



ISSN:1306-3111

e-Journal of New World Sciences Academy  
2011, Volume: 6, Number: 4, Article Number: 1A0212

**ENGINEERING SCIENCES**

Received: May 2011

Accepted: October 2011

Series : 1A

ISSN : 1308-7231

© 2010 [www.newwsa.com](http://www.newwsa.com)

**Günnur Yavuz**

Selcuk University

gyavuz@selcuk.edu.tr

Konya-Turkey

**LİF TAKVİYELİ POLİMERLERİN BETONARME KİRİŞLERDE DONATI OLARAK  
KULLANIMI**

**ÖZET**

Donatı çeliğinin korozyonu, inşaat sektörünün en önemli problemlerinden biridir. Günümüzde, lif takviyeli polimerlerin (FRP), yüksek korozyon dayanımına sahip olmaları nedeniyle, geleneksel çelik donatının yerine kullanılabilceği düşünülmektedir. Ayrıca, FRP kompozitlerinin yüksek dayanımlı ve hafif olması, buna karşılık iletken olmayan yapısı, endüstriyel alandaki araştırmacıların da dikkatini çekmiştir. Bu çalışmada, lif takviyeli polimer(FRP) olarak isimlendirilen kompozit malzemelerin, fiziksel ve mekanik özellikleri ve kompozit malzemelerin betonarme elemanlarda donatı olarak kullanımı ile ilgili bilgiler sunulmaktadır. Ayrıca, FRP donatılı betonarme yapıların davranışları, tasarım esasları ve uygulama alanları hakkında bilgi verilmekte, aynı boyut ve farklı donatı tiplerine sahip (kompozit ve çelik) toplam 4 adet betonarme kiriş elemanına ait moment-eğrilik davranışı ve moment taşıma kapasitesinin teorik olarak hesaplanmasından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Lif Takviyeli Polimer(FRP), Kompozit Malzeme, Donatı, Moment-Eğrilik, Betonarme

**THE USE OF FIBER REINFORCED POLYMERS AS THE REINFORCEMENT  
OF REINFORCED CONCRETE BEAMS**

**ABSTRACT**

One of the most important problems in construction industry is corrosion of steel reinforcement. Because of fiber reinforced polymers (FRP) having high corrosion resistance, it has been thought that FRP bars may be used instead of traditional steel reinforcement. FRP composites have attracted the attention of researchers in the field of industry due to high strength, lightweight and non-magnetic properties. In this study, fiber reinforced polymer composite materials (FRP), the physical and mechanical properties of these materials and the informations about the use of these composites as a reinforcement of reinforced concrete members are presented. Also, informations about the behavior of reinforced concrete structures with FRP reinforcement, design principles and application areas are given and the analysis results of 4 reinforced concrete beam members having different reinforcement types (composite and traditional steel) are compared the point of moment-rotation behaviour and theoretical moment bearing capacity.

**Keywords:** Fiber Reinforced Polymer(FRP), Composite Material, Reinforcement, Moment-Rotation, Reinforced Concrete

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Donatı çeliğinin korozyonu, inşaat sektörünün en önemli problemlerinden biridir. Betonun, deniz suyu veya tekrarlayan donma-çözülme olayı gibi çevresel faktörler etkisinde olduğu durumlarda donatı çeliğinde korozyon oluşabilmektedir. Bunun sonucunda, betonda hasar oluşması nedeniyle betonarme yapılarda zaman alıcı ve pahalı rehabilitasyon işlemleri uygulanması gerekebilmektedir. Bu gibi çevresel koşullar etkisindeki yapılar; otoparklar, liman yapıları, köprü tabliyeleri ve köprü ayakları gibi yapılardır.

FRP donatılarının avantajları; hafiflik, yüksek dayanım, istenen şeklin verilebilmesi, korozyona dayanıklılık, yorulma mukavemetinin yüksek olması, düşük ısı iletkenlik özelliği ve manyetik geçirgenliği olmaması, dezavantajları ise dayanımın lif doğrultusuna bağlı olarak değişmesi, aderans/kenetlenme'de düz yüzeyden dolayı problem oluşması ve pahallı olması şeklinde sıralanabilmektedir.

Lif takviyeli polimer donatıların (FRP), yüksek korozyon dayanımına, yüksek çekme dayanımına ve hafif bir malzeme olma özelliklerine sahip olması nedeniyle, geleneksel çelik donatının yerine kullanılabilmesi düşünülmektedir [1]. Geleneksel çelik donatıdan daha pahallı olmasına rağmen, bakım maliyetlerindeki potansiyel tasarruf FRP donatılarını uygulanabilir bir alternatif olarak ortaya koymaktadır [2]. FRP donatılarının başka bir özelliği de yapı elemanlarından kolaylıkla uzaktan algılamayla ölçüm yapılmasına imkan vermesidir. FRP donatısının içine yerleştirilebilen alıcılarda akıllı yapılar oluşturulması mümkün olabilmektedir. Bu tip donatılar, dünyada yüzey deformasyonlu donatı çubukları, öngerme tendonları ve çift yönlü hasır donatı sistemleri olarak kullanılmaktadır. FRP kompozitlerini betonarme yapı elemanlarında donatı olarak etkin şekilde kullanabilmek ve FRP malzemesiyle içten ve dıştan donatılmış/takviye edilmiş yapıların dizayn yöntemini standardize etmek için geniş ölçüde araştırmalar yapılmaktadır. Bununla birlikte, FRP donatılı yapılar için uygun dizayn denklemlerini ve uygulama metotlarını geliştirmek için çalışmalar devam etmektedir.

1950'li yıllardan itibaren yaygınlık kazanmaya başlayan kompozit malzemeler, çoğu zaman organik bir reçine olan bir matristen ve bu matrise gömülü elyaf (lif) güçlendirme öğesinden oluşmaktadır. Kompozit malzemelerde cam lifi, karbon elyafı ve aramid lifleri (kevlar vb.) kullanımı yaygındır. Bunların yanında seramik elyafı (silisyum karbür), polietilen, silis ve bor elyafı da yaygın olmamakla beraber kullanılabilir. Kompozit malzemeler, matrislerinin organik reçinelerden (plastikler) yapılması halinde reinforced polymer composite "RPC" (polimer kompozit takviyeli plastik) olarak adlandırılmaktadır. Polimer kompozitlerin, taşıyıcı sistemlerde kullanımları şimdilik sınırlıdır [3]. FRP kompozit ürünlerinin mühendislik sistemlerindeki kullanım amacı, geleneksel inşaat malzemelerine göre uzun yıllar ileri performans elde edilmesini hedeflemek, yani yapının kullanım ömrünü arttırmaktır.

