



Betonarme Yapıların Güçlendirilmesinde Kullanılan FRP Kompozitin Yapısal Performansa Etkisi

Müslüm Murat Maraş^{1*}

^{1*} İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-6324-207X), murat.maras@inonu.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 20 Eylül 2020 ve Kabul Tarihi 6 Mart 2021)

(DOI: 10.31590/ejosat.797437)

ATIF/REFERENCE: Maraş, M.M. (2021). Betonarme Yapıların Güçlendirilmesinde Kullanılan FRP Kompozitin Yapısal Performansa Etkisi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (23), 108-119.

Öz

Son yıllarda betonarme yapılarda deprem sonrası yapılan araştırmalarda, betonarme yapı tasarımındaki koşulların dikkate alınmadığı gözlenmiştir. Betonarme yapı elemanlarında, farklı tasarım hataları ve yapısal düzensizliklerden dolayı, birçok hasar meydana gelmektedir. Deprem etkisi altında, bu yapılarda özellikle kolon-kiriş birleşim bölgelerinde donatının akma noktasını geçmesi ile büyük dönmelerin meydana gelmesi sonucu, ağır hasarlar oluşmaktadır. Günümüzde, bu hasarlı yapılar için farklı güçlendirme çalışmaları yapılmaktadır. İnşaat sektöründeki gelişmelerle birlikte bu hasarlı betonarme binaların Fiber Takviyeli Polimer (FRP) kompozitlerle güçlendirilmesi büyük bir önem kazanmıştır. Yüksek çekme mukavemetine sahip olan bu kompozitler, deprem etkisinde yüksek oranda enerji yutarak ve büyük deplasmanlar yaparak sünek davranış sergilerler. Yapılan çalışmada, FRP kompozitlerin betonarme yapı elemanlarındaki önemi ve mühendislik özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Bu kompozitlerin yapı taşıyıcı sistemlerinin farklı bölgelerinde farklı teknikler kullanarak uygulanmasıyla, taşıyıcı yapısal davranışlarının öneminin arttığı görülmüştür. Sonuç olarak, FRP kompozitlerin inşaat sektöründe yapı taşıyıcı sistemlerde güçlendirme çalışmalarında kullanılmasıyla birlikte yapının ekonomik ömrünün arttırılabileceği ve yapı elemanlarının kesit ve donatı oranlarında azalmalara gidilebileceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme, Fiber takviyeli polimer (FRP), güçlendirme, çekme, sünek.

Effect of FRP Composite Used in Strengthening Reinforced Concrete Structures on Structural Performance

Abstract

In recent years, in post-earthquake studies on reinforced concrete (RC) structures, it has been observed that the conditions in reinforced concrete structure design are not considered. Much damage occurs in these structures due to different design errors and structural irregularities. Under the influence of earthquakes, severe damages occur in the RC building elements, especially in column-beam joints, as a result of large rotations occurring when the reinforcement passes the yield point. Nowadays, different strengthening works are carried out for these damaged structures. Along with developments in the construction industry, the idea of strengthening buildings has gained great importance to reinforce these damaged RC buildings with fiber reinforced polymer (FRP) composites. These composites have high tensile strength, exhibit ductile behavior by absorbing high amounts of energy, and cause large displacements under earthquake conditions. In this study, the importance of FRP composites in RC building elements and their effects on engineering properties were investigated. It was observed that the importance of structural behaviors of these composites increases with the application of different techniques to using different parts of the building carrier systems. As a result, it is thought that by using FRP composites in reinforced works in building carrier systems in the construction sector, the economic life of the building can be increased, and the cross-section and reinforcement ratios of the building elements can be reduced.

Keywords: Reinforced concrete (RC), Fiber-Reinforced Polymer (FRP), strengthening, tensile, ductile.

* Sorumlu Yazar: murat.maras@inonu.edu.tr

1. Giriş

Fiber Takviyeli Polimer (FRP) kompozit malzemeler ilk olarak 1975 yılında Rusya'da FRP takviyeli donatı çubukları olarak kullanılmıştır (Hollaway, 2010). 1980'lerde Avrupa'da, köprü restorasyonlarının güçlendirme çalışmalarında bu kompozit malzemeler kullanılmıştır (Mugahed ve ark., 2018). Japonya'da, FRP 1990'lı yıllarda betonarme yapıların güçlendirilmesinde kullanılırken, Amerika Birleşik Devletleri'nde ise bu kompozitler yaklaşık son 25 yıldır güçlendirme çalışmalarında kullanılmaktadır (Nanni 2001, Teng ve ark., 2002). Son yıllarda ülkemizde mevcut yapıların iyileştirilmesi amacıyla, çevresel kaynaklı etkiler (deprem, sel, v.b) ve mevcut tasarım gereksinimlerini karşılama ihtiyacından dolayı FRP kompozitler yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (İlki ve ark., 2011, Lampros ve ark., 2019). Bu kompozitlerin avantajları (hafif olması, uygulama kolaylığı sağlaması, yüksek korozyon direnci ve daha az işçilik gerektirmesi vb.) (Arboleda ve ark., 2016) ve dezavantajları (yüksek maliyete sahip olması, yüksek sıcaklıklarda zayıf performans göstermesi ve ıslak yüzeylere uygulanamaması vb.) (Bournas ve ark., 2015) vardır. Mevcut avantaj ve dezavantajlar göz önüne alındığında, daha üstün özelliklerinden dolayı, son yıllarda FRP kullanımı inşaat sektöründe birçok araştırmacı tarafından güçlendirme çalışmalarında tercih edilmektedir (Kaproń ve Van Gemert 2013, Rasheed ve ark., 2018, Hawileh ve ark., 2019).

Yüksek performanslı FRP malzemeleri yük direncinin yanı sıra, mevcut yapısal elemanları geri kazanmak amacıyla yapı taşıyıcı elemanlara da uygulanmaktadır (Junaid ve ark., 2020). Bu malzemeler özellikle; kirişlerin, döşemelerin, kolonların ve duvar yapı elemanlarının eğilme ve kayma direncine karşı kullanılmaktadır (Maranan, 2016). FRP'ler genelde karbon (CFRP), aramid (AFRP) ve cam (GFRP) takviyeli polimer malzemelerden elde edilmektedir. CFRP, çok yüksek çekme mukavemetine sahip olması nedeniyle, güçlendirme çalışmalarında geniş kullanıma sahiptir. Bu malzeme geleneksel çelik malzemeden 5 kat daha hafif olup, gerilme dayanımı ise 8-10 kat daha fazladır (Garcia ve ark., 2014). CFRP, GFRP ve AFRP kompozit malzemelerin birim ağırlığı sırasıyla 1,5-1,6 g/cm³, 1,2-2,1 g/cm³ ve 1,2-1,5 g/cm³ arasında değişmektedir (Siddika ve ark., 2019). Bu malzemelerin geleneksel tekniklere göre oldukça hızlı ve kolay uygulanması ve yüksek çekme mukavemetine sahip olmaları nedeniyle güçlendirme alanında kullanımları giderek artmaktadır (İlki ve Kumbasar, 2002). FRP'ler güçlendirme çalışmalarında betonarme eleman kesitlerin dayanım kaybına uğramadan ulaşabileceği şekil değiştirme düzeyini artırmış ve bu özelliğiyle enerji yutma kapasitesini geliştirdiği görülmüştür (Camata ve Soudki 2004, El-Hacha ve ark., 2013).

