

ÇELİK KORNİYER VE LAMALAR YAPIŞTIRMAK SURETİYLE BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLMEYE KARŞI GÜÇLENDİRİLMESİ

E. Ebru DEMİRCİ^{1*}, Ayla P. Amil², Remzi Şahin³

¹Karayolları 12. Bölge Müd., Erzurum

²Emekli Öğretim Üyesi, İstanbul

³Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fak., İnşaat Böl., Erzurum

Özet

Bu çalışma, epoksi ile çelik korniyer ve/veya lama yapıştırılarak güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme altındaki davranışını karşılaştırmalı olarak incelemek için yapılmıştır. Bu amaçla, tamamı 15x30x150 cm boyutlarında olan dört farklı kiriş tipi kullanılmıştır. 1. tip kiriş (K1) referans numune olup herhangi bir güçlendirme işlemi uygulanmamıştır. 2. tip kirişde (K2), kirişin alt köşelerine kiriş boyunca 50x50x5 mm boyutlarında korniyerler yapıştırılmıştır. 3. tip kirişde (K3), kirişin alt köşelerine kiriş boyunca 30x30x3 mm'lik korniyerler ve kirişin alt yüzüne 30x3 mm'lik lamalar yapıştırılarak güçlendirme işlemi uygulanmıştır. 4. tip kiriş (K4) ise K3 kirişi gibi güçlendirilmiş, ilave olarak da, kirişin yan yüzeylerine 40 cm aralıklarla 30x3 mm'lik lamalar yapıştırılmıştır. Sonuçların değerlendirilmesinden kiriş alt yüzlerine 50x50x5 mm boyutunda korniyer yapıştırılarak yapılan güçlendirmenin (K2) taşıma gücünde maksimum artış, yer değiştirmede maksimum azalış sağladığı görülmüştür. Korniyer boyutlarının büyük olmasının sonuçlar üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir. Profil boyutundaki artışın çatlak genişliği ve sayısıyla ters orantılı, buna karşın, kirişin yük taşıma kapasitesinin artması ile doğru orantılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Betonarme kiriş, güçlendirme, epoksi, korniyer, lama

FLEXURAL RETROFITTING OF RC BEAMS BY GLUING STEEL CORNERS AND PLATES

Abstract

The aim of this study is to investigate comparatively flexural behaviour of reinforced concrete (RC) beams strengthened with steel corners and/or plates under bending. For this purpose, four different types of RC beams with the size of 15x30x150 cm were produced. The first type of the beams (K1), which was not strengthened, was the reference sample. The steel corners with the size of 50x50x5 mm were glued to the bottom corners of the beam for the second type of the beams (K2). For the third type of beams (K3), both the steel corners with the size of 30x30x3 mm and steel plates with the size of 30x3 mm were glued to the bottom corners and the lower surface of the beam to achieve strengthening process, respectively. The fourth type of the beams (K4) was strengthened as indicated in K3 and the steel plates with the size of 30x3 mm and intervals of 40 cm were glued to the lateral surfaces of the beam additionally. It was observed that strengthening obtained by gluing corners with the size of 50x50x5 mm to the bottom corners of the beam (K2) provided maximum increase at the load carrying capacity and maximum decrease at the deflection of the beams. It was deduced from the experiments that the corners with larger dimensions were more effective on the results. It is concluded that the increase in the dimension of the corners is inversely proportional to the width and number of the cracks, while it is proportional to the strength of the beam gained with retrofitting.

Keywords: Reinforced concrete beam, retrofit, epoxy, steel corner, steel plate

* E-posta: ebrutaslibeyaz@yahoo.com

1. Giriş

Yapılar; görünüş ve/veya yük taşıma kapasitesi, rijitlik, duktilite ve dayanıklılık gibi kullanım özellikleri bakımından hasar öncesi durumuna getirilmek üzere onarılabilirler. Bazı durumlarda da (yukarıda belirtilen özelliklerin tamamı veya bir kısmını mevcut durumunun üzerine çıkarmak amacı ile) yapıların güçlendirilmesi gerekir [1].

Yapıların ve/veya yapı elemanlarının güçlendirilmesi için farklı malzeme ve yöntemler geliştirilmiştir. Günümüzde, eğilme etkisi altında kalan elemanların güçlendirilmesinde, FRP (Fiber Reinforced Polymer) ya da CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) ile güçlendirme yöntemleri üzerinde çalışmalar [2-12] yürütülmekle birlikte mantolama gibi klasik yöntemlerle kirişlerin güçlendirilebileceğini belirten araştırmacılar [1,13] da vardır.

Betonarme elemanlar, enine ve boyuna doğrultularda çelik şeritler kullanılarak da güçlendirilebilir. Bu yöntemde, çeşitli kalınlıklarda çelik şeritler kirişin alt ve yan yüzlerine ve kiriş-kolon birleşim bölgesine epoksi reçinesi ile yapıştırılarak ve/veya cıvatalar yardımıyla sabitlenerek kullanılmaktadır [14,13,15]. Oh v.d. (2003) [16] çelik levhalarla güçlendirilmiş betonarme kirişlerin statik ve dinamik yükler altında yorulma davranışlarını incelemek amacıyla yaptığı deneysel çalışmada; güçlendirilmiş kirişlerin nihai dayanımının yapıştırıcı tabakanın kalınlığı ile arttığını ve güçlendirilmiş kirişlerin aynı yorulma yük düzeyinde, güçlendirilmemiş kirişlere göre, daha yüksek yorulma dayanımı değerine sahip olduğunu belirlemiştir. Sharif v.d. (1995) [17] ise dış yüzüne çelik levha yapıştırmak suretiyle güçlendirdiği tüm kesme hasarlı betonarme kirişlerin dayanım değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Li v.d. (2000) [18] da güçlendirilmiş beton kirişlerin davranışları üzerinde çelik levha ve yapıştırıcı tabaka kalınlığının etkisini incelediği çalışmada, kirişin eğilme dayanımının yapışkan tabakanın kalınlığını artırmakla artmadığını, buna karşın, çok yüksek yük değerlerinde çelik levha ve betonda meydana gelen gerilmenin yapıştırıcı tabakanın kalınlığının artırılmasıyla arttığını tespit etmiştir.