## 2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Günümüzde, çevresel koşullar nedeniyle beton karbonatlaşma gibi kimyasal reaksiyonlarla zarar görebilmekte ve betonarme yapılarda kullanılan çelik donatı korozyona uğramaktadır. Bunun sonucu olarak, donatının bulunduğu bölgenin hacmindeki artıştan dolayı donatının çevresindeki beton hasar görmekte ve beton kabuğun dökülmesine neden olmaktadır. Amerika'da bulunan 581000 adet köprünün yaklaşık 1/3'ünün korozyon nedeniyle yapısal zayıflığa uğradığı ve fonksiyonel olarak işlevini yerine getiremediği düşünülmektedir. Bu köprülerin büyük çoğunluğu betonarme veya öngerilmeli betondan imal edilmiş olup, onarım ve güçlendirmeye ihtiyaç göstermektedir. İnşaa edilecek yeni

binalarda korozyon hasarını engellemek için mümkün olan alternatif bir çözüm yöntemi çelik donatı çubuklarının yerine antikorozyf malzemelerin kullanılmasıdır. Lif takviyeli polimerler (FRP) böyle uygulamalar için ideal malzeme olarak kullanılabilir. Bu kompozit malzemeler aynı zamanda, betonarme binaların ve köprülerin dıştan yapıştırılan laminatlar veya şeritler şeklinde kullanılarak onarılması ve güçlendirilmesi için de uygulaması kolay ve etkili bir malzeme olarak kabul görmektedir. Bunun yanında FRP tendonları aynı zamanda eski öngerilmeli beton kirişlerin güçlendirilmesi için de kullanılabilir [1].

Bu çalışmada, genellikle lif takviyeli polimer/plastik (FRP) olarak isimlendirilen kompozit malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri, inşaat sektöründe kullanımı, malzeme karakteristikleri ve temel dizayn koşulları hakkında bilgi verilmekte, uygulama örnekleri sunulmaktadır. Ayrıca, FRP donatılı betonarme yapıların davranışları, tasarım esasları ve uygulama alanları hakkında bilgi verilmekte, farklı donatı tiplerine sahip (kompozit ve çelik) toplam 4 adet betonarme kiriş elemanına ait moment-eğrilik davranışı ve moment taşıma kapasitesinin teorik olarak hesaplanmasından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır.

### **3. LİF TAKVİYELİ POLİMERLERİN (FRP) İÇ YAPISI (INTERNAL STRUCTURE OF FIBER REINFORCED POLYMERS (FRP))**

FRP ürünleri, reçine matrisi içerisine gömülmüş, yüksek dayanımlı liflerden oluşan kompozit malzemelerdir. Bu lifler, oluşturulan kompozit malzemeye dayanım ve rijitlik sağlamak ve genellikle yükün büyük bir kısmını almaktadırlar. Matris, liflerin kenetlenmesinde görev yapmakta ve kesme gerilmeleri boyunca liften life gerilme transferini sağlamaktadır. En yaygın kullanılan lifler; cam, karbon, ve aramid, matrisler ise; epoksi, polyester, vinyl ester veya fenoliklerdir [4].

Lifler, istenilen özellikleri elde etmek için farklı doğrultularda yerleştirilebilmektedir. Donatılar, hem doğal, hem de sentetik olabilmektedir. Bununla birlikte, ticari olarak en çok kullanılanlar sentetik olanlardır. İnşaat mühendisliği uygulamaları için en yaygın olarak kullanılan lif tipleri cam ve karbondur. Üretim alanı içerisindeki en geniş kullanım cam life aittir. Günümüzde uygulamada en yaygın olarak kullanılan lif takviyeli kompozitler laminat olarak isimlendirilen ve yapı elemanlarına dıştan yapıştırılarak uygulanan güçlendirme malzemeleridir. Laminatlar, birkaç ince katman ve matrisler topluluğunun istenilen kalınlıkta birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Her tabakadaki fiber doğrultusu, çeşitli katmanların yığın şeklinde sıralanmasıyla, yük etkisine göre fiziksel ve mekanik özelliklerin iyileştirilebileceği yönde yerleştirilmektedir. Termoset veya termoplastik reçineler, lif üretimi veya daha sonraki aşamada yüzey şeklinin verilmesini sağlamaktadır. Liflere uygulanan diğer malzemeler, bu elemanları bir arada yığın şeklinde tutan reçine tutkalları ve işlem sırasındaki aşınma nedeniyle meydana gelen azalmadan fiberleri koruyan lubrikant adı verilen maddelerdir [4].

#### **3.1. Cam Lifler (Glass Fibers)**

Cam lifler, kompozit malzemeleri takviye için kullanılan en yaygın malzemedir. Bunun nedeni, uygun fiyatı ve istenilen özelliklere büyük oranda sahip olmasıdır. "Cam" terimi, inorganik camların geniş bir grubunu ifade etmek için kullanılır. Bunlar, silika (SiO<sub>2</sub>) temelli olup az miktarda diğer inorganik oksitleri de içermektedirler. Cam lifler dayanıklı ve esnekler, fakat bazı inşaat uygulamaları için yeterli dayanıma sahip değildirler. Daha yüksek dayanım gerektiğinde

daha pahalı ve yüksek kaliteli olan karbon yada polimer lifler kullanılabilir [5]. Cam lif, ekonomik imalatından ve kendine has dayanım özelliklerinden dolayı pek çok inşaat mühendisliği uygulamasında kullanılan bir fiber tipi olmuştur. Bunlar, ticari olarak E-glass(E-cam) formülasyonunda olup kompozit donatının genel amaçlı ve en yaygın kullanılan tipidir. Yüksek dayanımlı diğer formülasyonlar, asite karşı dayanıklılığı geliştirilmiş olan ve alkali dayanımı geliştirilmiş ürünler de bulunmaktadır [4].

### 3.2. Karbon Lifler (Carbon Fibers)

Karbon lifler genellikle poliakrilonitril'in (PAN), 1000-1500°C'da karbonlaştırılması (havasız ortamda ısıtılması) ile üretilmektedir. Karbon liflerin uygulamadaki avantajları; boyutsal açıdan kararlı oluşları, kimyasal inertlikleri nedeniyle neme ve pek çok kimyasala direnç göstermeleri ve elektriksel/ısısal iletkenliklerinin yüksek oluşudur. Karbon fiberlerin kullanıcı açısından en önemli dezavantajı ise siyah renginden dolayı kompozit renginin istenilen şekilde korunamamasıdır. Diğer bir dezavantaj olarak yüksek maliyet söylenebilir [5]. Karbon lifler, güçlü fakat hafif bir yapıya sahiptirler. Bunun sebebi, karbon atomlarının bileşiği oluştururken meydana getirdiği geometridir [6].

### 3.3. Polimer Lifler (Polymer Fibers)

Polimer lifler, genel olarak istenilen yeterli dayanıma sahip değildirler. Yalnızca aramid lifler ve ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen lifler üstün mekanik özellikleri nedeniyle diğerlerinden ayrılırlar. "Aramid", aromatik liflerin genel adıdır. Ticari adı ise Kevlar'dır. Kevlar kompozitleri yüksek dayanım ve sertlikleri, hasar ve yorulma dirençleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Aramid lifler, düşük yoğunluk, sertlik ve darbe direncinde üstün mekanik özellik sağlar [5]. Aramid liflerinin dayanımı, cam liflere göre daha yüksek ve elastisite modülü camdan %50 daha fazladır. Bu lifler, kompozitlerin darbe direncini artırmakta ve daha yüksek gerilme dayanımı sağlamaktadır. Aramid lifler, hem elektrik geçirgenliğini hem de ısıyı yalıtılabilmektedirler [4].