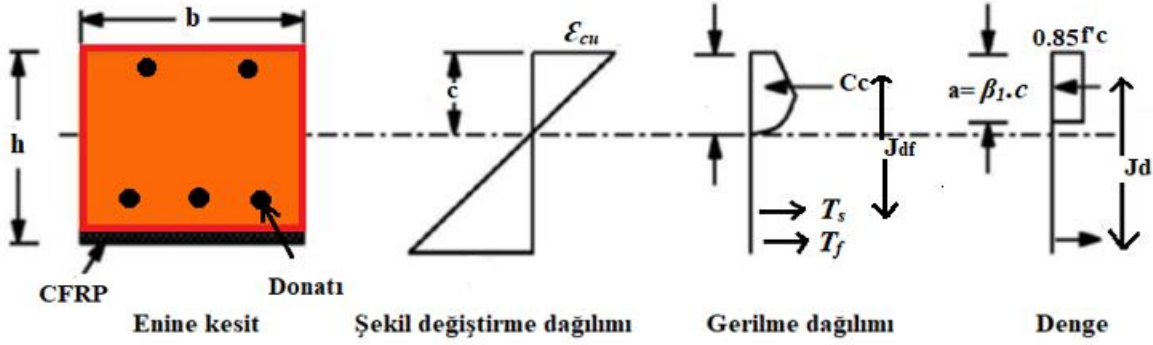
Bu çalışmada, FRP kompozitlerin güçlendirme çalışmalarında yapı elemanlarındaki mekanik özellikleri nasıl etkilediği çok sayıda literatür çalışması göz önüne alınarak incelenmiştir. Ayrıca, bu kompozitlerin inşaat mühendisliği uygulamalarındaki gelişimi ve bu gelişmelerin betonarme elemanların yapısal performansına etkisi sunulmuştur. Bu çalışmada, kompozit üretiminde FRP kullanımının önemi, farklı türleri, uygulama şekilleri ve hasar biçimleri betonarme yapı elemanları üzerinde etkisi hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

2. FRP Kullanımının Yapısal Davranışa Etkisi

Ülkemizde, son yıllarda deprem sonrası hasar tespitlerinde betonarme yapıların deprem yönetmeliklerine uyulmadan inşaa edildiği, yapılan birçok çalışmada (Dogangün 2004, Celep ve ark., 2011, Baran ve Tankut 2011) belirtilmiştir. Bu yapılarda geçmişte yaşanan depremler sonrası yapılan incelemelerde, birçok ağır hasar ve göçmeler meydana gelmiştir. Betonarme binalarda genellikle kötü işçilik ve yapım hatalarından kaynaklı hasarlar gözlenmiştir (Erberik 2008). Bu tür yapıların taşıyıcı sistemlerinde; yetersiz etriye kullanımı, kısa kolon, güçlü kiriş-zayıf kolon gibi birçok düzensizlikten dolayı ağır hasarlar meydana gelmiştir (Dazio ve ark., 2008). Depreme maruz kalmış bu yapı elemanlarında, özellikle birleşim bölgelerine yakın kısımlarda, kesitlerin çekme bölgesinde donatı akma noktasını geçerek plastik mafsallar oluşmuştur (Laura ve ark., 2014). Ayrıca, yanal yük etkisinde betonarme dolgu duvar elemanları kullanılmadan üretilen çerçeve sistemlerde ise, ciddi oranda dayanım ve yanal rijitlik değerlerinde azalmalar olduğu görülmüştür (Anil ve Altın, 2017). Yapının deprem davranışına olumlu katkısı bulunan bu dolgu duvarlı çerçeve sistemlerin, mevcut yapı elemanlarının FRP güçlendirme yöntemleriyle ideal betonarme perdeli sistem davranışına yaklaştırdığı gözlenmiş olup, son yıllarda da bu malzemelerin kullanımı popülerlik kazanmıştır (Asteris ve ark., 2011).

FRP malzemelerin yüksek eğilme, kayma ve çekme mukavemetleri gibi mekanik özelliklerinden dolayı, güçlendirme çalışmalarındaki yapısal davranışları oldukça önemlidir (Zarringol, 2016). Bu malzemelerin uygulamalarında genellikle epoksi ve polyester esaslı yapıştırıcılar kullanılır (Ammar, 2014). Epoksi esaslı kompozitlerin dayanımları, polyester bazlı kompozitlerin dayanımından daha fazladır (Dhawan ve ark., 2013). Şekil 1'de dikdörtgen kesitli betonarme kiriş elemanın FRP kompozit malzeme kullanılarak güçlendirilen kiriş numunesinin yapısal davranışı (enine kesiti, gerilme ve şekil değiştirme dağılımı) detaylı olarak gösterilmiştir (Tarigan ve ark., 2019). Eğilme yükü altında parabolik gerilme dağılımının hesaplanmasında, betonarme elemanlarda çekme kuvvetlerini karşılayan bu FRP kompozitler, oldukça büyük öneme sahip olduğu da yapılan teorik hesaplamalarla gözlenmiştir. Bu yapı elemanlarında farklı yükler altında özellikle yetersiz etriye kullanılmasından dolayı; düşük çekme dayanımı, düşük tokluk değerleri elde edilmekte ve bu elemanlar gevrek özelliğe sahip davranışlar sergilemektedirler. FRP ile güçlendirilen yapı elemanları ise, sünek kırılma davranışı göstererek, hasar oluşumları engellenmiş ve böylece bu elemanların sismik yükler altında yapısal davranışı gelişmiştir. Ayrıca, bu kompozitler, plastik şekil değiştirme esnasında, birçok kılcak çatlak oluşmasını engellemiş ve ilk çatlak oluşumundan sonra yük taşıma kapasitesi artarak şekil değiştirmeye devam etmiştir (Gu ve ark., 2012).

Denklem (3) çift donatılı bir betonarme kiriş için denge denklemi olarak kullanılmaktadır. Denklem (4)'e göre, FRP kompozit malzemelerin eğilme kapasitesine katkısı $A_{sf} \cdot f_{yf} \cdot j_{df}$ olarak ifade edilmiştir. Bu nedenle, FRP kompozitleri eklenerek betonarme kirişlerin eğilme kapasitesinin artacağı görülmektedir.



Şekil 1. FRP malzemelerinin betonarme kesitinde gerilme-şekil değiştirme dağılımı

$$T_f = A_{sf} \cdot f_{yf} \quad (1)$$

$$C_c = T_s + T_f \quad (2)$$

$$0,85 f'c \cdot a \cdot b = A_s \cdot f_y + A_{sf} \cdot f_{yf} \quad (3)$$

$$M_n = A_s \cdot f_y \cdot j_d + A_{sf} \cdot f_{yf} \cdot j_{df} \quad (4)$$

Burada, T_f : FRP çekme dayanımı (N); T_s : donatının çekme dayanımı(N); J_d : C_c ile T_s arasındaki mesafe; A_{sf} : FRP alanı

3. Fiber Takviyeli Polimer

3.1. FRP türleri

FRP kumaşlar güçlendirme alanında en sık kullanılan fiber polimer kompozit türü olan lif katmanlarının bir araya getirilmesiyle oluşur (Dindar, 2020). Her katmanda farklı doğrultularda dizilerek farklı fiziksel ve mekanik özelliklerle tek ve çift yönlü olarak elde edilirler. Tek yönlü fiberler "anizotropik" olarak adlandırılırlar. Çift doğrultulu düzlem şeklindeki fiberler ise, her açıda farklı mukavemet gösterirler (Ozkul ve Yıldırım, 2000). Üç boyutlu olarak dizilen fiberler ise "izotropik" olarak adlandırılırlar. Fakat tek yönlü olanlara göre dayanımları daha düşüktür (Liu ve ark., 2010). İnşaat sektöründe kullanılan pultrüzyon tekniği ile üretilen Karbon elyaf (CFRP üretmek için), cam elyaf (GFRP üretmek için), bazalt elyaf (BFRP üretmek için), aramid elyaf (AFRP üretmek için) ve hibrit elyaf (HFRP üretmek için) olmak üzere beş farklı FRP kompozit takviyesi bulunmaktadır (Sahu, 2014). Şekil 2'de FRP türleri detaylı olarak verilmiştir.

3.1.1. CFRP

Karbon fiberlerin çapları 5 ila 10 μ m arasında sınırlıdır. Bu lifler, kristal düzenlemede yüksek mukavemet/hacim oranı göz önüne alındığında, her iki kristalde de bağlanan ve liflerin uzun eksenine paralel olarak daha az veya daha fazla hizalanan karbon atomlarından oluşur (Meier, 2012). CFRP, son derece hafif ve güçlü bir FRP kompozit malzeme türüdür. Bu kompozit son derece yüksek gerilme mukavemetine sahiptir ve ayrıca çeliğe benzer şekilde ultra sünek bir davranış gösterir (Dindar, 2020). Bu malzemeler en yüksek çekme dayanımına ve güçlendirmelerde geniş kullanım alanına sahip olan kompozitlerdir (Zhou ve ark., 2010).

3.1.2. GFRP

Cam elyafı olarak da bilinen GFRP, genellikle kompozit olarak ağırlıkça %0,5–2,0 oranında fibreglas kullanılan takviyeli plastik kompozit malzemedir (Lubin, 1975). GFRP, bir tür plastik bileşiktir. GFRP'nin mekanik özellikleri lif tipi, lif içeriği ve lif ile matris arasındaki bağ ile değişmektedir (Cabral, 2005). GFRP yüksek mukavemete sahiptir ve ayrıca; mükemmel ısı yalıtımı, yüksek ısı direnci ve düşük maliyete sahip olma özelliğiyle köprülerde, tarihi yapılar ve betonarme yapı elemanlarında güçlendirme malzemesi olarak kullanılmaktadır (Dindar, 2020). GFRP, bu malzemeler içerisinde en düşük maliyetli olanıdır. Bu sebeple çokça tercih edilir (Brothers, 2001).

