

# BETONARME KİRİŞLERİN LİFLİ POLİMER (FRP) MALZEMELER KULLANILARAK ONARIM VE GÜÇLENDİRİLMESİ

**Nihat ÇETİNKAYA, Hasan KAPLAN, Ş. Murat ŞENEL**

Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kınıklı/Denizli

Geliş Tarihi : 10.09.2003

## ÖZET

Betonarme yapıların onarım ve güçlendirilmesinde (O/G) Lifli Polimer (FRP) malzemenin kullanımı son zamanlarda yaygınlaşmaya başlanmıştır. FRP malzemelerin, yüksek çekme mukavemeti, korozyona karşı dayanıklılığı ve bu malzeme ile yapılan O/G'nin, yapının işleyişini çok fazla etkilememesi gibi nedenlerle tercih edilen bir malzeme olmaktadır. Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı laboratuvarlarında yapılan bu çalışmada dört adet betonarme kirişin FRP malzemelerle onarım ve/veya güçlendirilmesi yapılmıştır. Her deney kirişi için yük deplasman eğrisi elde edilerek elemanların statik yük altında O/G'den önceki ve sonraki davranışı karşılaştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda FRP malzemelerle yapılan O/G'nin betonarme kirişlerin taşıma gücünü çok büyük ölçüde artırdığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler :** Lifli polimer (FRP), Onarım, Güçlendirme, Betonarme kirişler

## REPAIR AND STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE BEAMS USING FIBRE REINFORCED POLIMER (FRP) MATERIALS

### ABSTRACT

The use of Fibre Reinforced Polimer (FRP ) materials for the repair and strengthening of Reinforced Concrete structures has become widespread recently. FRP materials are being preferred because they have very high tensile strength, resistance to corrosion and they do not affect the use of the building during the repair and strengthening process. Four reinforced concrete beams repaired and strengthened with FRP materials have been used in this study which were performed at Pamukkale University-Faculty of Engineering- Civil Engineering Department-Structural Engineering Laboratory. The behaviour of the beams before and after repair and strengthening was compared by obtaining the load- displacement curves under static loading. In this study, it was observed that the repair and strengthening of reinforced concrete beams by using FRP materials had increased the load carrying capacity significantly.

**Key Words :** FRP, Repair, Strengthening, Reinforced concrete beams

### 1. GİRİŞ

Betonarme yapı elemanlarının, tasarım ve uygulama hataları, zamana bağlı zayıflamalar, kullanım amacının değiştirilmesi ve yeni yönetmeliklere göre

yetersiz kalması gibi nedenlerle onarım ve/veya güçlendirilmesi gerekebilmektedir (Bayülke, 1998).

Son depremlerden sonra yapılan araştırmalarda Türkiye'deki betonarme yapıların önemli bir kısmının onarım ve güçlendirilmesinin gerektiği

görülmektedir. Yapısal olarak yetersiz olan bina sayısının fazlalığı, yapım yöntemlerinin farklılığı, halen kullanımda olmaları ve ülkenin ekonomik durumu da göz önüne alınarak, her yapı için uygun olabilecek farklı O/G yöntemlerinin belirlenmesine yönelik araştırmalar devam etmektedir.

Pamukkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim dalında yapılan bu çalışma ile betonarme kirişlerin FRP malzemelerle hem onarımı, hem de güçlendirmesi yapılmıştır. FRP malzemenin özellikleri göz önünde bulundurularak Türkiye’de mevcut olan ve kullanılan FRP malzemelerden biri olan Karbon Lifli Polimer (CFRP) ile deney numuneleri hazırlanmıştır.

## 2. ONARIM VE GÜÇLENDİRME YÖNTEMİNİN SEÇİLMESİ

Betonarme yapıların onarım ve güçlendirilmesi yönteminin seçiminde göz önünde tutulması gereken en önemli faktörlerden birisi de uygulanacak yöntemin yapının işleyişine olan etkisidir (Gülkan, 1998). Deprem gibi doğal afetlerden sonra, hastane gibi bazı yapıların çok hızlı bir şekilde O/G’si gerekmekte, bu işlemler sırasında hastanelerin faaliyetlerine devam edebilmesi beklenmektedir. Aynı durum işleyişi durdurmanın maliyetinin çok yüksek olduğu fabrika binaları için de geçerlidir.

Epoksi ile yapıştırılan FRP malzemelerle yapılan O/G yöntemleri ise kalıp, demir donatı, beton dökümü ve kalıp sökülme süresi gibi zaman alan imalatlar olmadığı için göreceli olarak daha hızlı yöntemlerdir.