Yukarıda sözü geçen lif tipleri karşılaştırıldığında karbon'un en iyi olduğu, onu Kevlar'ın ve ardından camın izlediği söylenebilir.

### 3.4. Matris (Matrix)

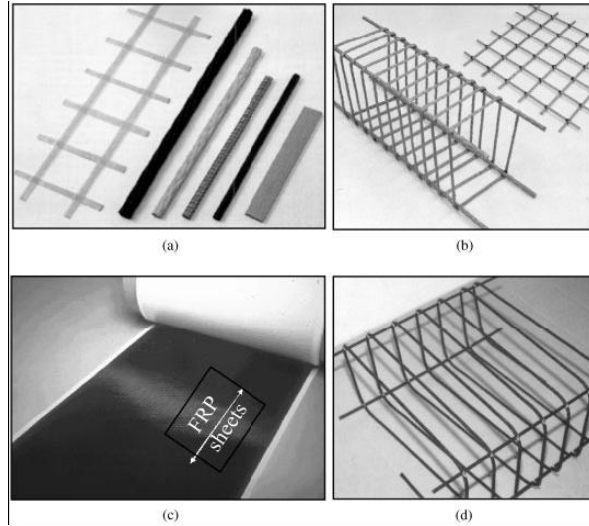
Matris, kompozitin temelini oluşturur ve lifleri bir arada tutarak kompozitin dayanımını artırır. Kullanım yerine bağlı olarak farklı matrisler seçilir. Vinilester reçineleri, poliester-stiren sistemiyle karşılaştırıldığında bazı avantajlara sahiptir. Çok fazla su emmezler ve kimyasal dirençleri daha yüksektir. Cam lifler kullanıldığında bu durum avantaj sağlar. Fakat ne vinilester, ne de doymamış poliester-stiren sistemi yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun değildir. Yüksek sıcaklıklarda, epoksi reçineleri gibi matrislerin kullanılması gerekmektedir. Bunlar 160°C'a kadar olan sıcaklıklarda kullanılabilirler. Ancak 160°C gerçek anlamda çok yüksek bir sıcaklık değildir [5].

Kompozit malzemeyi oluşturan elemanlardan her biri, işlem ve sonuç performansta önemli rol oynamaktadır. Reçine veya polimer, kompozit yapıyı bir arada tutmakta ve elde edilen ürünün fiziksel özelliklerine etki etmektedir. Takviye elemanı lifler, mekanik dayanımı sağlamaktadır. Dolgu maddeleri ve katkıları ise ürüne istenen özellikleri katmak amacıyla kullanılmaktadır.

#### 4. FRP KOMPOZİTLERİNİN YAPI ELEMANLARINDA KULLANIMI (THE USAGE OF FRP COMPOSITES IN STRUCTURAL MEMBERS)

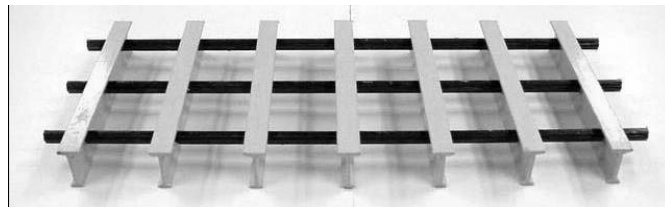
Günümüzde, özellikle dış ortamlara açık olan yapılarda kullanılabilen farklı tiplerde FRP donatıları mevcuttur; yüzey deformasyonlu donatı çubukları, öngerme tendonları, çift yönlü hasır donatılar ile güçlendirme amacıyla kullanılan laminatlar, tel veya şerit şeklindeki geleneksel betonarme donatısına ilave olarak kullanılan donatılar gibi (Şekil 1, Şekil 2). Dıştan şerit veya laminat şeklinde yapıştırılarak uygulanabilen FRP donatıları, beton yapıların ve köprülerin onarım ve güçlendirilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca, çelik yapılara alternatif olarak çelik profiller yerine FRP profilleri kullanılarak hafif, yüksek dayanımlı, korozyona dayanıklı taşıyıcı sistemler oluşturulabilmektedir[1].

Günümüzde betonarme ve öngerilmeli beton uygulamaları için kullanılan ve üretimi gerçekleştirilen FRP donatıları, tek doğrultulu, düz veya nervürlü çubuklar ve burulmuş tendonlar şeklindedir. Bazı FRP çubukları ise, aderans için gerekli olan yüzey deformasyonlarının elde edilebilmesi için helezonik tel sarma yöntemi gibi ikinci bir işleme maruz bırakılmakta veya kendisini çevreleyen betonla arasında daha iyi bir aderans olması için kumla kaplanmaktadır (Şekil 3). Şekil 3'te farklı yüzey özelliklerine sahip FRP donatı çubukları görülmektedir.

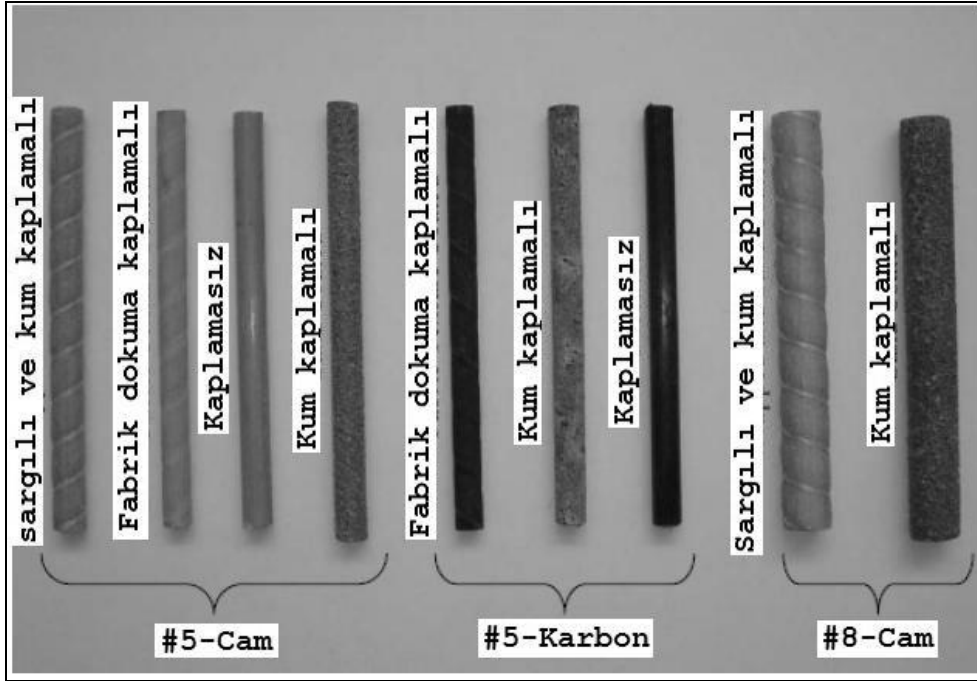


Şekil 1. Betonarme yapılarda iç ve dış donatı olarak kullanılan FRP tipleri[1]

