delta u$ ) ve bu yerdeğiştirmelere bağlı olarak hesaplanan sünekliliklerine ( $\mu$ ) ait elde edilen sonuçlar Tablo 3' te verilmiştir. Ayrıca kıyaslamaların daha rahat yapılabilmesi için onarılan numuneler için elde edilen değerler, sırasıyla boşluksuz (K1-BZR) ve boşluklu (K2-BLR) referans numune değerleri ile kıyaslanarak artış ve azalış yüzdeleri elde edilmiştir (Tablo 4). Tablo 4' te; pozitif değerler artışı, negatif değerler ise azalışı göstermektedir. Taşıma kapasitesi ile deney sırasında ulaşılan en büyük yük değeri ifade edilmektedir. Deney numunelerinin tamamı eğilme kapasitesine ulaştığı için numuneler arasında elde edilen yük taşıma kapasiteleri açısından önemli bir farklılık görülmemekle birlikte en büyük yük taşıma kapasitesine K5-OUÇA numunesi ulaşmıştır.

Numunelere ait enerji tüketimi hesabında, her bir çevrimin içinde kalan alan hesaplanmış ve bu değerler toplanarak kümülatif enerji tüketimi değeri elde edilmiştir. Onarılan numuneler arasında en düşük enerji tüketimi K3-OU numunesinde, en yüksek değer ise K5-OUÇA numunesinde ortaya çıkmaktadır. Boşluksuz ve boşluklu referans numuneler ile kıyaslama yapıldığında K5-OUÇA numunesinde sırasıyla %3 ve %51 artış gözlenmiştir. Bu numune için enerji tüketimi değerlerinin boşluksuz referans

numunedeki değere ulaştığı ve boşluklu numuneye göre en büyük artışın ortaya çıktığı söylenebilir. K3-OU numunesinde ise boşluksuz numuneye göre %31 azalma görülürken, boşluklu numuneye göre %1 artış görülmüştür. Dolayısıyla enerji tüketimi açısından K3-OU numunesi neredeyse boşluklu numunenin değerlerine sahiptir. Dolayısıyla enerji tüketimi açısından diğer onarım yöntemlerine kıyasla yetersiz kalmaktadır.

Rijitlik değerleri numunenin açıklık ortasında 1,5 mm yerdeğiştirme seviyesindeki değerler hesaplanarak dikkate alınmıştır. Referans numunelere göre tüm numunelerin rijitliklerinde azalma görülmekte ve boşluksuz referans numunenin değeri karşılanamamaktadır. Elde edilen sonuçlardan uygulanan onarım yönteminin numune rijitliğini etkilemediği görülmüştür. Onarılan numuneler arasında davranış olarak en belirgin farklılık, enerji tüketimi ve süneklilik açısından meydana gelmiştir.

Numunelerin sünekliliği, nihai seviyedeki yerdeğiştirme değerinin akma anındaki yerdeğiştirme değerine oranlanması ile elde edilmiştir. Boşluklu numuneye göre tüm numunelerde artış meydana gelmiştir. Onarılan numuneler arasındaki en büyük süneklilik K5-OUÇA numunesinde, en düşük süneklilik ise K3-OU numunesinde elde edilmiştir. Sonuçlardan, K4-OUÇ ve K5-OUÇA numunelerinde elde edilen süneklilik değerinin boşluksuz referans numune değerine ulaştığı görülebilir.

Tablo 3. Deney numunelerinin sonuçları

Numune ismi	P (kN)	E (kNmm)	K (kN/mm)	$\Delta y$ (mm)	$\Delta u$ (mm)	$\mu$
K1-BZR [1]	112.83	13 978.00	41.15	10.20	131.00	12.84
K2-BLR [1]	108.84	9 524.00	37.54	9.20	88.00	9.57
K3-OU	109.60	9 643.60	36.35	9.18	91.13	9.93
K4-OUÇ	108.00	12 576.56	33.12	9.16	120.15	13.12
K5-OUÇA	113.08	14 393.10	34.59	9.80	138.02	14.08

Tablo 4. Deney sonuçlarının referans numunelerle kıyaslanması

Numune ismi	Referans	P (%)	E (%)	K (%)	$\mu$ (%)
K3-OU	K1-BZR	-3	-31	-12	-23
	K2-BLR	1	1	-3	4
K4-OUÇ	K1-BZR	-4	-10	-20	2
	K2-BLR	-1	32	-12	37
K5-OUÇA	K1-BZR	0	3	-16	10
	K2-BLR	4	51	-8	47