Tankut ve Arslan (1992) [19] ise değişik tipte epoksiyle yapıştırılan çelik levhalarla güçlendirilen özdeş betonarme kiriş numuneleri üzerinde yaptıkları çalışmada; güçlendirme plakasının yeterince uzun olduğu ve plaka uçlarının kiriş donatısına kaynaklanarak ya da epoksili başlıklar kullanılarak yerinde tutulduğu kirişlerde yeterli dayanım düzeyine ulaşabileceği sonucuna varmışlardır. Ancak, bu yöntemde işçilik düzeyinin çok önemli olduğu ve uygulamanın başarısını büyük ölçüde etkilediği vurgulanmıştır.

Swany v.d. (1987) [20] da epoksi ile yapıştırılan çelik levhalarla güçlendirilen kirişlerin yapısal davranışını incelemiş ve güçlendirilen kirişlerin eğilme dayanımında %15 artış gözlemlenmiştir. Adhikarya v.d. (2000) [21] ise kiriş yüzeylerine sürekli yatay çelik levha yapıştırarak yapılan güçlendirme tekniğinin kirişin kesme dayanımında etkili olduğunu belirlemiştir. Oehlers (1990) [22] de betonarme kirişlerin alt yüzlerine çelik levha yapıştırmak suretiyle güçlendirdiği kirişlerin, eğilme ve kesme dayanımında artış, eğilme çatlaklarının genişliğinde ise azalma tesbit etmiştir. Barnes v.d. (2001) [14] ise betonarme kirişleri kesme dayanımı açısından güçlendirmek için kullanılan dış çelik levha sistemini araştırmış ve yan yüzeylerine çelik levhalar bağlanan kirişlerin kesme kapasitelerinde büyük artış gözlemlenmiştir. Son yıllarda üzerinde çalışılan yeni bir güçlendirme uygulaması da kelepçelerle güçlendirme yöntemidir. Bu yöntemde, kesme dayanımı yetersiz betonarme kirişler, eleman dışından çeşitli düzenlerle yerleştirilen kelepçelerle kesmeye karşı güçlendirilmektedir. Bu çalışmalar [23,24] sonucunda; uygulanan güçlendirme yönteminin etkili olduğu ve güçlendirme uygulanan numunelerin dayanım, rijitlik ve duktilitelerinin arttığı görülmüştür.

Bu çalışmada ise korniyer (çelik L profil) ve/veya lamaların epoksi reçinesi ile betonarme kirişlerin yan ve alt yüzeylerine yapıştırılması suretiyle yapılan güçlendirmenin kirişin eğilme davranışı üzerindeki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Literatürde görülen noksanlık konunun seçilmesinde belirleyici olmuştur.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Malzemeler, beton üretimi ve deneylerde kullanılan aletler

Çalışmada, özellikleri Çizelge 1'de verilen, Normal Portland Çimentosu (CEM I 42,5) kullanılmıştır. Maksimum agregata tane boyutu 16 mm seçilmiş olup agregata karışıma iki sınıfa (0/4 ve 4/16) ayrılmış olarak konulmuştur. İnce/iri agregata oranı 45/55'dir. Karışım granülometrisi A16/B16 eğrilerinin arasında kalacak şekilde belirlenmiştir. Kimyasal katkı olarak ise yoğunluğu $1.20 \pm 0.02 \text{ kg/dm}^3$ olan ve karışıma çimento ağırlığının %2'si oranında katılan süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.

Çizelge 1. Çimentonun fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri

Fiziksel ve mekanik özellikler		Kimyasal özellikler		
		Kimyasal Bileşen	Oran (%)	
Özgül ağırlık (gr/cm^3)	2.82	SiO_2	27.5	
Özgül yüzey (cm^2/gr)	3900	Al_2O_3	6.66	
Litre ağırlığı (gr)	929	Fe_2O_3	4.41	
Priz başlangıcı (saat-dk)	3sa-26dk	CaO	47.5	
Priz sonu (saat-dk)	4sa-22dk	MgO	2.91	
Hacim genişmesi (mm)	1	SO_3	1.81	
Basınç dayanımı (MPa)	2. gün	13.4	Kızdırma kaybı	6.9
	7. gün	24.1	Na_2O	0.57
	28. gün	38.3	K_2O	0.64
Eğilme ayanımı (MPa)	2. gün	3.1	Cl	0.012
	7. gün	4.7	Ölçülemeyen	0.98
	28. gün	6.7	Toplam	100

Su/çimento oranı 0.53, çimento dozajı $300 \text{ kg}/\text{m}^3$, beton sınıfı C20/25 olacak şekilde karışım hesabı yapılan betonlar 100 dm^3 hacimli betonyerde üretildikten sonra çelik kalıplara yerleştirilmiştir. Yerleştirme işleminden önce kalıbın tüm iç yüzeyleri yağlanmış ve önceden hazırlanan donatı kalıbın içine, paspayı 25 mm olacak şekilde, yerleştirildikten sonra beton kalıba dökülmüştür. Betonlar üç tabaka halinde konmuş ve her bir tabaka laboratuvar tipi iç vibratörle kalıp boyunca ortalama 30 cm aralıklarla ve 20 saniye süreyle sıkıştırılmıştır. Sıkıştırma ve yerleştirme işlemlerinden sonra, beton yüzeyi mala ile düzeltilmiş ve nem kaybını önlemek için üzeri naylon örtü ile örtüldükten sonra sertleşmeye bırakılmıştır. 72 saat boyunca kalıpta duran kiriş numuneleri bu süre sonunda kalıptan çıkarılmış ve laboratuvar şartlarında 28 gün süreyle üzeri ıslak çuvalla örtülmek suretiyle kür edilmiştir. 27 günde kürü biten numuneler eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır.