3.1.3. AFRP

Aramid elyaflar yapay yüksek performanslı, orta derecede sert polimer zincirler ile üretilmiş ve ısıya dayanıklı olarak sınıflandırılmış, güçlü sentetik elyaflardır (Ammar, 2014). AFRP ise, lif hizalama yönüne ve yüksek yüke bakılmaksızın düşük basınç dayanımı göstermesi nedeniyle popüler bir yapısal malzeme değildir (Davies ve ark., 2010). Aramid elyaf, genelde savunma ve otomotiv sanayisinde etkili bir şekilde dayanıklı kumaşlar olarak kullanılır (Palmieri ve ark., 2012). Alkali ortamlara yüksek sülfat direnci göstermesi nedeniyle, CFRP takviye malzemelerinden daha fazla tercih edilir. AFRP son derece düşük basınç dayanımına ve yüksek gerilme dayanımına sahip olduğundan, genelde hafif yapılarda güçlendirme olarak kullanılır (Nakayama ve ark., 2008).

3.1.4. BFRP

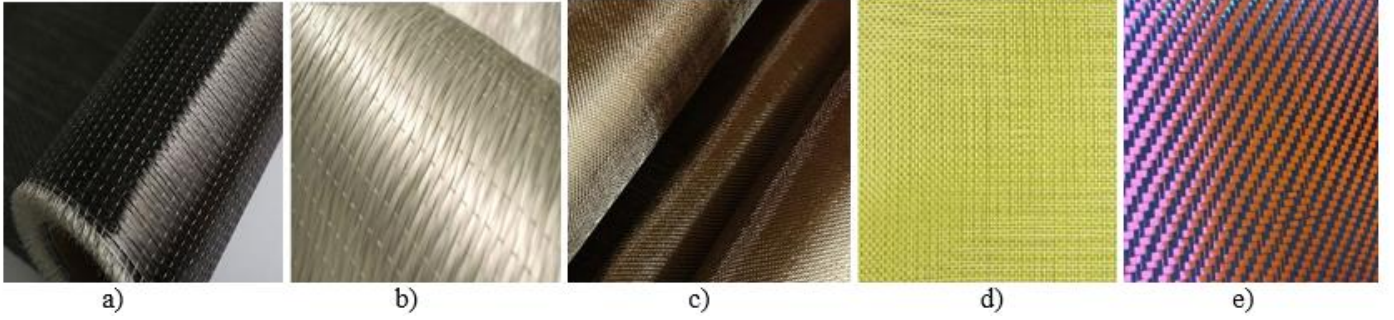
Bazalt lifleri, ince liflerden yapılmış kompozit malzemelerdir. Çapı yaklaşık 10 ile 20 μ m arasındadır. BFRP, inşaat sektörü için yeni kompozit malzeme olarak tasarlanan alternatif polimerik kompozittir (Sarasini ve ark., 2014). Bu kompozit, sertlik, mukavemet, matris oluşumu ve geliştirmeye yardımcı olur, ayrıca termal iletkenlik, ısıya, korozyona, kimyasal ve fiziksel dirence karşı da, oldukça dayanıklıdır.

GFRP'den farklı olarak, BFRP'nin üretici kapasitesi yetersizliği nedeniyle maliyeti daha yüksektir (Banibayat ve Patnaik, 2013).

3.1.5. HFRP

Hibrit fiber takviyeli polimer (HFRP) tek bir matris içinde iki veya daha fazla takviye edici polimer lif türü ile üretilen kompozit malzemelerdir. Yüksek modüllü lif esaslı kompozit malzemelerin, düşük modüllü olanlara göre sertlik ve yük taşıma kapasite özellikleri daha iyi olup ancak maliyet bakımından ekonomik değildir. Benzer şekilde Yang ve ark., (2013) tarafından yapılan çalışmada, bu kompozitlerin üretiminde daha

düşük bir maliyetle yüksek dayanıma sahip kompozit üretilmesi hedeflenmiştir. Bu FRP polimer kompozitler, güçlendirme alanında en fazla geliştirilmiş malzemelerdir, çünkü dayanımları genellikle aynı malzemenin büyük hacimli formuna göre oldukça yüksektir (Zhang ve ark., 2007, Yıldız ve ark., 2019). CFRP ve BFRP elyaf kompozitler, AFRP ve GFRP elyaf kompozitlere göre daha çok dayanımına ve tokluğa sahiptirler (Lawler ve ark., 2005, Maalej ve ark., 2005). Tablo 1'de FRP türlerinin mekanik ve fiziksel özellikleri, Tablo 2'de ise bu özelliklerin detaylı olarak karşılaştırılması sunulmuştur.



Şekil 2. a) karbon elyaf (CFRP); b) cam elyaf (GFRP); c) bazalt elyaf (BFRP); d) aramid elyaf (AFRP); e) hibrit elyaf (HFRP)

Tablo 1. Değişik türdeki FRP tiplerinin mekanik ve fiziksel özellikleri

FRP türü	Birim hacim ağırlık ($g.m^{-3}$)	FRP kalınlık (mm)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Kopma miktarı (%)
BFRP[Ammar, 2014]	1500	-	1350	52	2,80
CFRP[Ammar, 2014]	1600	-	3600	580	1,90
BFRP[Banibayat v.d., 2013]	-	-	1100	70	2,20
HFRP[Gribniak v.d., 2017]	-	1,60	400	28	2,10
HFRP[Gribniak v.d., 2017]	-	1,60	218	28	0,85
CFRP[Koutas v.d., 2013]	200	0,115	3790	230	25,6
GFRP[Koutas v.d., 2013]	915	0,36	3240	72,4	-
CFRP[Al-Saidy v.d., 2010]	340	0,45	1548	89	1,74
CFRP[Adhikari v.d., 2009]	-	-	2068	124	1,70
GFRP[Adhikari v.d., 2009]	-	-	710	46,4	1,50
AFRP[Adhikari v.d., 2009]	1440	-	2800	123	2,00

Tablo 2. FRP kompozitlerinin tasarımındaki özelliklerinin karşılaştırması

FRP kriterleri	FRP Türleri				
	CFRP	GFRP	AFRP	BFRP	HFRP
Çekme dayanı	Çok iyi	Çok iyi	Çok iyi	İyi	Çok iyi
Basınç dayanımı	Çok iyi	Yetersiz	İyi	İyi	Çok iyi
Elastisite modülü	Çok iyi	İyi	Yeterli	İyi	Çok iyi
Süneklik	Çok iyi	İyi	Yeterli	İyi	Çok iyi
Kırılma	Mükemmel	İyi	Yeterli	Yeterli	Mükemmel
Yoğunluk	İyi	Mükemmel	Yeterli	Yeterli	İyi
Alkali direnci	Çok iyi	İyi	Yetersiz	Mükemmel	Çok iyi
Maliyet	Pahalı	Ucuz	Pahalı	Normal	Pahalı

3.2. Polimer matrisler (reçineler)

Reçineler fiberleri birbirine bağlayan plastik veya polimerlerle oluşturulan malzemelerdir. Bu malzemeler lifler arasında yük transferini sağlayarak oluşabilecek hasarlardan korur. FRP'de asıl taşıyıcı bu liflerdir, ama reçinenin önemi hiçbir zaman göz ardı edilmemelidir. Üretim sırasında reçine seçimi çok önemlidir, çünkü seçilen reçine kompozitlerin

özelliklerinde düşük sürtünme nedeniyle güçlendirmede kullanılmayacak ve termal dirençlerde termoplastik polimer olarak uygulanamayacaktır (Önal, 2014). Reçine, birçok FRP kompozitin etkileşim maddesidir ve matris olarak da bilinir. En tipik reçineler iki farklı türde olup, termoplastik ve termoset reçinelerdir, bu polimerler aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır (Daniel ve ark., 2019).

3.2.1. Termoplastikler

Termoplastikler, sentetik polimerlerin büyük bir kısmını oluşturan, belirli sıcaklıklarda yumuşayarak kolay olarak şekillendirilen ve defalarca sıcaklık değişimlerinden etkilenmeden yeniden şekil verilebilen yapı malzemeleridir (Çöğür, 2007).