Kış aylarında yapılan tuzlama etkisi ile köprü taşıyıcı elemanlarının donatılarında korozyon olmakta ve sistemin taşıma gücü azalmaktadır (Myers et al., 2001). Rıhtımlar, su yapıları, rutubetli bodrum katlar gibi yapılarda demir donatı korozyona uğramakta ve betonarme elemanların taşıma gücü azalmaktadır. Bu gibi yapıların O/G’inde epoksi ile yapıştırılan FRP malzemeler en uygun malzeme olarak görülmektedir.

## 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 3. 1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada, deney kirişlerinin hazırlanmasında hazır beton kullanılmıştır. Kullanılan betonun basınç dayanımı ve gerilme-şekil değiştirme özellikleri,

hazırlanan silindir numunelerin Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Müh. Böl. Yapı A.B.D. Laboratuvarlarında test edilmesiyle elde edilmiştir. Ortalama beton basınç dayanımı 31.7 Mpa’dır.

Deney kirişleri  $b = 15$  cm,  $h = 25$  cm ve  $L = 270$  cm boyutlarındadır ve numunelerin üretilmesinde nervürlü BÇ III donatılar kullanılmıştır. Kullanılan çelik çubukların mekanik özellikleri Denizli KOSGEB Laboratuvarlarında yapılan deneylerle tespit edilmiştir.

Onarım ve Güçlendirmede kullanılan FRP malzemeler ve epoksi yapıştırıcılar SİKA Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından temin edilmiştir.

Kullanılan CFRP plaka: Sika Carbodur S. 50 x 1.2 mm kesitinde ve 2500 mm uzunluğundadır. Sargı için kullanılan FRP dokuma malzemesi SİKA Wrap 230C, 0.13 mm kalınlığında ve 30 cm eninde rulo halindedir. Kullanılan FRP malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 1, 2, 3, 4’de verilmiştir.

Tablo 1. FRP Dokuma Malzemesi

FRP Malzeme	SikaWrap Hex-230C
Ağırlık	230 gr/ m <sup>2</sup>
Lif çekme dayanımı	3500 N/ mm <sup>2</sup>
Lif çekme modülü	230 000 N/ mm <sup>2</sup>

Tablo 2. FRP Dokumayı Yapıştırma Malzemesi

Epoksi Yapıştırıcı Malzeme	Sikadur-330
Eğilme Modülü	3 800 N / mm <sup>2</sup>
Betona yapışma dayanımı	> 4 N/ mm <sup>2</sup> (Beton kırılması)
Viskosite	Boyacı rolesi ile sürülebilecek kıvam

Tablo 3. FRP Plaka Malzemesi

FRP Malzeme	Sika Carbodur S
Çekme dayanımı	2800 N/ mm <sup>2</sup>
E- modülü	165 000 N/ mm <sup>2</sup>

Tablo 4. FRP Plaka Yapıştırma Malzemesi

Epoksi Yapıştırıcı Malzeme	Sikadur-30
E- modülü	12 800 N/ mm <sup>2</sup>
Betona yapışma dayanımı	> 4 N/ mm <sup>2</sup> (Beton kırılması)
Viskosite	Mala ile uygulanabilecek kıvam (hamur gibi)

### 3. 2. Deneylerin Yapılışı

Deneyisel çalışma üç bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde deney kirişlerinden iki tanesi herhangi bir onarım veya güçlendirilme yapılmadan

statik yüklemeye tabi tutulmuş ve yalın kirişlerin yük-deplasman ilişkileri elde edilmiştir.

İkinci bölümde önceden yüklemeye tabi tutularak taşıma gücüne ulaşan ve hasar gören deney kirişlerinin onarımı yapılmış ve iki değişik güçlendirme yöntemi uygulanmıştır.

Üçüncü bölümde ise hasar görmeden, doğrudan güçlendirilen deney kirişleri statik yüklemeye tabi tutulmuş ve taşıma gücünün sonuna kadar yük-deplasman eğrileri elde edilmiştir.

Uygulanan onarım yönteminin başarısı deneysel olarak araştırılmıştır.

### 3. 2. 1. Yalın Kiriş Deneyleri

Kirişlerin yüklemeye çerçevesine yerleştirilmeden önce, daha sonra FRP şerit yapıştırılacak olan yüzeylerindeki gevşek çimento tabakası, elektrikli matkaba takılan çelik fırça ile iyice temizlenmiştir.