(Figure 1. FRP products using reinforced concrete structures as internal and external reinforcement [1])



Şekil 2. Köprü tabliye betonlarında kullanılan FRP donatı tipleri [7]  
(Figure 2. FRP reinforcement types using in bridge deck panels [7])



Şekil 3. FRP donatı örnekleri [8]  
(Figure 3. Sample FRP Reinforcement Configurations [8])

FRP donatısının önemli avantajlarından biri, özel performans ve dizayn amacına yönelik olarak şekillendirilebilmesidir. Örneğin, FRP donatısı çubuk, plak ve halat şeklinde oluşturulabilmektedir. Çelik donatıdan farklı olarak, standardize edilmiş kesin bir şekilleri, yüzey konfigürasyonları, lif doğrultusu, birleşim malzemeleri ve oranları yoktur. Benzer olarak, üretim metodlarının standardizasyonu da bulunmamaktadır (pultrüzyon, örme, filament sarma gibi) [8].

##### 5. İÇ FRP DONATISI (INTERNAL FRP REINFORCEMENT)

FRP kompozitlerinin çekme dayanımı, geleneksel çelikten daha yüksektir. Ağırlığının az olması ise, taşıma, işçilik ve ekipman maliyetlerinin azalmasını sağlamakta ve inşaat sahasında çubukların yerleştirilmesini kolaylaştırmaktadır. Bundan başka, elektromanyetik izolasyonun kritik olduğu uygulamalarda (nükleer güç santralleri, hastaneler gibi), bu donatının non-manyetik özellikleri bir avantaj olarak ortaya çıkmaktadır.

FRP çubuklarının mekanik özellikleri çelik çubuklardan oldukça farklıdır ve esasen matris ve lif tipine bağlıdır. Genellikle FRP çubukları, çeliğe göre daha düşük ağırlığa, daha düşük elastisite modülüne ve daha yüksek dayanıma sahiptir. Tablo 1'de [4] betonarme yapılarda kullanılan FRP donatılarının çelik donatıya göre avantaj ve dezavantajları görülmektedir [8].

Çekme etkisindeki özellikleri FRP'yi çelik donatıya karşı kullanılabilir bir alternatif yapmaktadır. FRP çubukları çekme kuvveti etkisinde kopmadan önce herhangi bir plastik davranış (akma) sergilememektedir. Bundan dolayı, FRP donatısı momentin yeniden dağılımının gerekli olduğu çerçevelerde veya bu tip bölgelerde önerilmemektedir. Tablo 2'de ACI 440.1R'de [4] verilen en yaygın donatı çubuklarının çekme özellikleri görülmektedir [8].



Tablo 1. FRP donatılarının avantaj ve dezavantajları  
(Table 1. Advantages and disadvantages of FRP reinforcement)

Avantajları	Dezavantajları
Yüksek boyuna çekme dayanımı (liflerin yükleme yönü ve işaretiyle değişmektedir)	Gevrek kopmadan önce akma olmaması
Korozyon dayanıklılığı (kaplamaya bağlı değildir)	Düşük enine dayanım (liflerin yükleme yönü ve işaretiyle değişmektedir)
Manyetik olmaması	Düşük elastisite modülü (takviye lifi tipine göre değişmektedir)
Yüksek yorulma dayanımı (takviye lifi tipine göre değişmektedir)	Ultraviyole radyasyon etkisi altında polimer reçineler ve lifler için hasar hassasiyeti
Hafiflik (çeliğin yoğunluğunun yaklaşık 1/5-1/4'ü)	Nemli çevre koşullarında cam liflerin düşük durabilitesi
Düşük termal ve elektrik iletkenliği (cam ve aramid lifler için)	Alkali çevre koşulunda bazı cam ve aramid liflerin düşük durabilitesi
	Liflere dik yüksek ısı genleşme katsayısı (betona göre)
	Matris tipi ve beton paspayı kalınlığına bağlı olarak yangına hassasiyet

Tablo 2. FRP donatı çubuklarının tipik çekme özellikleri\*  
(Table 2. Typical tensile properties of reinforcing FRP bars\*)

	Çelik	GFRP	CFRP	AFRP
Nominal akma gerilmesi, MPa	276-517	-	-	-
Çekme dayanımı, MPa	483-690	483-1600	600-3690	1720-2540
Elastisite modülü, MPa	200	35-51	120-580	41-125
Akma şekil değiştirmesi, %	0.14-0.25	-	-	-
Kopma şekil değiştirmesi, %	6.0-12.0	1.2-3.1	0.5-1.7	1.9-4.4

\* Lif hacim oranları 0.5-0.7 için tipik değerler

FRP çubuklarının boyuna ısı genleşme katsayısını lif tipleri, enine katsayıya ise reçine belirlemektedir. Tablo 3'te [9], lif hacim oranı %50-%70 arasında değişen kompozit çubukların  $\alpha_1$  boyuna ve  $\alpha_t$  enine yönlerdeki ısı genleşme katsayılarının tipik değerleri görülmektedir [8].

Tablo 3. Isı genleşme katsayıları  
(Table 3. Coefficients of thermal expansion)

Çubuk tipi	$\alpha_1$ ( $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )	$\alpha_t$ ( $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
AFRP	-6.0~2.0	60.0~80.0
CFRP	-2.0~0.0	23.0~32.0
GFRP	6.0~10.0	21.0~23.0

FRP donatı çubukları, uzun süreli yük etkisi altında dayanımda önemli azalmaya neden olan statik yorulmaya (sünme kırılması) hassastır. Genellikle, sünme kırılmasına karşı, karbon lifler en az, aramid lifler orta şiddetli ve cam lifler en hassas lif tipleridir [4]. Bu özellik, ısı ve nem gibi çevresel faktörlerden yüksek oranda etkilenmektedir [8].

FRP çubuğu ve etrafındaki beton arasındaki kenetlenme, değeri çubuk geometrisine, yüzeyinin kimyasal ve fiziksel karakteristiklerine ve beton basınç dayanımına bağlı olan gerilme dağılımıyla

sağlanmaktadır. Son parametre, FRP çubukları için çelik çubuklardan daha az önemlidir.

Çelik yerine, FRP donatı kullanılan betonarme elemanlarda; geleneksel betonarmeye göre daha büyük çatlak genişlikleri, önemli miktarda fazla sehim ve daha büyük eğilme dayanımı elde edileceği düşünülmektedir [4]. Özellikle FRP donatılı yapı elemanlarında beklenen gevrek kırılmadan dolayı, genellikle kullanılabilirlik sınır durumu belirleyici parametre olmaktadır. Mevcut FRP donatıların kullanıldığı betonarme elemanların eğilmede göçmesine, betonun ezilmesi veya FRP donatısının kopması hakim olmaktadır. Göçme modları gevrek ve denge altı donatı oranına sahip betonarme kirişlerin davranışından farklıdır [4].