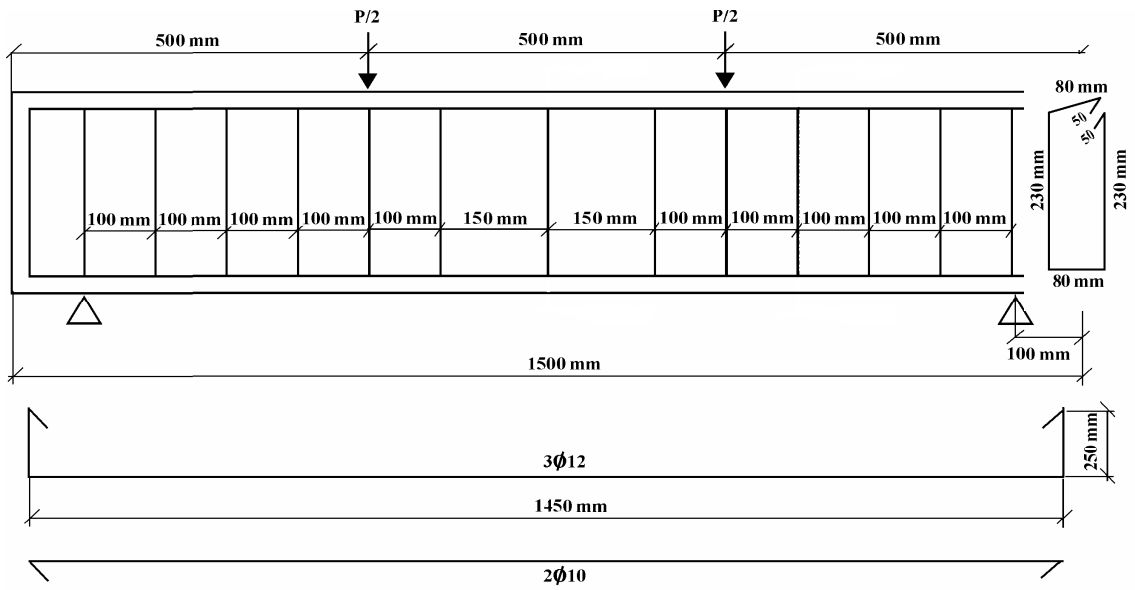
Kirişlerinin üretiminde kullanılan betonların mekanik özelliklerinin yeniden üretilebilirliğini denetlemek için her bir karışımdan standart silindir numuneler ($\phi 15 \times 30 \text{ cm}$) alınarak 28 günlük basınç deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen ortalama basınç dayanım değerleri 22.8-26.5 MPa arasında değişmiştir.

Çalışmada ilgili Türk Standartları'na göre [25,26] üretilmiş $30 \times 30 \times 3 \text{ mm}$ ve $50 \times 50 \times 5 \text{ mm}$ boyutlarında korniyer ve $30 \times 3 \text{ mm}$ boyutlarında lamalar kullanılmıştır. Korniyer ve lamaları yapıştırmak için BASF ticari markasıyla piyasadan temin edilen Concrevis 1406 epoksi reçinesi kullanılmıştır. Üretici firmadan, çift komponentli olan bu reçinenin çeliğe yapışma dayanımının $>6.5 \text{ MPa}$ (7 günlük), betona yapışma dayanımının ise $>3.5 \text{ MPa}$ (7 günlük) olduğu bilgisi alınmıştır. Donatı olarak ise 12 mm (çekme donatısı), 10 mm (montaj donatısı) ve 8 mm (etriye) kullanılmıştır. Donatıların akma dayanımları 44-46 MPa, çekme dayanımları 703-727 MPa, kopma uzamaları %15-16 aralığındadır.

2.2. Numunelerin boyutları ve uygulanan güçlendirme yöntemleri

Deneylerde kullanılan kiriş numunelerinin boyutları $150 \times 300 \times 1500 \text{ mm}$ olarak seçilmiştir. Kirişlerin alt bölgesine $3\phi 12$ çekme donatısı, üst bölgesine $2\phi 10$ montaj donatısı; sarılma bölgesinde 100 mm, orta bölgede ise 150 mm aralıklı olacak şekilde etriyeler yerleştirilmiştir (Şekil 1). Kirişlerdeki paspayı tabakası kalınlığı 25 mm'dir.

Çalışmada, biri referans üçü de farklı yöntemlerle güçlendirilmiş olan, dört farklı kiriş kullanılmıştır: 1. tip kiriş (K1) referans numune olup herhangi bir güçlendirme işlemi uygulanmamıştır. 2. tip kirişde (K2) kirişin alt köşelerine kiriş boyunca (150 cm) $50 \times 50 \times 5 \text{ mm}$ boyutlarında korniyerler yapıştırılmıştır. 3. tip kirişde (K3) kirişin alt köşelerine kiriş boyunca $30 \times 30 \times 3 \text{ mm}$ 'lik korniyerler ve kirişin alt yüzüne, eksenden eksene 20 cm aralıklı olacak şekilde, $30 \times 3 \text{ mm}$ 'lik lamalar yapıştırılarak güçlendirme işlemi uygulanmıştır. Lamaların boyu iki korniyer arasındaki mesafe kadardır. 4. tip kirişde (K4) ise yine kirişin alt köşelerine kiriş boyunca $30 \times 30 \times 3 \text{ mm}$ 'lik korniyerler ve kirişin alt ve yan yüzeylerine $30 \times 3 \text{ mm}$ 'lik lamalar yapıştırılmıştır. Alta yapıştırılanlar K3 ile aynı aralıkta yan yüzeye yapıştırılanlar ise korniyerden itibaren 20 cm boyunda ve eksenden eksene 40 cm aralıktadır (Şekil 2).



Şekil 1. Kirişlerin donatı detayı

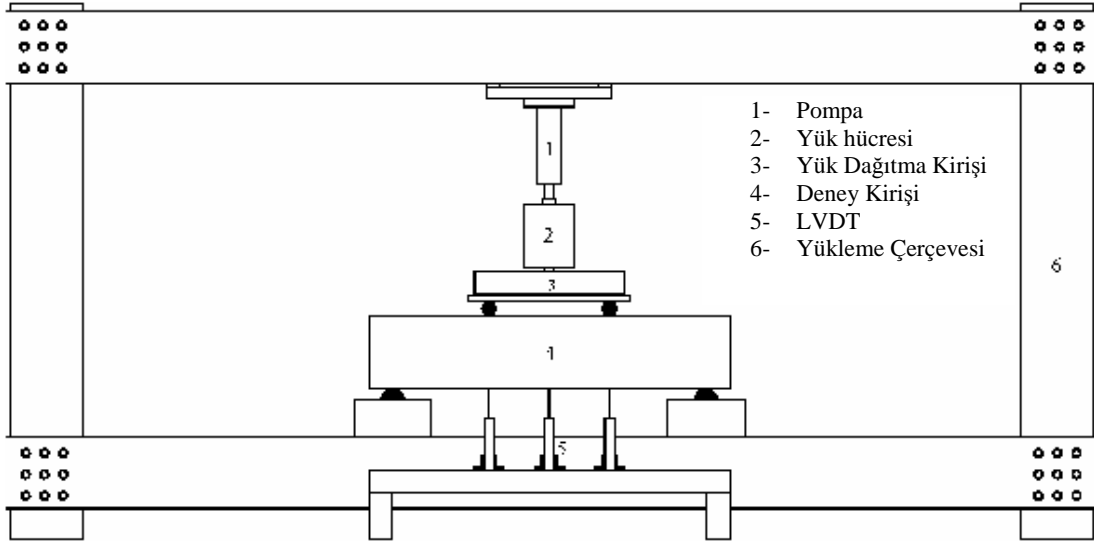
Kiriş Serileri	Kirişin Önden Görünüşü	Kirişin Alttan Görünüşü
K1		
K2		
K3		
K4		