Hazırlanan deney kirişleri 280 kN yüklemeye kapasiteli DARTEC hidrolik güç ünitesine bağlı bulunan test çerçevesine yerleştirilmiştir. Deney kirişleri orta bölgede bir yüklemeye açıklığı bırakacak şekilde iki eşit noktasal yük ile yüklenmiştir. Yüklemeye işlemi deplasman kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir ve yüklemeye sonucunda numunelerin taşıma gücüne ulaşması ve plastik deformasyonların oluşması sağlanmıştır.

Daha önceki araştırmalar gerilme yığılmalarından dolayı FRP malzemenin köşe dönüşlerinde koptuğunu göstermiştir (Yang et al., 2001). Yapılan çalışmada bu durumun önlenmesi için dikdörtgen kesitli elemanların köşe dönüşleri  $r=2$  cm yarı çapında ovalleştirilmiştir.

Yalın kirişlerin deneyinden tamamen teorik hesaplara uygun bir davranış elde edilmiştir. Oluşan çatlaklar tipik nervürlü donatılı kirişte beklenen davranışı yansıtmaktadır (Şekil 1); (Ersoy, 1985).



Şekil 1. Yalın kiriş eğilme-çekme çatlakları

### 3. 2. 1. Hasar Görmüş Deney Kirişlerinin Epoksi Reçine Enjeksiyonu ile Onarımı

Yalın kirişlerin yüklemeye deneyleri tamamlandıktan sonra, onarım için deformasyonu geri almak üzere ters olarak yeniden yüklenmiştir .

Deformasyonları geri alınmış olan deney kirişi, test çerçevesinden dışarı alınmış ve çatlaklarına özel epoksi reçine enjekte edilmesi için elektrikli matkap ile delikler açılmıştır. Açılan delikler hava kompresörü ile iyice temizlendikten sonra deliklere enjeksiyon memeleri yerleştirilmiş, çatlakların diğer tarafları epoksi reçine ile kapatılmıştır. 24 saat sonra, özel enjeksiyon makinesi ile memelerden çatlaklara epoksi reçine sıkılmıştır.

### 3. 2. 2. Deney Kirişlerinin CFRP Malzemelerle Onarım ve Güçlendirilmesi

Günümüzde O/G uygulamalarında kullanılan FRP malzemeler iki türde bulunmaktadır; plakalar ve dokumalar.

Plakalar; karbon, cam vb. gibi liflerin, fabrika ortamında, epoksi reçine matrisi ile doyularak sahada kullanılmaya hazır hale getirilmiş FRP malzemelerdir. Plakalar sahadaki işçiliği kolaylaştırır ve işçilik hatalarını en aza indirir. Değişik kalınlıkta ve genişlikte olabilirler. Bu deneylerde kullanılan plakalar 1.2 mm kalınlıkta, 50 mm genişlikte ve 20 cm uzunluğundadır .

Dokumalar; tek yönlü, çift yönlü (90° veya 45°) liflerin dokuma şeklinde bir araya getirilmesi ile hazırlanır. Daha çok sargılamada kullanılır, ama eleman eksenine paralel olarak yapıştırılarak, boyuna donatı olarak da kullanılabilir. Çok ince ve esnek olduğu için taşınması kolaydır. Deneylerde kullanılan FRP dokuma, SikaWrap 0.13 mm kalınlığında ve 30 cm enindedir.

Yapılan deneylerde, uygulamada olabilecek hataların sonuçlarını görmek ve alınabilecek önlemleri araştırmak amacıyla, FRP malzeme ile betonu sargılamanın etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla silindirik beton numuneler yalın olarak test edilerek beton basınç dayanımları ve gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Daha sonra, aynı betondan alınmış ikinci grup silindirik numuneler CFRP dokuma (SikaWrap) ile sarılmış ve test edilmiştir (Şekil 2). Bu deneylerin sonuçları; FRP dokuma ile sargılamanın B.A elemanın basınç dayanımını ve sünekliğini arttırdığını göstermiştir.

Bu sonuçtan hareketle, kirişlerin orta bölgelerindeki beton basınç dayanımını ve sünekliğini artırmak için, eleman, eksenine dik olarak, orta bölgesinde de

sargılanmıştır. B.A elemanın eğilme bölgesine yapıştırılan FRP malzemenin oluşan çatlakların açılmasını önleyebilmesi için eğilme yüzeyinin % 80'ini kaplaması gerekmektedir (Özkul ve Yıldırım, 1998). Bunun sağlanması durumunda kirişte kesme kırılması olasılığı artacağından, deney kirişlerinin iki tanesinde kesme bölgesi de FRP dokuma ile kiriş eksenine dik olarak sarılmıştır.