FRP donatılarının yukarıda bahsedilen avantajlarına karşılık, araştırmacılar halen bu malzemenin aşağıdaki istenmeyen karakteristik özellikleri nedeniyle zorluklarla karşılaşmaktadırlar [10];

- FRP kompozitleri, lif yönünde yüklendiği zaman, lineer elastik malzeme özelliği göstermekte, göçme gevrek ve ani olmaktadır. Halbuki, çelik donatı akma konumuna ulaşmakta ve sünek bir şekilde kırılmaktadır. Betonarme teorisi, yapısal elemanların dizaynında ani ve şiddetli göçmeye karşı akmanın büyük bir emniyet faktörü sağlayacağını kabul etmektedir.
- En yaygın kullanılan cam lif takviyeli kompozitlerin (GFRP) elastisite modülü çeliğinkinden daha düşüktür. Bu durum servis yükleri altında, çelik yerine aynı kesit alanına sahip FRP donatısı kullanılması durumunda, büyük sehimler ve çatlak genişliklerinin ortaya çıkmasına neden olacaktır.
- FRP kompozitleri anizotropik bir yapıya sahiptir. Bu durum, bu malzemelerin karakterizasyonunu ve standardizasyonu için yapılan çalışmaları daha karmaşık hale getirmektedir. Malzemenin, doğrultuya bağlı özelliklerinin belirlenmesine ihtiyaç vardır ve bundan dolayı dizayn yöntemi daha karmaşık olmaktadır.
- Günümüzde, bu ürünlerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için kullanılan deney metotları, standardizasyondan daha çok, üzerinde ortak karar alınan durumlara göre yapılmaktadır [4].

Lif takviyeli polimerlerin, betonun içinde donatı olarak kullanılabilirliğindeki en kritik sorunlardan biri de aderans (kenetlenme) kapasitesidir. Nervürlü çelik donatının, kendisini çevreleyen betonla mükemmel bir aderansa sahip olmasına karşılık düz bir FRP donatısı böyle bir aderans (kenetlenme) kapasitesine sahip değildir. GFRP donatı çubuklarının aderans kapasitesinin, çelik donatı çubuklarınınkinden %60-90 daha düşük olduğu belirlenmiştir [11].

Çelik donatı kullanılması durumunda, aderans şu özelliklerle elde edilmektedir [10];

- Çelik beton arayüzündeki kimyasal yapışma
- Sıcakta çekilmiş donatı çubuklarının ölçeksiz doğal pürüzlülüğü
- 2 malzeme arasında yüksek derecede kenetlenmeyi sağlayan, yakın aralıklı tel şeklinde yüzey deformasyonları

Buna karşılık, FRP donatı çubukları ve beton arasında bir kimyasal kenetlenme oluşmamakta yada oluşturulan yüzey deformasyonlarıyla orta seviyede gerçekleşmektedir. Aderans dayanımı, FRP çubuklarının imalat yöntemine, mekanik özelliklerine ve yüzey karakteristiklerine bağlıdır. FRP çubuklarının betonla kenetlenme mekanizması, geleneksel betonarmeden oldukça farklıdır. Bir FRP çubuğun aderans kapasitesi yüksek oranda, yüzey deformasyonları civarındaki kompozit malzemenin kesme dayanımına bağlıdır. Donatı çubuklarının, kenetlenme kapasitesini arttırmak için genellikle kullanılan bir başka teknik "kumla kaplama"dır. Bu durumda, kum kaplama yüzeyi çelik çubuklardaki nervürler gibi davranış



göstermektedir [4]. Çubuk yüzeyinin kumla kaplı olması, aderans dayanım ve rijitliğini artırmakta, fakat daha gevrek aderans davranışı elde edilmesine neden olmaktadır. Yüzeyi kumla kaplı FRP çubuklar, çelik çubuklardan daha yüksek, düz yüzeyli FRP çubukları ise daha zayıf bir aderans dayanımına sahip bulunmuştur. Spiral şeklinde lifle sarılmış çubukların aderans dayanımı, düz yüzeyli çubuklardan bir miktar daha yüksek bulunmuştur [12].

FRP donatı çubuklarının aderans (kenetlenme) özellikleri, çevresel koşullardan etkilenmektedir. Reçine matrisindeki malzeme azalımı, kenetlenme kapasitesinin azalmasına veya tamamen kaybolmasına neden olabilmektedir [13]. Polimer matrisin özellikleri yangın güvenliğini belirleyen en önemli etkidir. Polimer matrisin artan sıcaklık nedeniyle mekanik özelliklerinde meydana gelen bozulma, FRP malzemesinin mekanik ve aderans özelliklerinin azalması şeklinde sonuçlanmaktadır.

### 5.1. Dizayn Yöntemi (Design Method)

FRP donatılı betonarme elemanlar için temel dizayn yöntemleri, geleneksel çelik donatılı betonarmenin dizayn yöntemleriyle benzerdir. Kesite ait; denge, şekil değiştirme uygunluk ve malzeme davranışı, donatı malzemesi dışında betonarme yapıların dizaynında kullanılan tüm yönetmelik yaklaşımlarını temel alarak şekillenmektedir [6].

FRP donatı ürünlerinin sünek olmayan ve anizotrop bir yapısı olması nedeniyle ilave yönetmeliklere ihtiyaç duyulmaktadır. Eğilme etkisine göre dizayn, örnek olarak, taşıma gücü sınır durumunda, gerekli dayanım ve kullanılabilirlik kriterlerini sağlayabilecek şekilde ya FRP'nin kopmasıyla yada betonun ezilmesiyle tanımlanabilmektedir [4]. Bu tip göçme modlarının sünek olmamasından dolayı, yapıda yüksek dayanım rezervi gerekmektedir. Bundan dolayı, dayanım azaltma katsayıları veya malzeme dayanım katsayıları FRP donatılı betonarme elemanlar için genellikle çelik donatılı beton elemanlardan daha düşüktür. Tüm durumlarda, FRP dizayn kılavuzları ve yönetmelikleri betonarme dizayn yönetmelikleriyle uyumludur. Yük katsayıları değiştirilmeden sadece dayanım azaltma katsayıları ve malzeme direnç katsayıları düzenlenerek FRP kullanıma uygun hale gelebilmektedir [4].