Şekil 2. Kirişlerin güçlendirme detayları ve görünüşleri

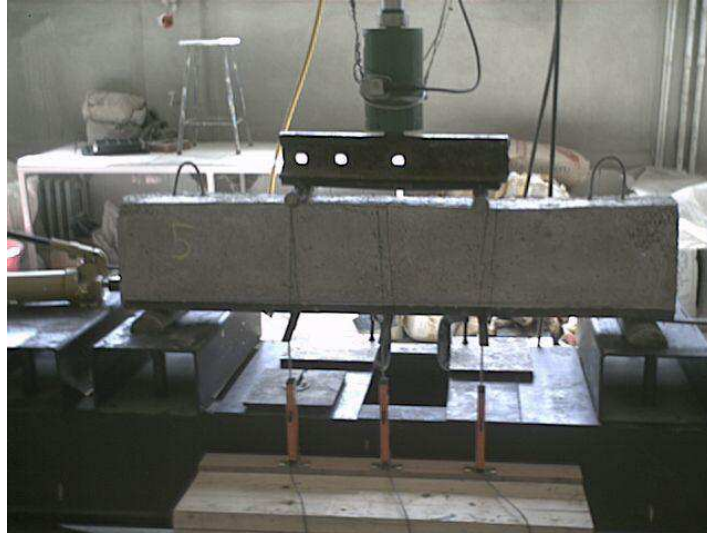
2.3. Deney Düzenegi, Kirişlerin Yüklenmesi ve Ölçme Aygıtları

Kirişlerin yüklenmesinde kullanılan eğilme deney düzeneginin ilke şeması Şekil 3'de, deney anından alınan bir görüntü de Şekil 4'de verilmiştir. 300 kN yüklemeye yapabilen yüklemeye çerçevesine adapte edilen bu düzenek, bir çelik yük dağıtma kirişi aracılığıyla yüklemeye çerçevesine ait verimle donatılmıştır. Eğilme deneyinde yüklemeye, saniyede bir ölçü alınmak suretiyle göçme yüküne kadar hiç boşaltma yapılmadan gerçekleştirilmiştir. Kirişlere uygulanan yük nedeniyle meydana gelen yer değiştirmeleri ölçmek amacıyla LVDT'ler kullanılmıştır. LVDT'lerden

2'si kirişe etkiyen $P/2$ yükleri mesafesinde (Şekil 1), diğeri ise kirişin orta bölgesine yerleştirilmiştir. Ayrıca kirişe gelen yükün şiddetini belirleyebilmek için yükleme pompası ile kiriş arasına yük hücresi yerleştirilmiştir. Her bir deneyde, yükleme süresince kirişte meydana gelen sehimler ve yükün göçme anına kadar olan değerleri bir veri kaydedici ile okunmuştur.



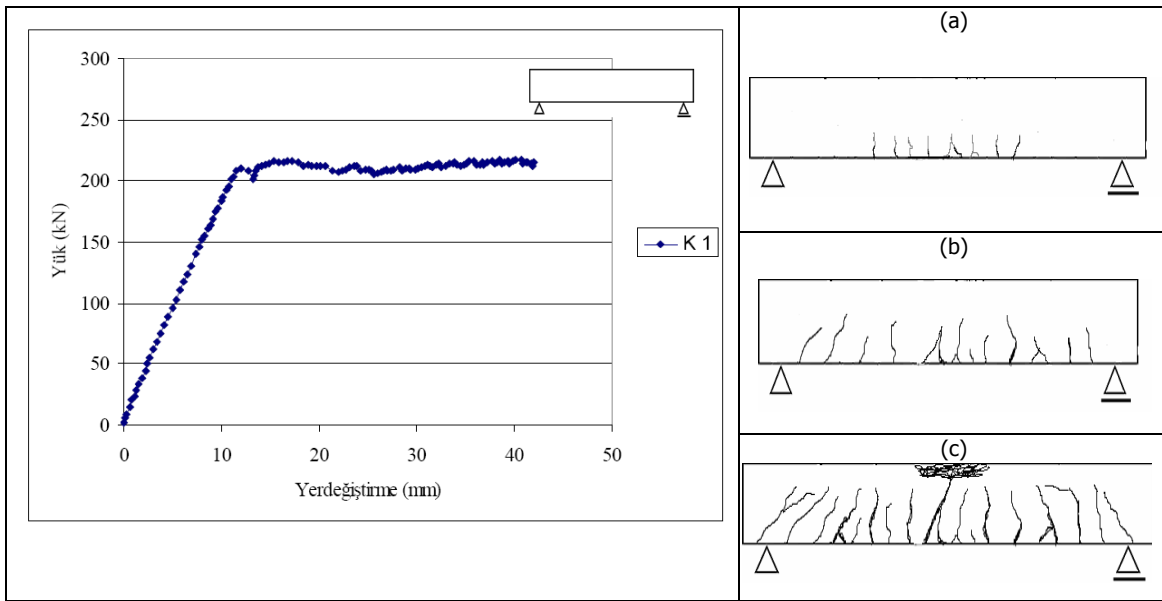
Şekil 3. Kirişlerin yüklenmesinde kullanılan eğilme deney düzeneğinin ilke şeması



Şekil 4. Deney anına ilişkin bir görünüm

3. Bulgular ve Tartışma

Referans kiriş (K1) için, deneyde okunan değerlerden hareketle çizilen, yük-yerdeğiştirme eğrisi ve gözlenen çatlakların kiriş üzerindeki görünümü Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5 . Referans (K1) kirişinin yük-yerdeğiştirme grafiği (solda) ve gözlenen çatlaklar (a: ilk çatlaklar, b: göçme yüküne erişildikten sonra görülen çatlaklar, c: Maksimum yerdeğiştirme meydana geldikten sonra gözlenen çatlaklar)