3.2.2. Termosetler

Termosetler, genellikle çapraz bağlı molekül yapılarında meydana gelen polimerleşme sonucu, yumuşama sırasında ilk formlarını koruyarak belli bir sıcaklık derecesinden sonra erimeksizin karbonlaşmaya uğrayan ve ısı karşısında artık değişim göstermeyen plastik malzemelerdir. Termoset matris polimerler, düşük vizkoziteli ve düşük moleküler ağırlıklı sıvılardan oluşur (Lee ve ark., 2000).

Termoset reçineleri, gelişmiş mekanik ve fiziksel özelliklere sahiptirler. Polietilen, polivinil klorür, polipropilen ve poliüretan gibi termoplastikler termosetlere göre, üretimi daha pahalı ve çevreci ürünlerdir. Genel olarak reçineler, polimer, metal ve seramik malzemelerden oluşabilir. Lif türüne ve polimer matrisine bağlı olarak bu malzemelerin davranışı, mekanik özelliklerine göre Tablo 3'de, detaylı olarak verilmiştir (Nasser ve ark., 2019). Bu matrislere kolayca şekil verilebilir ve bu matrislerin priz alma süresi de oldukça hızlıdır. Epoksi, vinylester ve polyester malzemeleri, termoset matrisleri adı altında yer almaktadır.

3.2.2.1. Epoksi

Epoksi, temel yapışkan bileşenlerden veya kürlenmiş son ürünlerden üretilen termoset reçine türüdür. Genellikle temiz yüzeye uygulanır (Dindar, 2020). Ana epoksi türleri, glisidil olmayan ve glisidil epoksilerdir. Glisidil epoksi reçineleri, glisidil eter ve glisidil ester; glisidil olmayan epoksi reçineleri ise, sikloalifatik ve alifatik reçinelerdir (Din, 1994).

3.2.2.2. Vinylester

Vinylester, bir epoksi reçinesinin doyumsuz bir monokarboksilik asit ile esterleştirilmesiyle oluşturulan matriktir. Bu reçine çoğunlukla GFRP'nin yapılandırılmasında ve bazalt elyaf takviyeli polimer (BFRP) uygulamalarında kullanılır (Shokrieh ve Omid, 2009).

3.2.2.3. Polyester

Polyester, FRP kompozit endüstrilerinde en yaygın olarak kullanılan bir reçine türüdür. Daha ucuz olması, korozyona dayanıklı, hızlı kürlenir ve katalizör aşırılıklarına uygun olmasından dolayı, tercih edilmektedir (Chen ve ark., 2006). Ayrıca, polyester reçine esas olarak düşük maliyetli olması sebebiyle, GFRP kompozitlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Dindar, 2020).

Tablo 3. Termoset reçinelerin mekanik özellikleri

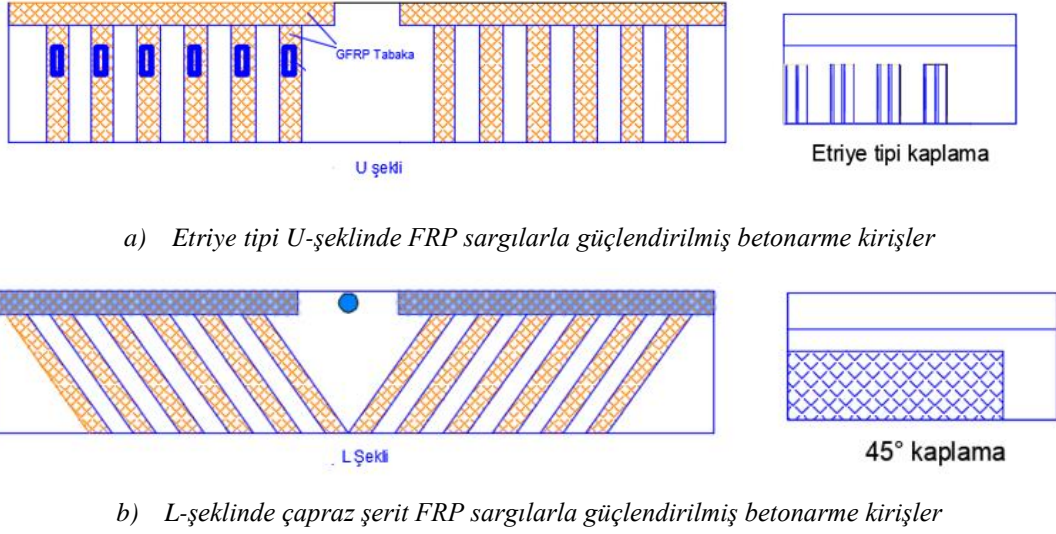
Termoset reçineleri	Özgül Ağırlık (g.cm ⁻³)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (GPa)	Kuruma büzülmesi (%)
Epoksi	1,2-1,3	55-130	2,75-4,1	1-5
Vinylester	73-81	1,12-1,32	3,0-3,35	5,4-10,3
Polyester	1,1-1,4	34,5-103,5	2,1-3,45	5-12

4. Yapısal Elemanlarda FRP Uygulama Şekilleri

4.1. Betonarme kiriş ve plaklarda yapısal güçlendirme

Betonarme yapı elemanlarında FRP kompozitler kullanılarak yapılan yapısal güçlendirme çalışmalarında, birçok farklı konfigürasyon ve bölgesel iyileştirme çalışmaları mevcuttur. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, Smith ve ark., (2011) son yıllarda FRP kompozitler kullanarak güçlendirilen betonarme kiriş ve levhalar gibi eğilme elemanlarının, yük altında davranışlarını incelemiştir. FRP kompozit malzemelerle sonradan güçlendirilen bu yapı elemanları, oldukça sünek davranış sergileyerek, deprem sırasında yüksek enerji yutma kapasitesi özelliği göstermektedir. Ayrıca, güçlendirme şeması gerçekçi geometrik kısıtlamalar göz önünde bulundurularak, betonarme kirişlerin eğilme ve kesme kapasitelerini geliştirmek için, farklı yönlerde ve bölgelerde delikler açılarak, FRP kompozit malzemeler laboratuvar ortamında güçlendirme elemanı olarak kullanılmıştır. Betonarme kirişler bu CFRP kumaşlarla, şerit bantlar şeklinde farklı açılarda sarılmıştır.

Yapılan güçlendirme çalışmaları sonucunda, dayanım değerlerinde %70 oranında artış gözlenmiş ve yüksek oranlarda tokluk özelliği göstermiştir. Ancak kirişler boyunca sabitleme olmaması nedeniyle, kiriş alt bölgelerinde bazı açılmalar meydana gelmiştir (Daniel ve ark., 2019). Diğer bir çalışmada Deng ve ark., (2004), kirişin serbest açıklığında üç katmanlı ve iki yönlü CFRP kompozitler yerleştirilmiş, kirişler boyunca sarılmış ve çapraz FRP kompozit plakalar kullanılarak sabitlenmiştir. Eğilme yükü altında, güçlendirilmiş örnekler için, kesme çatlaklarının azaldığı ve kirişte ağır hasarlar meydana gelmediği gözlenmiştir. Ayrıca yapılan diğer çalışmada Del Vecchio ve ark., (2014) ise, tam ölçekli kiriş elemanlarında mesnet bölgelerine yakın bölgelerde kesme çatlaklarını önlemek için, CFRP levhalar kullanılmış ve kaplama olarak ise, U şeklinde sargılarla güçlendirme çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda, eğilme yükü altında kiriş numunelerinin bu yükü absorbe ederek, sünek bir davranış sergilediği gözlenmiştir. Birçok araştırmacı (Yılmaz ve ark., 2002, Dong ve ark., 2013, Riyadh ve Kalfat, 2018) tarafından yapılan çalışmalarda, betonarme kirişlerde FRP kaplama biçimleri ve yönlerine göre fiber uygulama şekilleri Şekil 3'te gösterilmiştir.