FRP donatısının, boyuna donatı ve etriye olarak çelik donatı yerine kullanımı çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir. Betonarme elemanlar için mevcut dizayn metodu, sünek kırılmayı sağlamak için kirişlerin denge altı donatılmasını gerektirmektedir. Bu kabul ile beton ezilmeden önce çelik donatı akma konumuna gelecektir. Bu yaklaşım, FRP donatılı kirişler için geçerli değildir [10]. Çünkü FRP donatısı akmamakta fakat çekme kapasitesine ulaştığında kopmaktadır. Bundan dolayı kiriş istenmeyen bir şekilde aniden kırılmakta ve göçmektedir. FRP etriyeleri, elastik yapısından dolayı istenilen şekilde bükülemez. Bu ise malzeme maliyetini artırmaktadır. Bu çubukların kıvrılmış bölümlerinde gerilme yığılması meydana gelmekte ve bundan dolayı etriyenin kapasitesi azalmaktadır. Bu tip etriyelerde, bükülme bölgesinde çekme kapasitesinin tamamına ulaşılmadan erken kırılma meydana gelmektedir [14].

GFRP donatı çubuklarına sahip basit mesnetli dikdörtgen kesitli basit kirişlerin eğilme davranışı üzerine yapılan bir çalışmada, donatıların yüksek çekme dayanımı kapasitesinden daha iyi faydalanabilmek için yüksek dayanımlı beton kullanılmasının gerektiği sonucuna varılmıştır. Yüksek dayanımlı betona ilave olarak kum kaplı GFRP donatı çubukları kullanılması durumunda, kirişlerin çatlama momenti değerinin yükseldiği ve basınç bölgesine doğru çatlakların ani yayılışının önlendiği ve çatlak genişliklerinin azaldığı sonucuna varılmıştır [15].

Nanni ve arkadaşları [16], FRP donatı çubuklarının yüzeyinin kumla kaplanmasının, kirişlerde eğilme kapasitesini yaklaşık %25 oranında arttırdığını belirlemişlerdir. Ayrıca, dış yüzeyi kumla kaplı FRP donatıları bulunan kirişlerin davranışı, düz yüzeyli donatıları bulunan kirişlerin davranışıyla karşılaştırıldığında, daha küçük çatlak genişlikleri gözlenmiş ve daha yüksek çatlama sonrası eğilme rijitliği elde edilmiştir.

ACI 440.1R'de, Tureyen ve Frosch (2003) tarafından önerilen, donatı olarak FRP çubuklarının kullanıldığı eğilme elemanlarında betonun  $V_c$  kesme dayanımı denklem (1) ile belirlenmektedir [17].

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w c \quad (1)$$

Burada,  $f'_c$ : beton basınç dayanımı,  $b_w$  gövde genişliği ve  $c=kd$  elastik-çatlamış kesit kabulüyle basınç bölgesindeki beton yüksekliğidir.

FRP donatılı eğilme elemanlarının kullanılabilirlik sınır durumu, sehim ve çatlak genişlik sınırları olarak tanımlanmaktadır. Yapılan bir çalışmada, nihai yükte FRP donatılı kirişlerin buna tekabül eden çelik donatılı kirişlere göre 3 kat fazla sehim yaptığı belirlenmiştir [18].

Faza ve GangaRao [15], FRP donatılı betonarme kirişlerin açıklık ortasındaki maksimum sehiminin hesaplanması için kullanılan moment-alan yönteminde gerekli olan efektif atalet momentinin hesaplanması için, yükleme noktaları arasındaki beton kesitin tamamen, diğer kısımların kısmen çatladığı kabulüne dayanarak Denklem (2)'yi önermişlerdir.

$$I_m = \frac{23I_{cr}I_e}{8I_{cr} + 15I_e} \quad (2)$$

Burada,  $I_m$  modifiye edilmiş atalet momenti,  $I_{cr}$  çatlamış kesit atalet momenti ve  $I_e$  efektif atalet momentini göstermektedir.

GFRP ve çelik donatılı betonarme kirişlerin eğilme davranışlarının karşılaştırıldığı başka bir çalışmada, kirişlerde taşıma gücü momenti değerinin %25'inde, FRP donatılı kirişlerin çatlak dağılımı ve aralıkları çelik donatılı kirişlerle benzer olmuş, kullanım (taşıma gücü momentinin %50'si) ve nihai (taşıma gücü momentinin %90'ı) yük kademelerinde, FRP donatılı kirişlerde, çelik donatılı kirişlerden daha çok sayıda ve daha geniş çatlaklar gözlenmiştir [19]. Bu durum sünek olmayan bir davranışı göstermektedir.

Çelik donatılı elemanlarda olduğu gibi, bir betonarme elemanın çekme bölgesindeki maksimum çatlak genişliği; donatıdaki şekil değiştirme kademesi, beton paspayı, donatı aralığı ve donatının mekanik özelliklerinden etkilenmektedir [20].

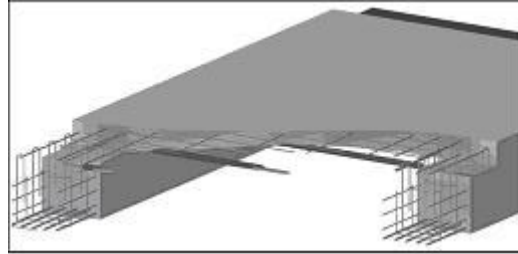
## 6. UYGULAMA ÖRNEKLERİ (PRACTICAL APPLICATIONS)

Günümüzde, dünyada pek çok ülkede FRP donatıları ve FRP profilleri kullanılarak oluşturulmuş yapı örnekleri bulunmaktadır. Betonda FRP donatısının ilk uygulama örnekleri Japonya'da yapılmıştır [8]. Özellikle Kuzey Amerika, Avrupa ve Japonya'da çok sayıda betonarme yapı FRP donatısı kullanılarak inşa edilmekte veya güçlendirilmektedir.

FRP uygulamaları; iç donatı, öngerme tendonları olarak, betonarme ve yığma yapıların güçlendirilmesi için dıştan donatı şeklinde ve taşıyıcı sistemlerde profil olarak kullanılmaktadır. FRP profil ve çubuklarından oluşan köprü tabliyelerinde, FRP tabliye panelleri, FRP çubukları ve çift yönlü FRP ızgaraları olmak üzere 3 farklı eleman tipi kullanılabilir. FRP tabliye panellerinin üzerine, kompozit çalışma için agrega yerleştirilmektedir [6]. Şekil 4

[21] ve 5 [8]'te FRP'nin iç donatı olarak kullanıldığı çeşitli yapı örnekleri görülmektedir.