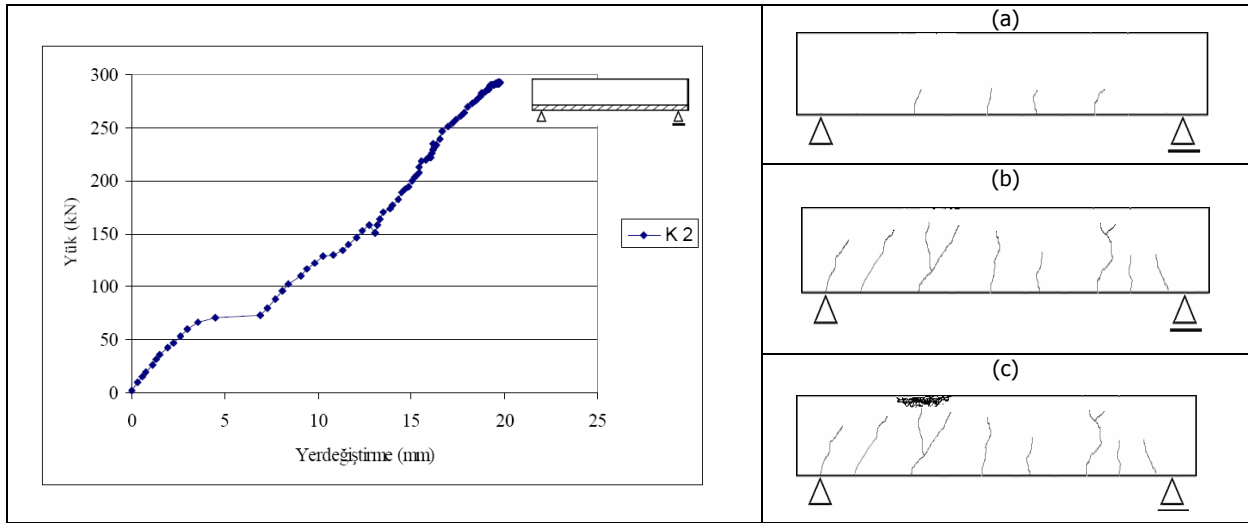
K1 kirişinde, göçme yükünün %17'si olan 35,97 kN değerine erişildiğinde kirişin çekme bölgesinde bulunan en dış lifdeki birim uzamanın betonun çekmedeki birim deformasyon sınırına ulaşması ile, eğilme momentinin maksimum olduğu orta bölgelerde kiriş eksenine dik şekilde 0,3-0,5 mm genişliğinde çatlaklar meydana gelmiştir (Şekil 5.a). Uygulanan yük değeri göçme yüküne ulaştıktan sonra çatlakların boy ve genişlikleri artarak 2-3 mm arasındaki boyutlara ulaşmıştır. Bu çatlaklar kiriş eksenine dik bir açıya sahip olup kirişin hem orta bölgesi hem de kesme açıklığında meydana gelmişlerdir (Şekil 5.b). Göçme yükünden sonra, kirişte gözlenen yer değiştirme devam etmiş ve kiriş 42,06 mm değerinde yer değiştirme yaptığında artık yük taşıyamaz duruma gelmiştir. Kirişte maksimum yer değiştirme meydana geldikten sonra gözlenen çatlaklar 5 mm genişliğine ulaşmış ve kiriş betonunda ezilme gözlenmiştir (Şekil 5.c).

Mesnet ile yük arasındaki kesme açıklığında meydana gelen eğilme çatlakları yön değiştirip eğikleşerek kiriş üst kenarına kadar ilerlemiştir. Yük ve mesnet arasındaki bölgede kayma gerilmeleri de bulunduğundan asal çekme gerilmeleri nedeniyle oluşan bu çatlaklar kiriş eksenine belirli bir eğik açı ile oluşmuşlardır. Yük artmaya devam ederken çatlak genişlik ve boylarındaki hızlı artmalar ise donatıdaki akmanın başladığını göstermiştir.

Şekil 5'den görülebileceği gibi yük, göçme yükü olan 211,6 kN değerine kadar doğrusal olarak artmış göçme yüküne erişildikten sonra ise belli bir değer etrafında sabit kalmıştır. Yükün bu şekilde bir seyir izlemesi kirişin sünek davranış göstermesi ile açıklanabilir.

K2 kirişine ait yük-yerdeğiştirme eğrisi ve gözlenen çatlakların kiriş üzerindeki görünümü Şekil 6'de verilmiştir. 50x50x5 mm boyutunda korniyerlerle güçlendirilen bu kirişte görülen ilk çatlaklar, K1 kirişinde olduğu gibi, eğilme momentinin maksimum olduğu orta bölgelerde ve kiriş eksenine dik şekilde meydana gelmiştir. Ancak, referans kirişten farklı olarak, bu kirişte görülen ilk çatlaklar göçme yükünün %60'ı olan 169,2 kN değerine ulaştığında 0,1 mm genişliğe ulaşmıştır (Şekil 6.a).

Kirişe uygulanan yük değeri göçme yükünün % 80'i olan 225,6 kN değerine ulaştığında ise kirişin kesme açıklığında çatlama momentine erişildiğinden, bu bölgede de 0,1 mm genişliğinde çatlaklar gözlenmiştir (Şekil 6.b). Gözlenen bu çatlaklar kiriş eksenine belirli bir açı yapmaktadırlar. Uygulanan yük değerleri göçme yükünün %80-90'ına ulaştığında bile kirişte görülen çatlaklar 0,1 mm genişliğinde kalmıştır (Şekil 6.c). Güçlendirme amacıyla kullanılan korniyerler eğilme çatlaklarını başarılı bir biçimde kontrol etmiş, çatlakların kılcal düzeyde (0,1 mm) kalmasını ve davranışa sünek eğiliminin hakim olmasını sağlamışlardır.



Şekil 6. K2 tipi kirişin yük-yerdeğiştirme grafiği (solda) ve gözlenen çatlaklar (a: ilk çatlaklar, b: göçme yükünün %80-90'ına erişildiğine görülen çatlaklar, c: maksimum yükleme sonrası gözlenen çatlaklar)