Şekil 2. CFRP ile sarılmış silindir numune testi

### 3. 2. 4. Sadece Eğilme Yüzüne CFRP Plaka Yapıştırılması ile Yapılan Güçlendirme

Deney kirişlerinden birisi herhangi bir hasara uğramadan, sadece alt yüzeyine iki adet 50 x 1.2 mm, L = 250 cm CFRP plakalar, Carbodur, epoksi reçine ile yapıştırılarak yüklemeye tabi tutulmuştur. Bu kirişlerin donatısı, beton kalitesi ve boyutları diğer kirişler ile aynıdır.

Yükleme 5 mm'lik düşey deplasman artırımları ile tekrarlı yüklemeye tabi tutulmuştur.

Deney sonuna kadar, kirişin noktasal yükler arasında kalan ve sadece eğilme etkisindeki kısmında herhangi bir çatlak oluşmamıştır. Eleman yüksek yük değerlerine çıkarken, kesme bölgesinde oluşan çatlakların açılması ile taşıma gücünü yitirmiştir. Deney sonuçları Şekil 3 ve 4'te görülmektedir.



Şekil 3. FRP plaka ile güçlendirme, kiriş son durumu

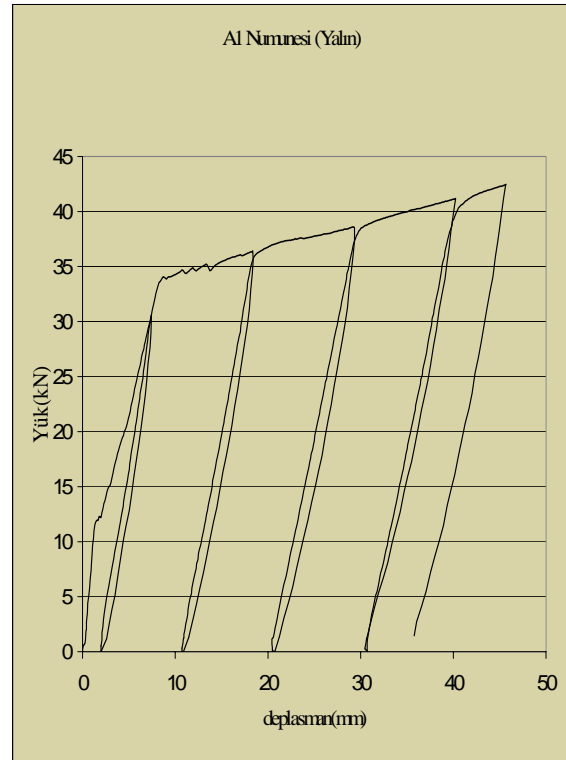


Şekil 4. FRP plaka ile güçlendirme, kiriş-kesme çatlakları ve pas payının kopması

## 4. DENEY SONUÇLARI

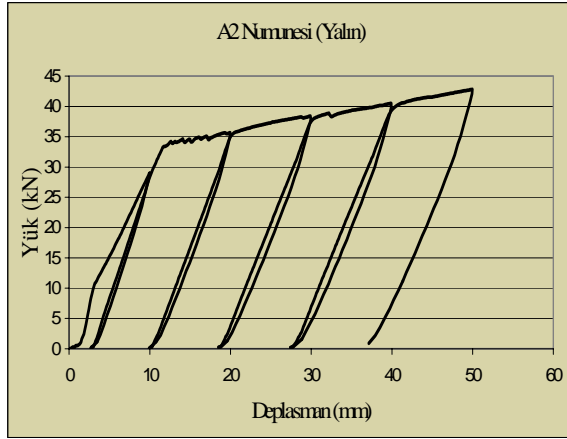
### 4. 1. Yalın Kirişler

Yapılan deneylerde önce yalın kirişler eğilme testine tabi tutulmuş ve yük-deplasman değerleri elde edilmiştir (Şekil 5 ve 6). Yalın kiriş deneyleri sırasında oluşan çatlaklar tamamen beklenen şekildedir. Nervürlü demir donatılı kirişlerdeki tipik eğilme çatlakların şekli görülmüştür. Sünek bir davranış elde edilmiştir.