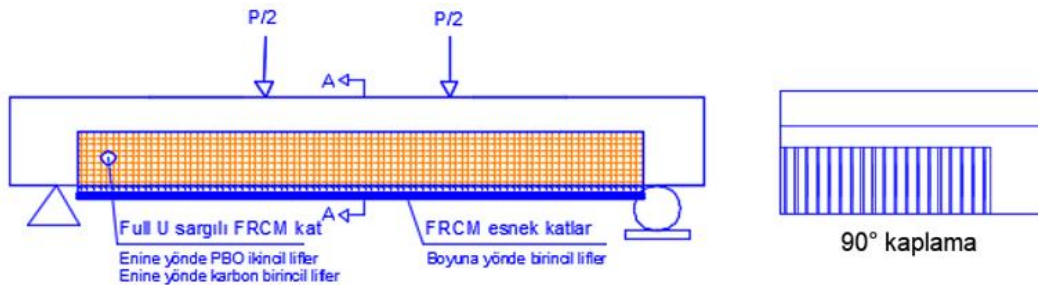


Şekil 3. Betonarme kirişlerde FRP kaplama biçimleri ve yönlerine göre fiber uygulama şekilleri (Yılmaz ve ark., 2002, Dong ve ark., 2013 Riadh ve Kalfat, 2018)

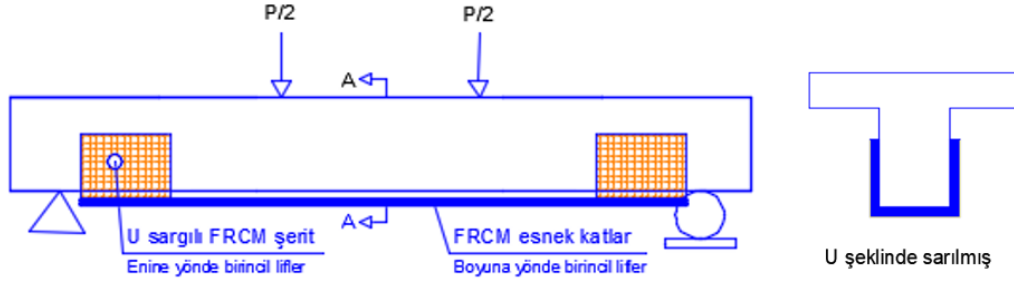
Yapılan deneysel çalışmalarda, uygulama biçimleri ve bölgeleriyle ilgili detaylı bilgiler verilmiştir. FRP kompozit malzemelerin hem pahalı olması hem de üretimi oldukça sınırlı olması nedeniyle, gerçek uygulamalarda tüm yüzey boyunca bu malzemenin kullanılması giderek azalmaktadır. Yapılan incelemeler sonucunda, özellikle mesnet bölgelerine yakın olan bölgelerde kesme çatlakları oluşmaktadır. L-şeklinde çapraz FRP şeritleriyle güçlendirilen betonarme kirişlerin bu kompozitler yardımıyla, oluşabilecek kesme çatlaklarını engellediği görülmektedir. Ayrıca, kiriş elemanlarda güçlendirme için kullanılan U-şeklinde şerit bantlar ise, etriye görevi görerek kesme çatlaklarının oluşmasını engellemektedir.

Yapılan laboratuvar çalışmalarında, dıştan yapıştırılmış CFRP veya GFRP plakaları kullanarak güçlendirilen betonarme kirişlerin eğilme kapasitesindeki artış, kontrol kirişine göre %41 ile %125 arasında olduğu görülmüştür. Ayrıca, kesme kapasitelerinde %31 ile %74 arasında artış gözlenmiştir (Dong ve ark., 2013). Ek olarak, korozyona maruz kalmış betonarme kirişler üzerinde

farklı kumaş takviyeli çimento esaslı matris (FRCM) kompozitler, farklı katmanlarda (iki, üç ve dört kat) ve bölgelerde olacak şekillerde güçlendirme çalışmaları yapılmıştır. Yapılan deney sonuçlarında, FRCM ile güçlendirilen kirişlerde, kontrol numunelere göre %7 ile %44 arasında dayanım artışı gözlenmiştir. Sonuç olarak, çimento takviyeli bu kompozitin mekanik özellikleri kumaş katmanlarına bağlanmasında ve aderansın artmasında önemli rol oynamıştır (Elghazy ve ark., 2017). Yapılan diğer çalışmada (Ariyachandra ve ark., 2017) CFRP kompozitlerle güçlendirilen betonarme kirişlerin eğilme yükü altında yapısal davranışı belirlenmiştir. Bu kirişlere orta ve mesnet bölgelerinde farklı yönlerde FRP uygulaması yapılmıştır. Sonuç olarak, tüm yüzey boyunca uygulanan CFRP kumaşları ortalama %42 oranında dayanım kazanımı sağlamıştır. Ayrıca, FRP kompozitlerin enine U sargılarının daha yüksek dayanım sağladığı belirtilmiştir. Betonarme kirişlerde FRP kaplama biçimleri ve yönlerine göre fiber uygulama şekilleri (Yılmaz ve ark., 2002, Elghazy ve ark., 2017, Ariyachandra ve ark., 2017) Şekil 4'te verilmiştir.



a) U-şeklinde tüm yüzey boyunca FRP sargılarla güçlendirilmiş betonarme kirişler



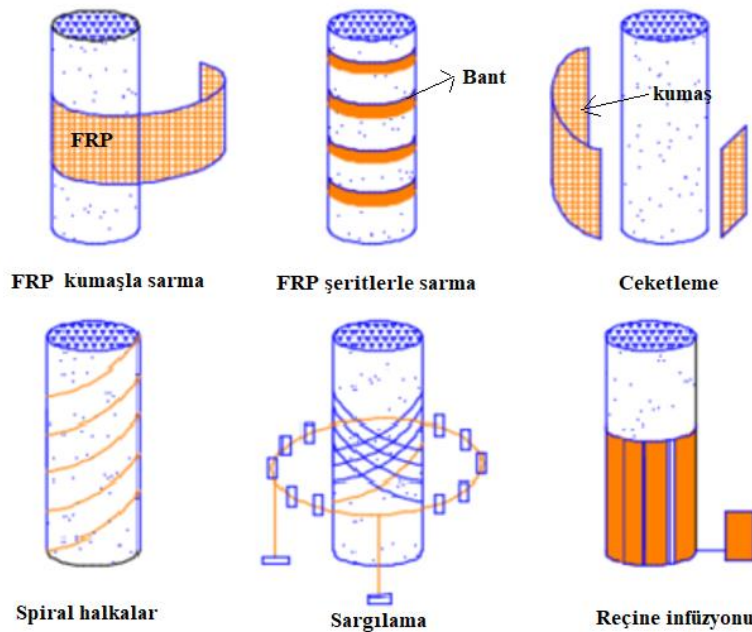
b) U-şeklinde mesnete yakın bölgelerde FRCM sargularla güçlendirilmiş betonarme kirişler

Şekil 4. Betonarme kirişlerde FRP kaplama biçimleri ve yönlerine göre fiber uygulama şekilleri (Yılmaz ve ark., 2002, Elghazy ve ark., 2017, Ariyachandra ve ark., 2017)

4.2. Betonarme kolonlarda yapısal güçlendirme

Hasar görmüş kolonun deprem etkisinde yük taşıma kapasitesinin artırılması için FRP kompozit sünek malzemeler oldukça önemlidir. Bu taşıyıcı elemanlarda kesme kuvvetini ve yatay yükleri enine donatı elemanları ve bu yapısal kompozitler karşılamaktadır (Celep ve Kumbasar, 2000). Günümüzde, düşey taşıyıcı elemanlar olan kolonların güçlendirilmesi için, lif takviyeli polimer (LP) kompozit malzemeler dış yüzeye yapıştırılarak uygulanmaktadır. Düşük özgül ağırlık, yüksek dayanım ve kolay uygulanabilir olma özellikleri sebebiyle bu malzemelerin, inşaat mühendisliğinin çeşitli alanlarında kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Yoshimura ve ark., (2000) yaptıkları çalışmada, kısa kolon numuneler üretmişlerdir ve bu numunelere farklı kat ve tipte lifli polimerlerle güçlendirmeler uygulamışlardır. Başeğmez (2007) tarafından yapılan deneyler sonucunda, karbon LP kompozitlerle güçlendirilen kısa kolonlarda, ani göçmeler ve mafsallı oluşumu gözlenmemiştir. Suleiman (1991) tarafından yapılan çalışmada, mantolanarak güçlendirilen betonarme kolonların aksenal yük ve tek eğrilikli eğilme altındaki davranışı ve dayanımını deneysel olarak incelenmiştir.