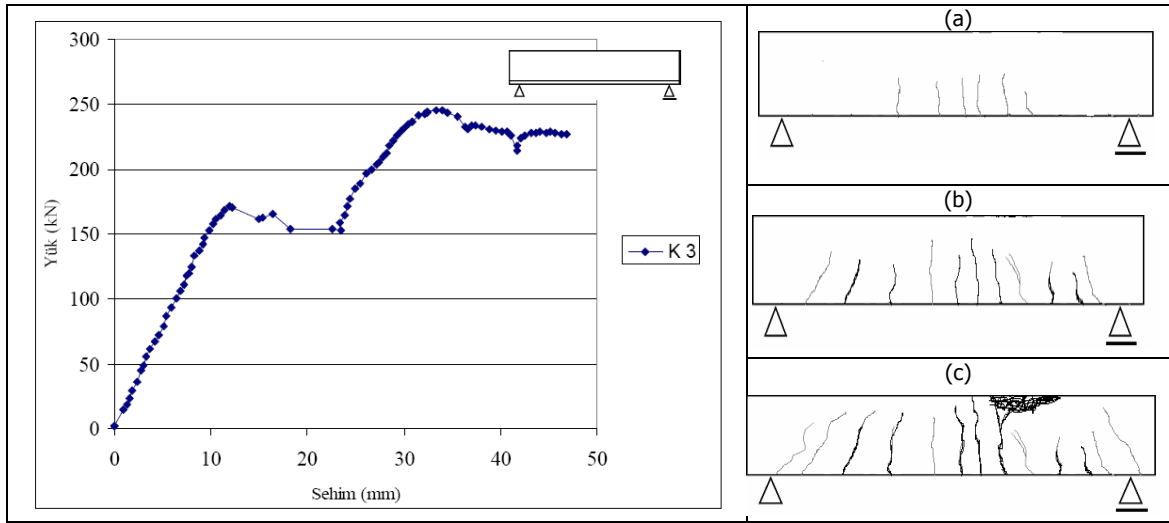
K2 kirişinde referans kirişe oranla göçme yükü %33,27 artmıştır. Şekil 6'daki yük-yerdeğiştirme grafiği incelendiğinde; grafiğin doğrusal olarak yükselirken 60 kN civarında kırılmaya uğradığı, daha sonra tekrar doğrusal şekilde yükselerek 282,0 kN yük değerine ulaştığı görülmektedir. Bu davranışın nedeni, 60 kN yük değerinden sonra betonda ciddi dayanım kaybı oluşması ve bu noktadan sonra ise güçlendirme amacıyla kiriş yüzeyine yapıştırılan korniyerler nedeniyle kirişin 282,0 kN yüküne kadar taşıma gücünün devam etmesiyle açıklanabilir.

Uygulanan yük değeri 282,0 kN değerine eriştiğinde ise kirişin yük uygulanan noktalarında ezilme de gözlenmiştir (Şekil 6.c). Kirişe sistemin maksimum yükü uygulandığı halde kiriş kırılmadığından, yük-yerdeğiştirme grafiği sürekli artış göstermiştir. Ayrıca, K2 kirişine güçlendirme uygulandığından, kirişte meydana gelen maksimum yer değışıirme değeri, referans kirişe oranla %53 azalmış ve 19,76 mm olarak kaydedilmiştir.

K3 kirişinde gözlenen yük-yer değışıirme eğrileri ve çatlaklar Şekil 7'de verilmiştir. Bu kirişde, uygulanan yük değeri göçme yükünün %20'si olan 47,8 kN değerine ulaştığında kirişte gözlenen ilk çatlaklar kirişin orta bölgesinde kiriş eksenine dik ve 0,3 mm genişliğinde görülmüştür (Şekil 7.a). Bu noktadan sonra grafiğin 171,34 kN değerine kadar yükseldiği daha sonra kirişin daha düşük değerlerde yük almaya başladığı fakat yerdeğiştirme değerinin artmaya devam ettiği görülmüştür. Kirişin aldığı yük değeri 151 kN değerine kadar düştükten sonra yeniden artmış ve grafikteki yükseliş göçme yükü olan 239,0 kN değerine kadar devam etmiştir. Bu davranış, belli bir yükte ulaşıldığında betonun taşıma gücünü yitirmeye başlaması buna karşın kiriş alt yüzüne yapıştırılan lamaların ve profillerin, kirişin bir miktar daha yük almasını sağlaması ve kirişin sünekliğini artırmış olması ile açıklanabilir. Uygulanan yük değeri 171,34 kN değerine ulaştığında kirişin kesme bölgesinde 2-3 mm genişliğinde çatlaklar meydana gelmiştir (Şekil 7.b). Bu çatlaklar kiriş eksenine belirli bir açı ile oluşmuşlardır. Bunun nedeni ise kirişin kesme açıklığında kayma gerilmelerinin de etkili olmasıdır.

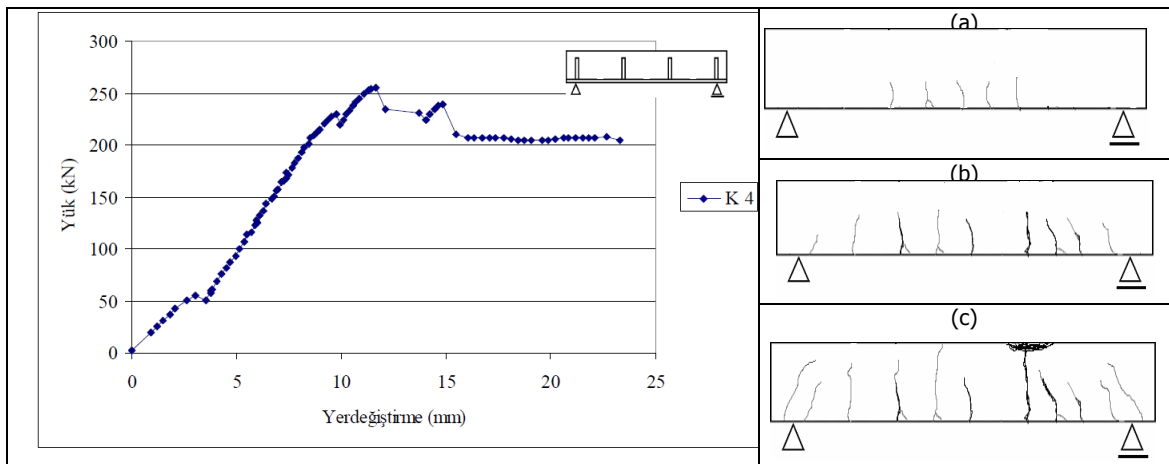
Bu kirişte yükleme süresince meydana gelen çatlaklar, referans kirişte görülen çatlaklara oranla daha az olmasına rağmen, K2 kirişindekilerden sayıca daha fazla ve daha geniştir. Gelişen çatlakların K1 kirişinden az olmasının sebebi, K3 kirişinde güçlendirme uygulanmış olmasıdır. Çatlakların K2 kirişinde görülen çatlaklardan daha fazla olma sebebi ise, K2 kirişinde güçlendirme amacıyla 50x50x5 mm boyutunda korniyer kullanılmasına karşın, K3 kirişinde daha küçük boyutlu olan 30x30x3 mm boyutunda korniyer kullanılmasıdır. Buradan, profil boyutundaki artışın çatlak genişliği ve sayısıyla ters orantılı, kirişin kazandığı dayanımla ise doğru orantılı olduğu sonucu çıkarılabilir.