Şekil 5. Yalın kiriş testi (A1)

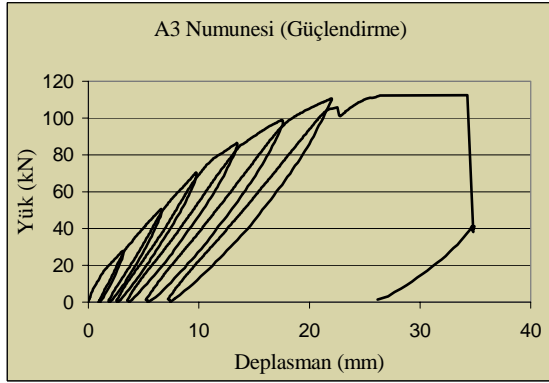
2. Yalın kiriş testinin yük-deplasman grafiği aşağıdadır (Şekil 6).



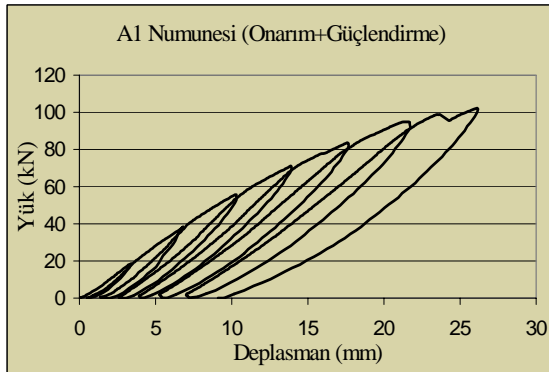
Şekil 6. Yalın kiriş testi (A2)

#### 4. 2. Kiriş Alt Yüzüne CFRP Şeritlerle Yapılan Onarım ve Güçlendirme

Deney kirişlerinin alt yüzüne, mesnetten mesnete, CFRP şerit, (1.2 x 50 mm.) yapıştırılarak yapılan onarım ve güçlendirme deneyinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Doğrudan güçlendirilen kirişin sünekliği onarılan güçlendirilen kirişin sünekliğinden % 28 fazla ve yük taşıma kapasitesi de onarılan güçlendirilen kirişin kapasitesinden % 10 fazla olduğu görülmüştür (Şekil 7 ve 8).

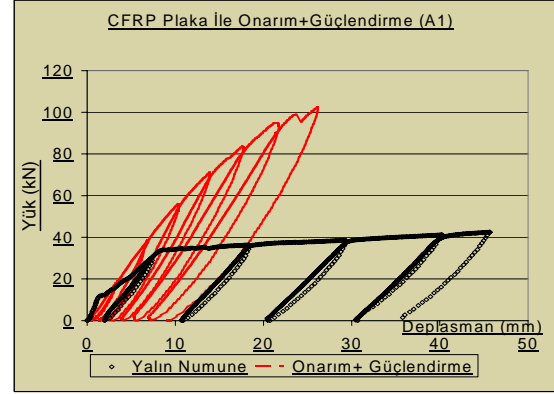


Şekil 7. FRP plakalarla güçlendirilmiş kiriş testi

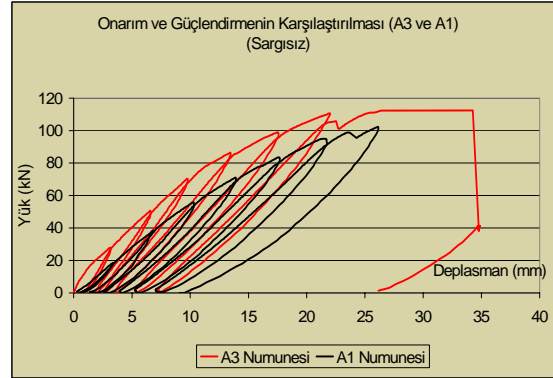


Şekil 8. FRP plakalarla O/G yapılmış kiriş testi

Yapılmış olan güçlendirme yöntemi ile kiriş taşıma gücünün 2.5 kat arttığı görülmüştür (Şekil 9). Yalın kirişlerden farklı olarak, kesme çatlakları oluşmuş ve kiriş sünekliği azalmıştır (Şekil 9 ve 10).



Şekil 9. Yalın kiriş ve FRP plaka ile O/G yapılmış kiriş test sonuçlarının karşılaştırılması



Şekil 10. FRP plaka ile yapılan onarım ile güçlendirme test karşılaştırılması

#### 4. 3. Kiriş Alt Yüzüne CFRP Şeritler ve Yan Yüzlerine CFRP Wrap, Sargı Yapıştırılarak Yapılan O/G

Bu grup deney kirişlerinde, alt yüzlere CFRP şeritler yapıştırmaya ek olarak kiriş yüzeyi de CFRP Wrap dokuma ile lifler kiriş eksenine dik olacak şekilde sarılmış, yapılan bu uygulama ile daha sünek bir davranış elde edilmiştir.