Beş deney elemanından üçü tersinir yük altında denenmiş ve daha sonra bu elemanlar mantolanarak tekrar deneye tabi tutulmuştur. Bu elemanlara ek olarak, iki adet hasarsız referans elemanı daha yüklemeye altındaki test edilmiştir. Deney numuneleri, dayanım, süneklik, enerji tüketimi ve rijitlik bakımından incelenmiştir. Sonuçta; mantolama yöntemiyle güçlendirilen elemanlar hem monotonik hem de tersinir yük altında referans alınan hasarsız elemanlar kadar iyi davranış göstermiştir. Onarılan elemanlarda ise, rijitlik ve dayanımlarda azalmalar görülmüştür. Şekil 5'te betonarme kolonlarda yapılan güçlendirme yöntemlerinin yeri ve uygulamaları detaylı olarak gösterilmiştir (Nicolae ve ark., 2008). Mevcut betonarme kolonların güçlendirilmesinde FRP kompozit kullanılarak, taşıyıcı elemanların yanal aksenal dayanımı, mukavemeti ve süneklik özelliği önemli ölçüde artırılmıştır. Gevrek malzemelerde görülen kırılma davranışları yerine, FRP kompozitleri sayesinde, aksenal yük altında daha sünek ve yüksek şekil değiştirme özelliği gösteren kolonlar elde edilmiştir.



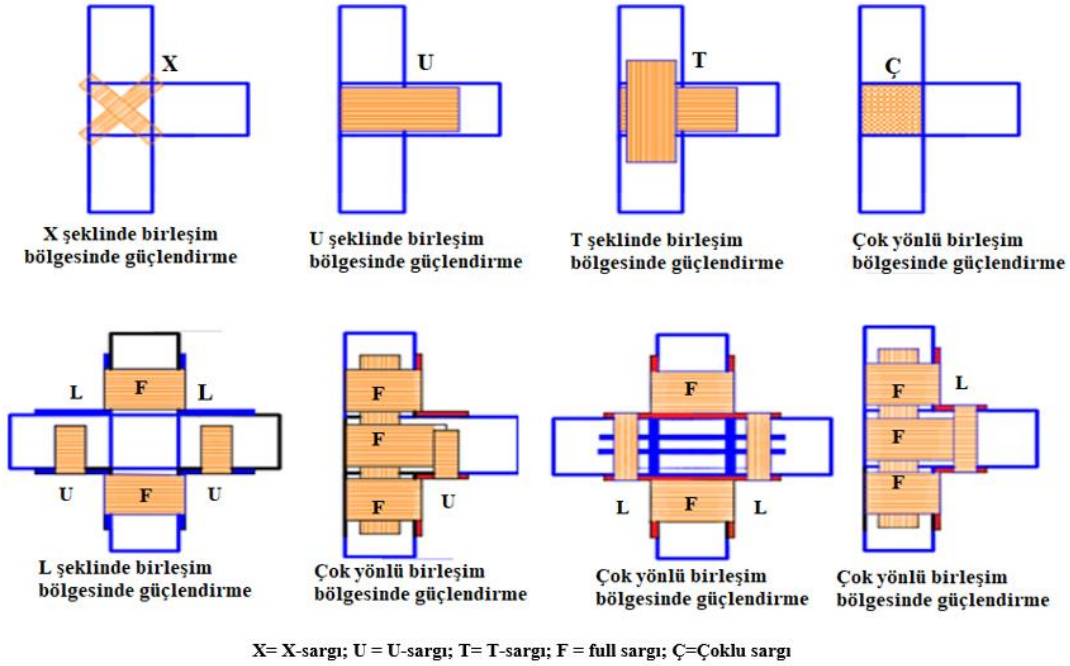
Şekil 5. Betonarme kolonlarda FRP uygulama şekilleri (Nicolae ve ark., 2008).

4.3. Kolon-Kiriş birleşim bölgelerinde yapısal güçlendirme

Betonarme yapılarda, kolon-kiriş birleşim bölgeleri depremlerde en çok hasara uğrayan ve güçlendirilmesi gereken bölgelerdir. Bu birleşim bölgelerinde, iki boyutlu FRP ile güçlendirme yöntemleriyle sargılama işlemleri uygulanan birçok çalışma (Daniel ve ark., 2019, Ghobarah ve Said, 2002) mevcuttur. Şekil 6 'da kolon-kiriş bölgesinde güçlendirme çalışmalarında önerilen dört farklı konfigürasyon uygulanmaktadır. Bu güçlendirme yöntemleri şu şekilde sıralanabilir:

- 1) U-şekilli FRP kullanarak güçlendirilen kolon-kiriş birleşim bölgesi
- 2) Derz üzerinde yatay ve düşey yönlerde FRP uygulayarak T-şekilli konfigürasyon;
- 3) X-şeklinde güçlendirilen birleşim bölgesi,
- 4) Çoklu konfigürasyonlarla iki veya dört eksenli FRP kompozitlerle güçlendirilen birleşim bölgeleri

Yapılan çalışmalarda, önerilen güçlendirme türleri, birçok araştırmacı tarafından detaylı olarak açıklanmıştır (Eslami ve Ronagh 2014, Elsanadedy ve ark., 2021). Bu deneylerden elde edilen ana gözlem U-şeklindeki konfigürasyonlar için, ankraj olmadan yapısal davranışta herhangi bir gelişme olmadığı gözlemlenmiştir (Ghobarah ve Said, 2002). Sabit bir şekilde ankrajla sabitlenmiş U-şekilli güçlendirmede ise +%99 oranında bir mukavemet artışı elde edilmiştir (Realfonzo ve ark., 2014). T-şekilli FRP ile güçlendirilen numunelerde de yüksek oranda dayanım artışı tespit edilmiştir (Antonopoulos, 2003). X-şekilli, U-şekilli ve T-şekilli güçlendirmeler karşılaştırıldığında, liflerin temel gerilim eksenine yönlendirilmesine rağmen, her üç durumda da, X-şekilli konfigürasyonda özellikle kesme kuvvetlerine karşı, oldukça önemli sonuçlar elde edilmiştir (Le-Trung ve ark., 2010). U-şekilli FRP-sargısı uygulamadan önce kiriş köşe kesitleri traşlanarak yuvarlatılmasıyla, bu kompozitlerin zarar görmesi engellenmiş ve daha yüksek dayanım artışı sağladığı gözlemlenmiştir (Hadi ve Tran, 2014). Şekil 6'da kolon-kiriş bölgeleri için farklı kombinasyonlarda ve yönlerde güçlendirme şemaları detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 6. Kolon-kiriş bölgeleri için güçlendirme şemaları (Daniel ve ark., 2019)

4.4. Betonarme yapılarda onarım ve güçlendirme tekniklerinin karşılaştırılması

Yapılan araştırmalar sonucunda, betonarme yapı elemanlarında farklı konfigürasyonlarda yapılan güçlendirme yöntemlerinin artış oranı Tablo 4'te detaylı olarak verilmiştir (Daniel ve ark., 2019). Güçlendirme çalışmalarında dört farklı; (a) X-şeklinde, (b) U-şeklinde, (c) T-şeklinde ve (d) çok eksenli güçlendirme yöntemlerinin sonuçları karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Çift yönlü GFRP tabakası olan "U" konfigürasyonu kullanıldığında, çelik plakalarla numuneler sabitlendiğinde, dayanım değerlerinde yüksek oranda artış olduğu görülmüştür. Ayrıca, süneklik yaklaşık olarak iki kat artmış, kesme çatlağı gözlemlenmemiş, sadece tek FRP tabakasının yırtılması ile

sınırlı kalmıştır (Ghobarah ve Said, 2002). Tüm FRP kombinasyonlarında, T şeklinde yapılan güçlendirme uygulamasında, düşey ve yatay eksen boyunca mafsal üzerine yerleştirilmiş ve kesme başarısızlığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, CFRP kompozit malzemeler, daha yüksek oranda kopma mukavemetinden dolayı, GFRP'ye kıyasla daha yüksek enerji dağılımı (+% 41) ve kayma mukavemeti (+% 45) elde edilmiştir. FRP katmanlarının sayısındaki artışın da dayanımı ve enerji dağılımını arttırdığı, ancak orantılı olmadığı belirlenmiştir. Sonuçlar, özellikle yatay tabaka sayısının iki katına çıkarılmasıyla, tek katmanlı FRP kompozit güçlendirmelerine kıyasla düşey yönde +% 15 oranında bir mukavemet artışı elde edilmiştir. Ayrıca, uygulanan eksenel yükün iki katına çıkarılmasıyla, yük kapasitesinin de artması sağlanmıştır (Daniel ve ark., 2019).