FRP donatısının üstün özelliklerine karşılık, gevrek kırılma göstermesi nedeniyle günümüzde FRP donatısıyla birlikte çelik donatının da kullanılmasının daha iyi sonuçlar vereceği düşünülmektedir. Lau ve Pam [22], yaptıkları deneysel çalışmada, sadece çelik donatılı, GFRP donatılı, hibrid(çelik ve GFRP) donatılı ve donatısız yaklaşık C40 beton kalitesinde betonarme kiriş numunelerini denemişler ve GFRP donatılarına ilave olarak çelik donatı kullanıldığında sünekliğin iyileştiğini, ayrıca dengeüstü donatıya sahip kirişlerde bu süneklik artışının denge altı donatıya sahip kirişlere göre daha fazla olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca ACI 440.1R'de [4] FRP eğilme donatısı için verilen minimum sınırın yaklaşık %25 azaltılması gerektiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 4. FRP uygulama örnekleri (Halls Harbour limanı tabliye ve kiriş detayı (GFRP)) [21]  
(Figure 4. FRP applications (Details of deck and beam of Halls Harbour coast (GFRP)) [21])



*Lincoln General Hospital, Lincoln – NE (USA)*



*York Hospital, Trauma Center (USA)*



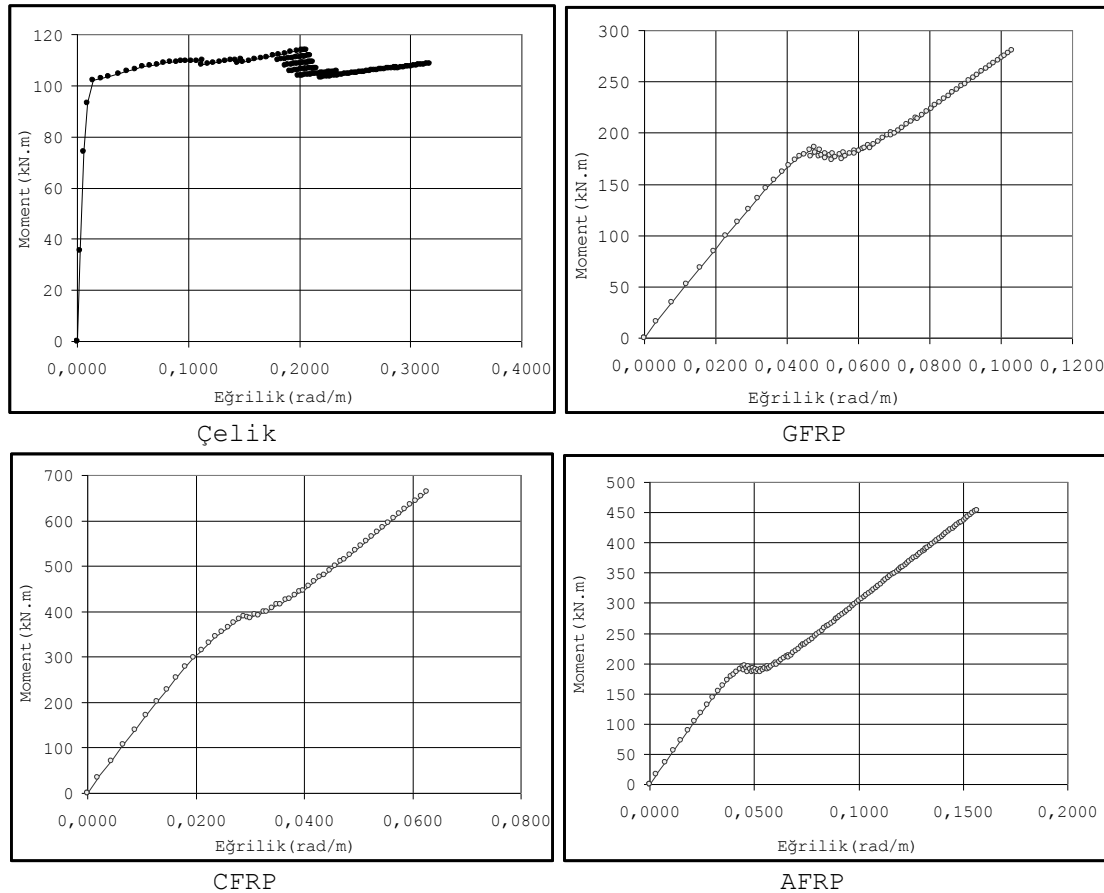
Şekil 5. Günümüzdeki FRP betonarme yapılara ait örnekler [8]  
(Figure 5. Recent constructions of FRP reinforced concrete buildings[8])

## 7. FRP VE ÇELİK DONATILI BETONARME KİRİŞ ÖRNEĞİ (A REINFORCED CONCRETE BEAM EXAMPLE WITH FRP AND STEEL REINFORCEMENT)

FRP donatılı elemanlar genellikle kullanılabilirlik sınır durumu dikkate alınarak tasarlanmaktadır. Bu durumda ACI440.1R [4] yönetmeliği dikkate alınarak, 4 farklı tipte donatı için (çelik, GFRP, CFRP ve AFRP) aynı kesit boyutlarına ve beton basınç dayanımına sahip bir kiriş elemanında moment taşıma kapasitesi ve moment-eğrilik diyagramı kiriş tasarımı yazılımı [23] kullanılarak elde edilmiştir. Kiriş kesit boyutları 250/500 mm, silindir beton basınç dayanımı 30 MPa olarak seçilmiştir. Donatı malzeme karakteristik özellikleri Tablo 2'deki [8] sınır değerler dikkate alınarak seçilmiştir. Donatı çubukları 16 mm çapında seçilmiştir. Donatı tiplerine ait seçilen malzeme dayanım değerleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Donatı çubuklarına ait malzeme özellikleri  
(Table 4. Material properties of reinforcement bars)

Donatı tipi	Akma gerilmesi MPa	Çekme dayanımı MPa	Elastisite modülü MPa	Akma uzaması %	Kopma uzaması %
Çelik	276	690	200	0.25	12
GFRP	-	1600	51	-	3.1
CFRP	-	3690	580	-	1.7
AFRP	-	2540	125	-	4.4



Şekil 6. Farklı tipte donatılı betonarme kiriş kesiti için elde edilen moment-eğrilik grafikleri

(Figure 6. Moment-curvature graphics of reinforced concrete beam section with different reinforcement)

Yapılan analiz sonucunda elde edilen moment-eğrilik grafikleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu analize göre, çelik, GFRP, CFRP ve AFRP donatılı kesitler için belirlenen moment taşıma kapasiteleri sırasıyla, 114055, 280156, 664449 ve 453736 kNmm bulunmuştur. Buna göre, en yüksek moment taşıma kapasitesi CFRP donatılı kesitte, en düşük moment taşıma kapasitesi ise çelik donatılı kesitte bulunmuştur. Moment-eğrilik grafikleri incelendiğinde en sünek davranışın geleneksel çelik donatılı kiriş için elde edildiği, kompozit donatılı kirişlerde ise lineere yakın bir grafik oluştuğu gözlenmiştir.

## 8. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Donatı korozyonuyla mücadelede, yeni inşa edilecek yapılar için betonarmeyi oluşturan iki malzemeden biri olan çelik donatı yerine paslanmayan malzemelerden oluşan yeni donatılar kullanılmasının uygun bir çözüm olabileceği düşünülmektedir. Korozyon riskinin yüksek olduğu bölgelerdeki önemli ve dış hava şartlarına maruz yapılar için, yüksek çekme dayanımına sahip, hafif ve korozyona dayanıklı lif takviyeli polimer (FRP) donatılarının kullanılmasının ideal olduğu düşünülmektedir. FRP donatıları, geleneksel çelik donatılardan daha pahalı olmasına rağmen, bakım maliyetlerindeki potansiyel tasarruf FRP donatılarını uygulanabilir bir alternatif olarak ortaya koymaktadır.