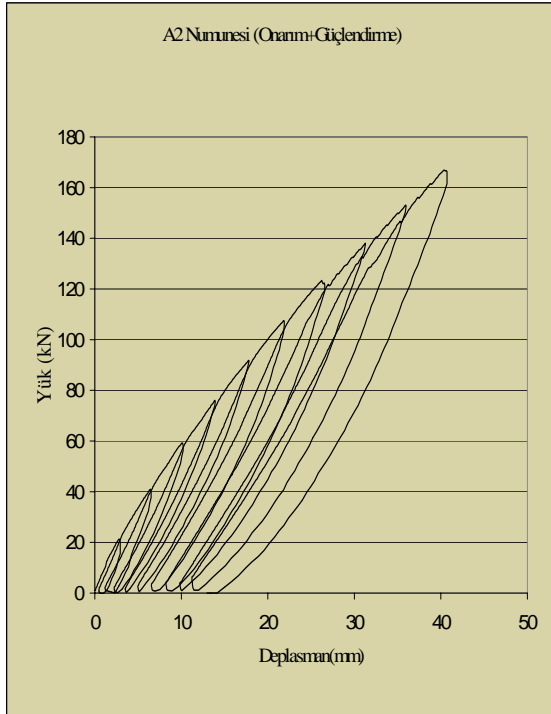
Bu grup numunelerin taşıma gücü, yalın kirişlerin yaklaşık 4 katına çıkmıştır (Şekil 11 ve 13). CFRP Wrap sargı malzemesi ile yapılan sargılama elemanın sünekliğini arttırmıştır (Şekil 14). Kesme çatlakları oluşmamış, sadece eğilme çatlakları oluşmuştur.

#### 4. 4. Kiriş Alt Yüzüne FRP Şeritler ve Kesit Çevresine FRP Dokuma Sargı ile Güçlendirme

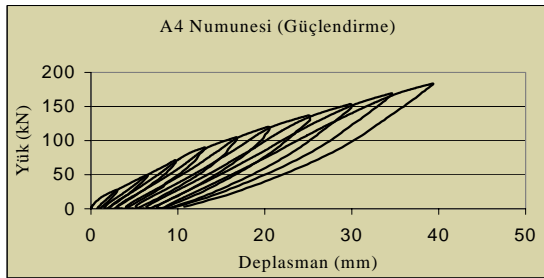
Bu kirişlerde de taşıma gücü yalın kirişlerin yaklaşık 4 katına çıkmıştır (183 kN), (Şekil 12 ve 13). Yalnızca kiriş alt bölgesine FRP şerit yapıştırma ile güçlendirmeye göre kirişin yük taşıma kapasitesi ve süneklığı çok büyük ölçüde artmıştır (Şekil 16).

Hasar gördükten sonra onarılıp güçlendirilen kiriş testi ile hasar görmeden güçlendirilen kiriş test sonuçları yaklaşık olarak aynıdır (Şekil 10 ve 15).

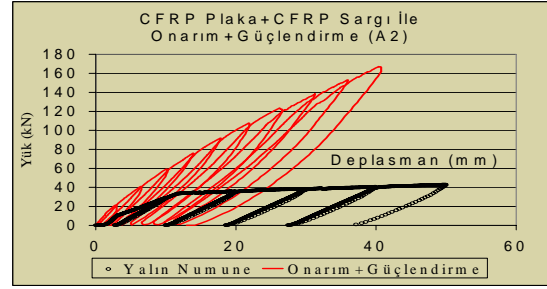
Bütün deney sonuçlarına ait yük deplasman değerleri Tablo 5’de görülmektedir.