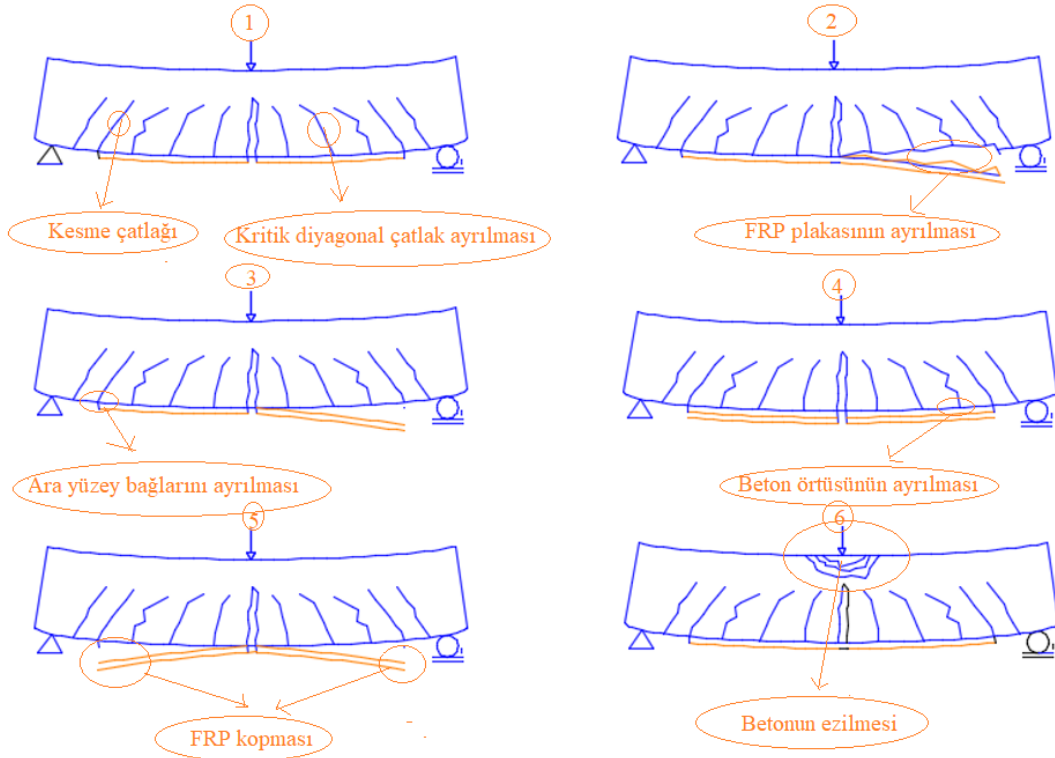
Tablo 4. Farklı konfigürasyonlarda FRP ile güçlendirilmiş yapısal elemanlardaki değişim

FRP tipi	U-şekil (%)	T-şekil (%)	X-şekil (%)	Çoklu-şekil (%)
CFRP[Ilki ve ark., 2011]	-	-	-	+18
FRP[Garcia ve ark., 2014]	+69	-	-	-
CFRP[Lee ve ark., 2000]	-	+36	-	-
FRP[Del Vecchio v.d., 2014]	-	-	-	+49
CFRP[Ghobarah ve Said, 2002]	+18	-	+11	-
CFRP[Elsanadedy v.d, 2021]	-	+32	+17	-
CFRP[Realfonzo ve ark., 2014]	+23	-	-	-
CFRP[Antonopoulos, 2003]	-	+41	-	-
FRP[D'Ayala v.d., 2003]	-	+17	+93	-
GFRP[Triantafillou, 1998]	-	+45	-	-
BFRP[Yu ve ark., 2016]	-	-	-	+11

4.5. Betonarme elemanlarda hasar modları ve çatlak modelleri

Betonarme yapı elemanlarında yetersiz etriye, güçlü kiriş-zayıf kolon, düşük beton dayanımı ve donatı yetersizliği gibi istenmeyen durumlardan dolayı birçok hasar oluşmaktadır. Hasarlı yapı elemanlarında güçlendirme çalışmaları oldukça büyük önem arz etmektedir. Güçlendirmenin etkinliği FRP ile güçlendirilmiş yapı elemanlarında hasar modları ve çatlak modelleri ile yansıtılabilir. Bu yapıların statik ve dinamik yüklemeye altında bu kompozitlerle sünek davranış göstererek yapının ayakta kalması sağlanır. Betonarme kirişlerde yüklemeye altında, hasar modları ve çatlak analizleri Şekil 7'de gösterilmiştir (Pham 2015, Gribniak ve ark., 2017, Siddika ve ark., 2019,).

Betonarme elemanların eğilme kapasitesini artırmak için, harici olarak yapıştırılmış FRP plakaları, kirişlerin alt bölgesine yerleştirilmiştir. Yüke maruz kalan kirişlerde önce FRP plakalar yırtılmakta olup, daha sonra FRP malzemelerin betondan ayrılmasıyla hasarlar oluşmuştur. FRP plakaların ayrılması genellikle eğilme veya maksimum moment bölgesi yakınındaki bölgede gerçekleşmekte olup, güçlendirilmiş elemanlarda FRP uzunluğu boyunca ilerleyerek devam etmiştir. FRP kopması kırılğan bir şekilde meydana gelebilirken, deneyler FRP ile güçlendirilmiş kirişlerin FRP bağ açma / kırılmasından sonra orijinal mukavemetini ve sünekliklerini sürdürdüğünü göstermiştir.



Şekil. 7. Eğilme altında FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin hasar modları (Pham 2015, Siddika ve ark., 2019)

5. Sonuç

Bu çalışma, yapılan diğer çalışmalar ışığında FRP kompozit malzemelerin güçlendirme alanında sağladığı avantajlardan dolayı mühendislik alanında önemli katkılar sunmaktadır. Yüksek çekme mukavemetine sahip bu kompozitler, özellikle deprem sırasında büyük deplasmanlar yaparak yüksek enerji ile birlikte sünek davranış göstermektedir. Ayrıca, bu kompozitlerin yapı taşıyıcı sistemlerinde farklı bölgelerde ve farklı tekniklerde kolayca uygulanması ve korozyon oluşturmaması nedeniyle de bu kompozitler yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonuç olarak, FRP kompozitlerin inşaat sektöründe yapı taşıyıcı sistemlerde güçlendirme çalışmalarında kullanılmasıyla birlikte, yapının ekonomik ömrünün arttırılabileceği ve güçlendirme yapı elemanlarının kesit ve donatı oranlarında azalmalara gidilebileceği düşünülmektedir.