#### 4 Tartışma ve sonuç

Bu çalışmada; tasarım esnasında dikkate alınmayan boşluklara sahip kirişlerin CFRP kumaş ile onarılması ve FRP onarımının etkinliğinin artırılması hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, Qaderi vd. [1] çalışmasındaki numune özelliklerinde üç adet boşluklu betonarme kiriş numunesi üretilmiştir. Boşluğun etrafı CFRP kumaş ile U, U+çapraz ve U+çapraz+ankraj olacak şekilde onarılmış ve uygulanan yöntemin davranış üzerindeki etkinliği incelenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Boşluk etrafında sadece U şeklinde sargılama yapılan K3-OU numunesi, FRP ayrılması ile ani kesme hasarı oluşarak güç tükenmesine ulaşmıştır. Benzer şekilde U-FRP üzerine çapraz olarak FRP uygulanan K4-OUÇ numunesinde de FRP kenarında ayrılma hasarı başlamış ancak üzerinde bulunan çapraz şeklindeki FRP, ayrılmanın devam etmesini önlemiştir. Dolayısıyla numune beton basınç bölgesindeki betonun ezilmesi ile güç tükenmesine ulaşmıştır. U-FRP ve çapraz FRP'nin üzerine ankraj uygulanan son onarım numunesinde (K5-OUÇA) ise herhangi bir FRP hasarı ya da ayrılması meydana gelmemiştir. Bu numune, çok sayıda eğilme hasarının oluşması ve basınç bölgesindeki betonun ezilmesi ile güç tükenmesine ulaşmıştır.

2. Onarılan tüm numunelerin yük taşıma kapasitesi birbirine oldukça yakındır. En büyük yük taşıma kapasitesine ulaşan K5-OUÇA numunesinde boşluklu referans numune ile kıyaslandığında %4 kapasite artışı görülmüştür.

3. Onarılan numunelerin enerji tüketimi değerleri, boşluklu referans kirişin değerleri ile kıyaslandığında tüm numunelerde artış olduğu görülebilir. En büyük artış %51 ile K5-OUÇA numunesinde, en küçük artış ise %1 ile K3-OU numunesinde görülmüştür. Enerji tüketimi için K3-OU numunesi neredeyse boşluklu numunenin değerlerine sahiptir. Dolayısıyla bu numunedeki onarım tekniği enerji tüketimi açısından diğer onarım uygulamalarına kıyasla yetersiz kalmaktadır. Aynı zamanda elde edilen sonuçlardan boşluksuz referans numunenin değerine sadece K5-OUÇA numunesinin ulaştığı görülebilir. Dolayısıyla onarım için en etkili uygulama olarak karşımıza çıkmaktadır.

4. Referans numunelere göre tüm numunelerin rijitliklerinde azalma görülmüş ve boşluksuz referans numunenin değeri karşılanamamıştır. Dolayısıyla uygulanan onarım yönteminin numune rijitliğini fazla etkilemediği söylenebilir.

5. Numunelerdeki onarım uygulamasının en etkili olduğu parametrelerden biri de süneklik olarak karşımıza çıkmaktadır. Numunelerin sünekliği açısından boşluklu numuneye göre tüm numunelerde artış meydana gelmiştir. K4-OUÇ ve K5-OUÇA numunelerinde elde edilen süneklik değeri boşluksuz referans numune değerine ulaşmıştır. Boşluksuz ve boşluklu referans numuneler ile kıyaslandığında K3-OU numunesinde sırasıyla %23 azalma ve %4 artma meydana gelirken, K5-OUÇA numunesinde %10 ve %47 artma meydana gelmiştir.

6. Tüm numuneler genel olarak değerlendirildiğinde, yük taşıma kapasitesi, enerji tüketimi ve süneklik açısından U, çapraz ve ankrajın birlikte uygulandığı K5-OUÇA numunesinin en iyi sonuçları verdiği ve boşluksuz referans kirişin değerlerine ulaştığı için seçilen yöntemler arasında en etkili onarım yöntemi olduğu söylenebilir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