Göçme yükü olan 239,0 kN değerine erişildikten sonra, kirişin aldığı yük değeri azalmış ve kirişte meydana gelen maksimum yerdeğiştirme değerine erişilene kadar grafikte düşüş gözlenmiştir. Göçme yüküne maruz kalmış kirişte maksimum yer değışıirme değerine erişilene kadar gözlenen çatlaklar ise 4 mm genişliğe sahiptir ve Şekil 7.c'de görüldüğü gibi kiriş eksenine belli bir açı ile meydana gelmişlerdir. Ayrıca göçme yükünden sonra kirişe yük uygulanan noktalarda ezilme de gözlenmiştir. K3 kirişinde göçme yükü referans kirişe oranla %12,94 artmış, yerdeğiştirme değeri ise %19,3 azalmıştır.



Şekil 7. K3 tipi kirişin yük-yerdeğiştirme grafiği (solda) ve gözlenen çatlaklar (a: ilk çatlaklar, b: göçme yükünün %70'ine ulaşıldığında gözlenen çatlaklar, c: göçme yüküne ulaşıldıktan sonra gözlenen çatlaklar)

K4 tipi kiriş için elde edilen yük-yer değıştirme eğrisi ve çatlak görünümleri Şekil 8'de verilmiştir. Bu şekilde, göçme yükünün %20'si olan 50,72 kN değerine kadar yükün doğrusal bir artış gösterdiği ve ilk çatlakların kirişin orta bölgesinde ve kiriş eksenine dik olarak (Şekil 8.a) 0,3 mm genişliğinde meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 8. K4 kirişinin yük-yerdeğiştirme grafiği (solda) ve gözlenen çatlaklar (a: ilk çatlaklar, b: göçme yüküne ulaşıldığında gözlenen çatlaklar, c: göçme yüküne ulaşıldıktan sonra gözlenen çatlaklar)

253,6 kN değeri olan göçme yüküne ulaşıldığında ise kesme açıklığında da çatlama momentine ulaşıldığından bu bölgede de çatlaklar gözlenmiştir. Bu çatlaklar 1-2 mm genişliğinde olup kiriş eksenine belirli bir açı yapmaktadırlar (Şekil 8.b). Bu noktadan sonra ise, kirişin daha düşük yük değerleri aldığı ve grafikte düşüş olduğu görülmüştür. Fakat, bir süre sonra grafiğin yeniden yükselerek, kirişin 248,0 kN değerinde yük aldığı görülmüştür. Bu davranışın nedeni, kirişin alt ve yan yüzeylerine yapıştırılan lama ve korniyerlerin kirişin dayanımını artırarak kirişe süneklik kazandırması ve yeniden yük almasını sağlamasıdır. Bu esnada kirişte gözlenen çatlak genişliği 4 mm'ye ulaşmış ve kirişte yük uygulanan noktalarda ezilmeler gözlenmiştir (Şekil 8.c). Bu noktadan sonra kirişin aldığı yük değeri yeniden azalmış ve 210,0 kN değerine düştüğünde, kiriş çelik lama ve profiller nedeniyle sünek bir davranış göstererek maksimum yerdeğiştirme değeri olan 26,56 mm'e kadar aynı yükü almaya devam etmiştir.

K4 kirişinin yük-yerdeğiştirme grafiğinin göçme yükleri ve maksimum yerdeğiştirme değeri farklı olmasına karşın, referans K1 kirişinin yük-yerdeğiştirme grafiği ile benzerlik gösterdiği görülmüştür. Göçme yükünden sonra, kiriş daha düşük düzeyde yük almasına karşın, kirişte meydana gelen yerdeğiştirme miktarı devamlı artmıştır.

K4 kirişinin yan yüzeylerinde meydana gelen çatlakların, K3 kirişine oranla sayıca daha az olduğu görülmüştür. Bu durum, K4 kirişinde yan yüzeylere yapıştırılan lamaların bu bölgede enine basınç oluşturarak betonun sünekliğini artırması ve çatlak oluşum ve ilerleyişini engellemesi ile açıklanabilir. K4 kirişinde kaydedilen göçme yükü, referans kirişe oranla %19,84 artmış, yerdeğiştirme değerleri ise yine referans kirişe oranla %36,85 azalmıştır.

4. Sonuçlar

Çalışmada uygulanan güçlendirme yöntemleri, elde edilen sonuçlar ve sonuçların referans kirişe göre değişimi Çizelge 2’de topluca verilmiştir.

Çizelge 2. Güçlendirme yöntemine göre elde edilen sonuçlar

KODU	Güçlendirme tekniği	Kırılma yükü (kN)	Kırılma yükünün K1’e göre artışı (%)	Maksimum sehim (mm)	Max. sehimin K1’e göre azalma oranı (%)
K 1	Referans Kiriş	211,6	-	42,06	-
K 2	Kirişin alt köşelerine 50x50x5 mm’lik korniyerler yapıştırılmıştır.	282,0	33,3	19,8	53,0
K 3	Kiriş alt köşelerine 30x30x3 mm’lik korniyer, alt yüzüne 30x3 mm’lik lamalar yapıştırılmıştır.	239,0	12,9	33,9	19,3
K 4	Kiriş köşelerine 30x30x3 mm’lik korniyer, kirişin alt ve yan yüzeylerine de 30x3 mm’lik lamalar yapıştırılmıştır.	253,6	19,8	26,6	36,85

Çizelge 2’den de görülebileceği gibi, uygulanan güçlendirme teknikleri içinde, göçme yükünün referans kirişe oranla en fazla arttığı ve yerdeğiştirme değerlerinin azaldığı uygulama kiriş alt yüzlerine 50x50x5 mm boyutunda boydan boya korniyer yapıştırılması (K2 kirişi) durumudur. Diğer güçlendirme yöntemlerine kıyasla bu yöntemden daha iyi sonuçlar elde edilmesinin korniyer boyutları ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Profil boyutundaki artışın çatlak genişliği ve sayısı ters orantılı, buna karşın, kirişin yük taşıma kapasitesindeki artışla doğru orantılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Daha küçük boyutlu korniyer ve lama yapıştırılması suretiyle yapılacak olan güçlendirmenin ise hafif hasarlı kirişlerde -hasar onarımı ile birlikte- gerçekleştirildiğinde pratik ve faydalı bir uygulama olacağı sonucuna varılmıştır. Onarım ile birlikte bu güçlendirme yönteminin uygulanması, farklı korniyer ve lama en kesiti denenerek kolay uygulanabilir bir yöntem olarak yaygınlaştırılabilmesi için bu türden çalışmaların çoğaltılması gereği açıkça görülmektedir. Bu çalışmalarda, mümkünse, gerçek sınır şartları ve gerçek boyutlarda çalışılmasının elemanların gerçek davranışlarını temsil etmesi bakımından önemli olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır.