FRP donatılarının; düşük ağırlık, yüksek dayanım, istenen şeklin verilebilmesi, korozyona dayanıklılık, yorulma direncinin yüksek olması, düşük ısı iletkenlik özelliği ve manyetik geçirgenliği olmaması gibi avantajlarına karşılık, dayanımın lif doğrultusuna bağlı olarak değişmesi, aderans problemi ve pahalı olması dezavantajları olarak sıralanabilir. Ayrıca lif takviyeli polimer donatıların kopma şekil değiştirmeleri çok küçük değerde olduğundan taşıma gücü yöntemine göre betonarme kesit hesabında bu durumun sınırlı meydana getirebileceği düşünülmektedir. Akma platosu gözlemlenmeyen bu malzeme için süneklik çok sınırlı olacağından özellikle deprem bölgelerinde yapılacak olan yapılarda uygulanabilmesi için kapsamlı araştırmalar yapılması gerekmektedir.

FRP'nin betonarme elemanlarda donatı olarak kullanılabilmesi için; beton ve FRP donatısının birlikte nasıl bir davranış sergileyeceğinin belirlenmesi ve kompozit davranışı doğru bir şekilde tahmin edecek güvenilir analitik yöntemlerin tespit edilmesi gerekmektedir.

Yapılan yeni çalışmalarda, çelik ve FRP donatısının birlikte kullanıldığı hibrid betonarme kirişlerin, sadece FRP donatısı kullanılan elemanlara göre genel olarak daha iyi bir davranış gösterdiği gözlenmektedir.

Sonuç olarak, klasik inşaat çeliğinin FRP donatısına göre davranış ve maliyet açısından üstün olduğu görülürken birlikte, özellikle korozyona sebep olabilecek çevresel etkiler altındaki önemli yapılarda çelik ve FRP donatısının birlikte kullanılmasyla iyi sonuçlar alınabileceği düşünülmektedir.

## NOT (NOTICE)

Bu makale, 28-30 Eylül 2011 tarihleri arasında Elazığ Fırat Üniversitesinde "International Participated Construction Congress" IPCC11'de sözlü sunum olarak sunulmuştur.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Rizkalla, S., Hassan T., and Hassan, N., (2003). Design Recommendations for the use of FRP for Reinforcement and Strengthening of Concrete Structures. Prog. Struct. Engng Concrete Construction Mater., Volume: 1, Number: 5, pp: 16-28.

2. Bank L.C. and Shapira, A., (1997). Structural and Construction Aspects of Novel Multidimensional Reinforcements for Concrete, in Proceedings of the Third International Symposium on Non-metallic (FRP) reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3), Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, Volume: 2, pp: 623-30.
3. Orhon, A.V., (2007). Modern Yapı Malzemeleri, Yapı Dergisi <http://www.yapidergisi.com/makaleicerik.aspx?MakaleNum=21>
4. ACI 440.1R, (2006). American Concrete Institute Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars.
5. Gümüşderelioğlu, M., (2004). Geleceğin Malzemeleri, Kompozit Malzemeler, Bilim ve Teknik Dergisi, s. 2-5.
6. Uçar, Ş.B., (2008). Lif Takviyeli Polimerlerin (FRP) Taşıyıcı Sistemlerde Donatı ve Profil Olarak Kullanımı, YL Semineri, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
7. Jacobson D.A., (2004). Experimental and Analytical Study of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Grid-Reinforced Concrete Bridge Decking MSc Thesis, University of Wisconsin-Madison.
8. Fico, R., (2006). Limit States Design of Concrete Structures Reinforced with Frp Bars, PhD Thesis, University of Naples Federico II.
9. CNR-DT 203/2006, (2006). Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars, National Research Council, Rome, Italy.
10. Özel, M., (2002). Behavior of Concrete Beams Reinforced with 3-D Fiber Reinforced Plastic Grids, Phd Thesis, University of Wisconsin - Madison, USA.
11. Benmokrane, B., Chaallal, O., and Masmoudi, R., (1996a). Flexural Response of Concrete Beams Reinforced with FRP Reinforcing Bars, ACI Structural Journal, Volume: 93, Number: 1, Jan.-Feb., pp: 46-55.
12. Cosenza, E., Manfredi, G., and Realfonzo, R., (1997). Behavior and Modeling of Bond of FRP Rebars to Concrete, Journal of Composites for Construction, American Society of Civil Engineers, May, pp: 40-51.
13. Bank, L.C., Puterman, M., and Katz, A., (1998). The Effect of Material Degradation on Bond Properties of Fiber Reinforced Plastic Reinforcing Bars in Concrete ACI Materials Journal, Volume: 95, Number: 3, pp: 232-43.
14. Duranovic, N., Pilakoutas, K., and Waldron, P., (1997). Tests on Concrete Beams Reinforced with Glass Fibre Reinforced Plastic Bars. *Proceedings of the Third International Symposium on Non-metallic (FRP) reinforcement for Concrete Structures*, Volume: 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp: 479-86.
15. Faza, S.S. and GangaRao, H.V.S., (1992). Bending and Bond Behavior of Concrete Beams Reinforced with Fiber Reinforced Plastic Rebars, WVDOH-RP-83 Phase I Report, West Virginia University, Morgantown, W.Va., pp: 128-73.
16. Nanni, A., Utsunomiya, T., Yonekura, H., and Tanigaki, M., (1992). Transmission of Prestressing Force to Concrete by Bonded Fibre Reinforced Plastic Tendons, ACI Structural Journal, Volume: 89, Number: 3, May-June, pp. 335-44.
17. Tureyen, A.K. and Frosch, R.J., (2003). Concrete Shear Strength: Another Perspective," ACI Structural Journal, Volume: 100, Number: 5, Sept.-Oct., pp: 609-15.
18. Nawy, E.G. and Neuwerth, G.E., (1971). Behavior of Fiber Glass Reinforced Concrete Beams, Journal of the Structural Division, ASCE, Sept., pp: 2203-15.



19. Benmokrane, B., Tighiouart, B., and Chaallal, O., (1994). Investigation on Bond Performance of FRP Rebars, Summary during Technical Session on Bond of FRP Reinforcing Bars and Tendons, ACI Spring Convention, San Francisco, Calif., March, pp: 1-4.
20. Frosch, R.J., (1999). Another Look at Cracking and Crack Control in Reinforced Concrete, ACI Structural Journal, Volume: 96, Number: 3, May-June, pp: 437-42.
21. Mufti A.A, Tennyson, R.C., and Cheng J.J.R., (2003). Integrated sensing of civil and Innovative FRP structures, Prog. Struct. Engng Mater., New Materials in Construction, Volume: 5, pp: 115-26.
22. Lau, D. and Pam, H.J., (2010). Experimental Study of Hybrid FRP Reinforced Concrete Beams, Engineering Structures, Volume: 32, pp: 3857-65.
23. Ersoy, U. ve Özcebe, G., (2001). Kiriş Tasarımı Yazılımı.