#### Benzerlik oranı (iThenticate): %7

#### Kaynaklar

- [1] A. Qaderi, M. B. Saoud, V. Eren, A. Gündoğay, S. Yaman ve H. Tekeli Kabaş, Eğilme etkisindeki büyük dairesel boşluklu kirişlerin davranışının deneysel incelenmesi. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, Basım Aşamasında, 2022.
- [2] F. M. Özkal, Betonarme yüksek kirişlerde boşluk konumu ve şeklinin yapısal davranış üzerindeki etkilerinin deneysel olarak incelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 22 (2), 149-160, 2017 <https://doi.org/10.17482/uumfd.338788>.
- [3] M. A. Mansur, K.H. Tan, and W. Wei, Effects of creating an opening in existing beams. ACI Structural Journal, 96(6), 899-905, 1999.
- [4] K. H. Tan and M. A. Mansur, Design procedure for reinforced concrete beams with large web openings. ACI Structural Journal, 404, 1996.
- [5] A. Qaderi, Eğilme etkisindeki büyük dairesel boşluklu kirişlerin davranışının deneysel incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2019.
- [6] İ. Kalkan, Düzenli boşluklu betonarme kirişlerin düzlem içi eğilme davranışları. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29(1), 155-163, 2014. <https://doi.org/10.17341/gummfd.94985>.
- [7] Y. Mohammady, Büyük dairesel boşluklu betonarme kirişlerin güçlendirilmesinin deneysel incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Türkiye, 2020.
- [8] TBDY, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı için Esaslar. Türkiye Cumhuriyeti Afet ve Acil Durum Başkanlığı, Ankara, 2018.
- [9] W. Aldhabir, A. Sarıbyık ve E. Aydın, CFRP ile güçlendirilmiş eğilme yükü etkisindeki betonarme kirişlerin sonlu elemanlar yöntemi ile analizi. 6. International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, sayfa 1062-1071, Alanya-Antalya, Türkiye, 9-11 Kasım 2018.
- [10] S. Alshlash, C. Aksoylu, İ. H. Erkan ve M. H. Arslan, Ön hasarlı kesme kirişlerinin CFRP ile onarım ve güçlendirilmesi. IV. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi-Mühendislik, sayfa 172-177, Ankara, Türkiye 7-10 Kasım 2019.
- [11] İ. H. Erkan, C. Aksoylu, S. Alshlash ve M. H. Arslan, Eğilmeye çalışan betonarme kirişlerde CFRP ile

- onarım ve güçlendirme yöntemlerinin deneysel olarak irdelenmesi. IV. Uluslararası Bilimsel ve Mesleki Çalışmalar Kongresi-Mühendislik, sayfa 163-171, Ankara, Türkiye 7-10 Kasım 2019.
- [12] M. M. Maraş, Betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılan FRP kompozitin yapısal performansa etkisi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 23, 108-119, 2021. <https://doi.org/10.31590/ejosat.797437>.
- [13] H. A. Abdalla, A. M. Torkey, H. A. Haggag and A. F. Abu-Amira, Design against cracking at openings in reinforced concrete beams strengthened with composite sheets. Composite Structures, 60, 197–204, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00305-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00305-7).
- [14] A. Pimannas, Strengthening R/C beams with opening by externally installed FRP rods: behavior and analysis. Composite Structures, 92 , 1957–1976, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.11.031>.
- [15] B. H. Osman, E. Wu and S. S. Abdulhameed, Repair of pre-cracked reinforced concrete (RC) beams with openings strengthened using FRP sheets under sustained load. International Journal of Concrete Structures and Materials, 11(1), 171–183, 2017. <https://doi.org/10.1007/s40069-016-0182-3>.
- [16] X. F. Nie, S. S. Zhang, J. G. Teng and G. M. Ghen, Experimental study on RC T-section beams with an FRP-strengthened web opening. Composite Structures, 185, 273–285, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.018>.
- [17] H. M. Elsanadey, Y. A. Al-solloum, T. H. Almusallam, A. O. Alshenawy and H. Abbas, Experimental and numerical study on FRP-upgraded RC beams with large rectangular web openings in shear zones. Construction and Building Materials, 194, 322–343, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.238>.
- [18] R. Salih, F. Zhou, N. Abbas and A. K. Mostoi, Experimental investigation of reinforced concrete beam with openings strengthened using FRP sheets under cyclic load. Materials, 13 (14), 3127, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13143127>.
- [19] Cvc, 2022. FRP Ürün Kataloğu. <http://www.cvc.com.tr/pdfler/755cvc-spn-u-300-frp-6db350a6-e.pdf> , Erişim Tarihi: 25 Ocak 2022.