Kaynaklar

- [1] Demir, H., “Depremden hasar görmüş betonarme yapıların onarım ve güçlendirilmesi”. *İTÜ Yayınları*, 151 s, İstanbul, (1999).
- [2] Sharif, A., Al-Suleimani, G.J., Basunbul, I.A., Baluch, M.H. ve Ghaleb, B.N., “Strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates”. *ACI Struct. J.*, 91 (2), 160-168, (1994).
- [3] Takeda, K., Mitsui Y., Murakami K., Sakai, H. ve Nakamura, M., “Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with carbon fibre sheets”. *Composites Part A*; 27A, 981–987, (1996).
- [4] Mohamed Ali, M.S., Oehlers, D.J and Park, S.M. “Comparison between FRP and steel plating of reinforced concrete beams”, *Composites: Part A*, 32(9), 1319-1328, (2001).
- [5] Li, A., Diagona, C. ve Delmas, Y., “CFRP contribution to shear capacity of strengthened RC beams”. *Eng. Struct.*, 23 (2001), 1212-1220, (2001).
- [6] Wang, Y.C. and Chen, C.H., “Analytical study on reinforced concrete beams strengthened for flexure and shear with composite plates”. *Compos. Struct.*, 59, 137-148, (2002).
- [7] Zhishen Wu, Jun Yin., “Fracturing behaviors of FRP-strengthened concrete structures”, *Eng. Fract. Mech.*, Volume 70, Issue 10, Pages 1339-1355, (2003).
- [8] Abdalla, H.A., “Evaluation of deflection in concrete members reinforced with fibre reinforced polymer (FRP) bars”. *Compos. Struct.*, Volume 56, Issue 1, 63-71, (2002).

- [9] Abdalla, H.A., Torkey, A.M., Haggag H.A. ve Abu-Amira, A.F., “Design against cracking at openings in reinforced concrete beams strengthened with composite sheets”. *Compos. Struct.*, 60 (2003) 197-204, (2003).
- [10] Rasheed, H.A., Nayal, R. ve Melhem, H., “Response prediction of concrete beams reinforced with FRP bars”. *Compos. Struct.*, 65 (2004), 193-204, (2003).
- [11] J. Yin, Z. S. Wu., “Structural performances of short steel-fiber reinforced concrete beams with externally bonded FRP sheets”. *Constr. Build. Mater.*, 17, 463-47, (2003).
- [12] Avril, S., Ferrier, E., Vautrin, A., Hamelin P. ve Surrel, Y., “A full-field optical method for the experimental analysis of reinforced concrete beams repaired with composites”. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Volume 35, Issues 7-8, 873-884 , (2004).
- [13] Kumbasar, N., Eren, İ., Aydoğan, M. ve İlki, Alper., “Yapıların onarım ve güçlendirilmesi alanında gelişmeler”. *Prof. Dr. Kemal Özden’i Anma Semineri*, İstanbul, (2002).
- [14] Barnes, R.A., Baglin, P.S., Mays, G.C. ve Subedi, N.K., “External steel systems for the shear strengthening of reinforced concrete beams”. *Eng. Struct.*, 23, 1162-1176, (2001).
- [15] Van Gemert, D. and Maesschalck, R., “Structural repair of a reinforced concrete plate by epoxy bonded external reinforcement”, *Int. J. Cem. Compos. Lightweight Concrete*, Vol. 5, No. 4, pp. 247-255, (2003).
- [16] Oh, B.H., Coe, J.Y., Park, D.G., “Static and fatigue behavior of reinforced concrete beams strengthened with steel plates for flexure”, *J. Struct. Eng.*, Vol. 129 (4), pp. 527-535. (2003).
- [17] Sharif, A., Al-Sulaimani, G.J., Basunbul, I.A., Baluch, M.H., Husain, M., “Strengthening of shear damaged RC beams by external bonding of steel plates”, *Mag. Concr. Res.*, Vol. 47, Issue.173, 329-334, (1995).
- [18] Li, A., Assih, T., Delmas, Y., “Influence of the adhesive thickness on the behaviour of strengthened concrete beams”, *J. Adhes. Sci. Technol.*, 14(13), 1639-1656, (2000).
- [19] Tankut, T. ve Arslan, M., “Epoksili Çelik Plaka İle Güçlendirilmiş Betonarme Kiriş Davranışı” *Teknik Dergi, İMO*, Cilt 3, Sayı 4, s575, (1992).
- [20] Swamy, R.N., Jones, R., Bloxham, J.W., “Structural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel plates”, *J. Struct. Eng.. Part A*. Vol. 65A (2), 59-68, (1987).
- [21] Adhikarya, B.B., Mutsuyoshi, H., Sano, M., “Shear strengthening of reinforced concrete beams using steel plates bonded on beam web: experiments and analysis, *Constr. Build. Mater.*, 14 (5), 237-244, (2000).
- [22] Oehlers, D.J., “Strengthening reinforced concrete beams by bonding steel plates to their soffits”, *2nd National Structural Engineering Conference 1990. Barton, ACT: Institution of Engineers, Australia*, 90 (10), 346-350, (1990).
- [23] Altın, S., Tankut, T., Anıl, Ö., Demirel, Y., “Response of reinforced concrete beams with clamps applied externally: an experimental study”, *Eng. Struct.*, 25(9), 1217-1229, (2003).
- [24] Altın, S., Anıl, Ö., Gökten, Y., “An application of external clamps for shear strengthening of reinforced concrete beams”, *Gazi Üniv. Mühendislik Mimarlık Fak. Dergisi* 19 (4), 415-422, (2004).
- [25] TS EN 10025-1. “Sıcak haddelenmiş yapı çelikleri – Bölüm 1: Genel teknik teslim şartları”. *TSE*, Ankara, 2006.
- [26] TS EN 10058. “Genel kullanım amaçları için sıcak haddelenmiş yassı çelik çubuklar - Boyutlar, şekil ve boyut toleransları”. *TSE*, Ankara, 2005.