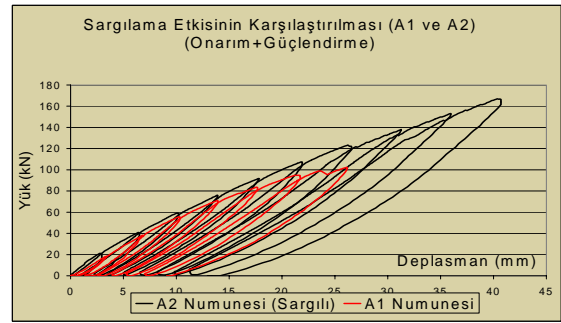
Şekil 11. FRP plaka ve FRP dokuma ile O/G yapılmış kiriş test sonuçları



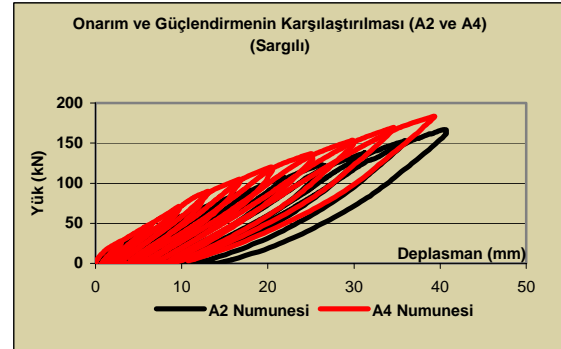
Şekil 12. FRP plaka ve FRP dokuma ile güçlendirilmiş kiriş test sonuçları



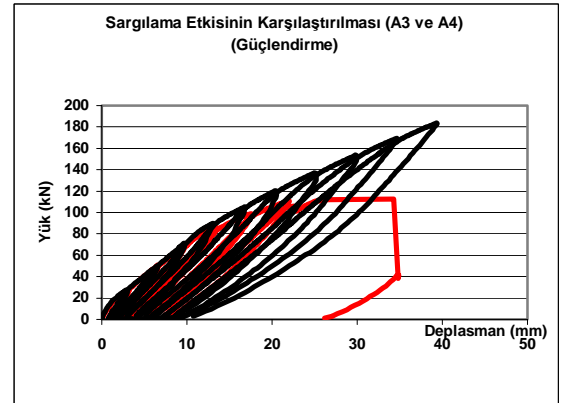
Şekil 13. Yalın kiriş ve FRP plaka ve FRP dokuma ile O/G yapılmış kiriş test sonuçları



Şekil 14. Sargılamanın etkisi (O/G)



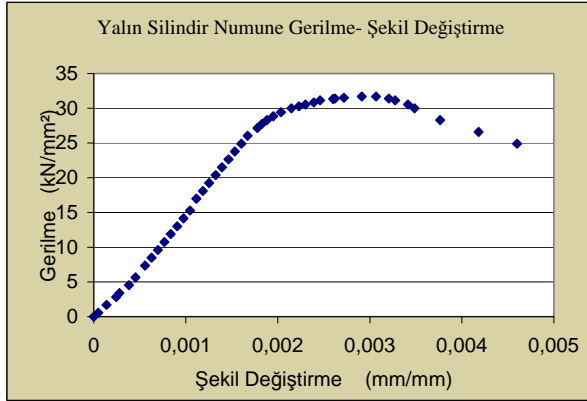
Şekil 15. Onarım ile güçlendirmenin karşılaştırması (FRP plaka + FRP sargı)



Şekil 16. Sargılama etkisi (Güçlendirme)

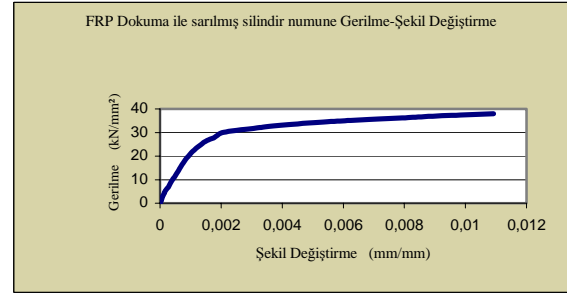
#### 4. 5. Silindir Beton Numunelerin FRP Dokuma ile Sargılanması Deneyleri

Yalın silindir beton numune basınç deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme sonuçları Şekil 17'de görülmektedir. Beton basınç dayanımı 31.7 Mpa ve buna karşılık gelen Şekil Değiştirme ise 0.003 mm/mm elde edilmiştir.



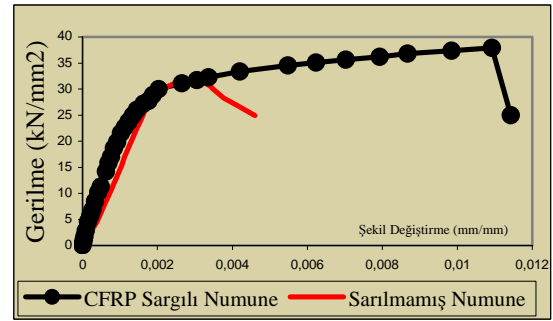
Şekil 17. Yalın silindir numune gerilme-şekil değiştirme ilişkisi

FRP dokuma ile sarılmış silindir beton numunelerinin basınç deneyinden elde edilen Gerilme-Şekil Değiştirme değerleri Şekil 18'de görülmektedir. Beton basınç dayanımı 37.9 Mpa ve Şekil Değiştirme olarak 0.011 mm/mm elde edilmiştir.



Şekil 18. FRP Dokuma ile sarılmış silindir numune Gerilme-Şekil değiştirme ilişkisi

Silindir beton numunelerin basınç deneylerinden elde edilen sonuçlara göre FRP dokuma ile sargılama beton basınç dayanımını yaklaşık olarak % 20 arttırırken Şekil Değiştirme kapasitesini (enerji emme kapasitesi) yaklaşık olarak 3.5 kat arttırmıştır (Şekil 19).



Şekil 19. Yalın ve FRP ile sarılmış silindir numuneler

Tablo 5. Bütün Deneylerin Yük-Deplasman /Gerilme-Şekil Değiştirme Değerleri

No	Deney	Yük (kN)	Deplasman (mm)
1	Yalın kiriş 1	42.4	45.6
2	Yalın kiriş 2	42.8	50
3	FRP Plakalar, 1,2*50 mm, ile onarım ve güçlendirme	98.9	23
4	FRP Plakalar, 1,2*50 mm, ile güçlendirme	110.2	22.5
5	FRP Plaka, 1, 2*50 mm, ile boyuna ve dokuma ile enine O/G	166.3	40.7
6	FRP Plaka, 1, 2*50 mm, ile boyuna ve dokuma ile enine güçlendirme	183.3	39.3
		Gerilme	Şekil Değ.
7	Yalın silindir numune	31.7Mpa	0.003mm/mm
8	FRP Dokuma ile sarılmış silindir numune	37.9Mpa	0.011mm/mm

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

FRP malzeme ile onarım ve güçlendirme yöntemine karar verirken, elemanın kesme güvenliği mutlaka kontrol edilmelidir.

Kiriş eğilme taşıma gücünü arttırmak için alt yüzüne yapıştırılan FRP şeridin açıklığın tamamına yapıştırılması daha uygundur.

FRP malzeme uygulanacak yüzey, epoksi harcının aderansını attırmak için, pürüzlendirilmelidir. Bu işlem elektrik çelik tel fırça, matkap veya kumlama ile yapılabilir.

FRP malzemeyi uygulamadan hemen önce yüzey iyice temizlenmelidir (Toz kalmamalıdır).

Çatlakların epoksi reçine enjeksiyonu yapılırken enjeksiyon dübeli için açılan delikler hava ile iyice temizlenmelidir.

Yapıştırımda kullanılan epoksi reçineler, yerinde kullanım hızına göre, uygun miktarlarda hazırlanmalıdır. Çok hızlı katılaşmaktadır.

FRP malzemeler betonarme elemanların onarım ve güçlendirmesinde kullanılabilir. Uygun şekilde kullanıldığında elemanların yük taşıma kapasitesini ve daha da önemlisi sünekliğini çok büyük ölçüde arttırmaktadır. Bu durumda elemanlar daha fazla deplasman yaparak daha fazla deprem enerjisi sönmüleyebilmektedir.

## 6. KAYNAKLAR

Bayülke, N. 1998. Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi, III. Baskı, İMO. İzmir Şubesi.

Ersoy, U. 1985. Betonarme Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı, Evrim Yayınevi, Ankara.

Gülkan, P. 1998. Quantification of Seismic Damage and Structural Intervention, Second Japon-Turkey Workshop on Earthquake Engineering., Feb 1998, İstanbul.

Özkul, H., Yıldırım, H. 1998. Strengthening of Steel Reinforced Concrete With FRP Materials, Second Japon-Turkey Workshop on Earthquake Engineering, Feb 1998, İstanbul.

Myers, J. J., Murthy, S., Micelli, F. 2001. Effect of Combined Environmental Cycles on the Bond of FRP sheets to Concrete., Proceedings-Composites in Construction, 2001. International Conference, Porto, Portugal, October 10-12, 2001.

Yang, X., A. Nanni, and G. Chan. 2001. Effect of Corner Radius on Performance of Externally Bonded FRP Reinforcement, Non-Metalic Reinf for Concrete Structures-FRP RCS-5, Cambridge, July 16-18, 2001, pp. 197-204.