Kaynakça

- Ahikari, S. (2009). Mechanical properties and flexural applications of basalt fiber reinforced polymer (BFRP) bars. M.Sc. thesis, Univ. of Akron, Akron, OH.
- Al-Saidy A.H., Al-Harthy A.S., Al-Jabri K.S., Abdul-Halim M., Al-Shidi N.M. (2010). Structural performance of corroded RC beams repaired with CFRP sheets, *Composite Structure*, 92, 1931-1938.
- Ammar M.A. (2014). Bond durability of basalt fibre-reinforced polymers (BFRP) bars under freeze-and-thaw conditions Ph.D thesis Dept. of Civil Engineering, Université Laval; p. 125.
- Anil Ö., Altın S. (2007). An experimental study on reinforced concrete partially infilled frames, *Engineering Structures*, 29, 449-460.
- Antonopoulos C. (2003). Seismic strengthening of RC beam-column joints with advanced composites, Analytical modeling and experimental verification fib Symposium on Concrete Structures in Seismic Regions.
- Arboleda D.F.G., Carozzi A., Nanni, Poggi C. (2016). Testing procedures for the uniaxial tensile characterization of fabric-reinforced cementitious matrix composites. *Journal of Composite Construction* 20 (3): 04015063.
- Ariyachandra M.R.E.F, Gamage J.C.P.H, Mahaidi R., Kalfat R. (2017). Effects of surface roughness and bond enhancing techniques on flexural performance of CFRP/concrete composites, *Composite Structures*, 180 (15), 994-1006.
- Asteris P.G., Kakaletsis D.J., Chrysostomou C.Z., Smyrou E.E. (2011). Failure Modes of In-filled Frames, *Electronic Journal of Structural Engineering*, 11 (1), 11-20.
- Banibayat P., Patnaik A. (2013). Creep rupture performance of basalt fiber-reinforced polymer bars, *Journal of Aerospace Engineering*, 28(3), 04014074.
- Baran M., Tankut T., (2011). Experimental Study on Seismic Strengthening of Reinforced Concrete Frames by Precast Concrete Panels, *ACI Structural Journal*, 108(2), 227-237.
- Başeğmez İ.H. (2007). Kesme Açısından Yetersiz Betonarme Kısa Kolonların Lifli Polimerler ile Depreme Karşı Güçlendirilmesi, *İTÜ Fen Bilimleri*, İstanbul.
- Bournas D.A., Pavese A., Tizani W. (2015). Tensile capacity of FRP anchors in connecting FRP and TRM sheets to concrete, *Engineering Structure*, 82 (1), 72–81.
- Brothers H. (2001). Glass fiber reinforced polymer (GFRP) rebar Aslan 100. Seward, Neb.
- Cabral F.S. (2005). Polymeric composite material reinforced with fibers used in civil engineering Features and application. LNEC, Lisbon, Portuguese: Scientific and technical information.
- Camata G., Spacone E., Al-Mahaidi R., Saouma V. (2004). Analysis of test specimens for cohesive near-bond failure of fiber-reinforced polymer-plated concrete, *Journal Composite Construction*, 8(6), 528–538.
- Celep Z. Kumbasar N. (2000). Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı, Rehber Matbaacılık, İstanbul.
- Celep Z., Erken A., Taskin B, Ilki A. (2011). Failures of masonry and concrete buildings during the March 8, 2010 Kovancılar and Palu (Elazığ) earthquakes in Turkey, *Engineering Failure Analysis*, 18(3), 868-889.
- Chen Y., Davalos J.F., Ray I. (2006). Durability prediction for GFRP reinforcing bars using short-term data of accelerated aging tests, *Journal Composite Construction*, 10(4), 279–86.
- Çöğürçü M.T. (2007). Yığma Yapıların Yatay Derz Güçlendirme Yöntemiyle Güçlendirilmesi Doktora Tezi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- D'Ayala D., Penford A., Valentini S. (2003). Use of FRP fabric for strengthening of reinforced concrete beam-column joints. In Proc., 10th Int. Conf. on Structural Faults and Repair. Edinburgh, UK: Engineering Technics Press.
- Daniel A. Pohoryles D., Jose M., Tiziana R., Humberto V. (2019). Seismic Retrofit Schemes with FRP for Deficient RC Beam–Column Joints: State-of-the-Art Review *Journal of Composites for Construction*, vol. 23.
- Davies P., Reaud Y., Dussud L., Woerther P. (2011). Mechanical behaviour of HMPE and aramid fibre ropes for deep sea handling operations. *Ocean Engineering*, (17), 2208–14.
- Dazio A., Buzzini D., Trüb M. (2008). Nonlinear cyclic behavior of hybrid fiber concrete structural walls, *Engineering Structures*, 30, 3141–50.
- Del Vecchio C., Di Ludovico M., Balsamo A., Prota A., Manfredi, G., Dolce, M. (2014). Experimental Investigation of Exterior RC Beam-Column Joints Retrofitted with FRP Systems, *Journal of Composites for Construction*, 18(4).
- Deng J., Lee M.M.K., Moy S.S.J. (2004). Stress analysis of steel beams reinforced with a bonded CFRP plate, *Composite Structure*, 65, 205-215.
- Dhawan V., Singh S., Singh I. (2013). Effect of Natural Fillers on Mechanical Properties of GFRP Composites, *Journal of Composites*, 792620.
- Din E. (1994). Adhesives. Determination of tensile lap-shear strength of bonded joint- 1465.
- Dindar B. (2020). Metal-Cam fiber/Epoksi/ÇDKNT Sandviç Panellerin Eğilme Davranışlarının Deneysel Olarak Araştırılması, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 249-253.

- Dogangün, A., (2004). Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl Earthquake in Turkey, *Engineering Structures* 26(6), 841-856.
- Dong J., Wang Q., Guan Z., (2013). Structural behaviour of RC beams with external flexural and flexural-shear strengthening by FRP sheets, *Composites Part B: Engineering*, 44(1), 604-612.
- Elghazy M., Refai A., Ebead U., Nanni A., (2017). Effect of corrosion damage on the flexural performance of RC beams strengthened with FRCM composites, *Composite Structures* 180(15), 994-1006.
- El-Hacha R., Soudki K., (2013). Pre-stressed near-surface mounted fibre reinforced polymer reinforcement for concrete structures. A review, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40, 1127-1139.
- Elsanadedy H.M., Al-Salloum Y.A., Alrubaidi M.A., Almusallam T.H., Siddiqui N.A., Abbas H., (2021). Upgrading of precast RC beam-column joints using innovative FRP/steel hybrid technique for progressive collapse prevention, *Construction and Building Materials*, 268, 121-130.
- Erberik M.A. (2008). Fragility-based assessment of typical mid-rise and low-rise RC buildings in Turkey, *Engineering Structure* 30(5), 1360-1374.
- Eslami A, Ronagh H, (2014). Experimental Investigation of an Appropriate Anchorage System for Flange-Bonded Carbon Fiber-Reinforced Polymers in Retrofitted RC Beam-Column Joints, *Journal of Composites for Construction*, 18(4), 04013056.
- Garcia R., Jemaa Y., Helal Y., Guadagnini M., Pilakoutas K., (2014). Seismic Strengthening of Severely Damaged Beam-Column RC Joints Using CFRP. *Journal of Composites for Construction*, 18(2), 04013048.
- Ghobarah, A., Said A. (2002). Shear strengthening of beam-column joints, *Engineering Structures*, 24(7), 881-888. 1052.
- Gribniak V., Tamulenas V., Ng P.L., Arnautov A.K., Gudonis E., Misiunaite I, (2017) Mechanical Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete Beams Bonded with External Carbon Fiber Sheets, *Materials (Basel)*, 10, 666. doi:10.3390/ma10060666.
- Gu D.S., Wu Y.F., Wu G., Wu Z.S., (2012). Plastic hinge analysis of FRP confined circular concrete columns. *Constructions and Building Materials*, 27(1), 223-233.
- Hadi M.N.S, Tran T.M, (2014). Retrofitting nonseismically detailed exterior beam-column joints using concrete covers together with CFRP jacket, *Construction and Building Materials*, 63, 161-173.
- Hawileh R.A., Nawaz W., Abdalla J.A., (2018). Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with Hardwire Steel-Fiber sheets, *Construction and Building Materials*, 172, 562-73.
- Hollaway L.C., (2010). A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2419-45.
- İlki A, Kumbasar N, (2002). Karbon Lif Takviyeli Polimer Kompozit Malzeme ile Betonarme Elemanlarının Onarım ve Güçlendirilmesi, *İMO Teknik Dergi*, 2598- 2616.
- Ilki, A., Bedirhanoglu, I., Kumbasar N, (2011). Behavior of FRP-Retrofitted Joints Built with Plain Bars and Low-Strength Concrete. *Journal of Composites for Construction*, 15(3), 312-326.
- Junaid M.T., Elbana A., Altoubat S, (2020). Flexural response of geopolymer and fiber reinforced geopolymer concrete beams reinforced with GFRP bars and strengthened using CFRP sheets, *Structures*, 24, 666-677.
- Kaproń M., Van Gemert D, (2013). Sustainable construction: challenges, contribution of polymers, research arena. *Restoration Building Monuments*, 19(2-3), 81-96.
- Koutas L., Triantafillou T.C, (2013). Use of anchors in shear strengthening of reinforced concrete T-beams with FRP, *Journal of Composite Construction*, 17 (1), 101-107.
- Lampros N.K., Zoi T., Dionysios A., Bournas, Thanasis C., Triantafillou T, (2019). Strengthening of Concrete Structures with Textile Reinforced Mortars: State-of-the-Art Review, *Journal of Composite Construction*, 23(1), 03118001.
- Laura I., Patrick P., Rami E., Jean P, (2014). Seismic behavior of synthetic fiber-reinforced circular columns, *ACI Materials Journal*, 111(1), 189-200.
- Lawler J., Zampini D, Shah S, Microfiber and macrofiber hybrid fiber-reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(5), 595-604.
- Lee C., Bonacci J., Thomas M., (2000). Accelerated Corrosion and Repair of Reinforced Concrete Columns Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheet, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27, 941-948.
- Le-Trung K., Lee K., Lee J., Lee D.H., Woo S, (2010). Experimental study of RC beam-column joints strengthened using CFRP composites, *Composites Part B: Engineering*, 41(1), 76-85.
- Liu H., Zhao X., Al-Mahaidi R, (2010). Effect of fatigue loading on bond strength between CFRP sheets and steel plates. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 10(01), 1-20.
- Lubin G, (1975). Handbook of fiberglass and advanced plastics composites. RE Krieger Publishing Company.
- Maalej M., Quek ST, Zhang J, (2005). Behaviour of hybrid-fiber engineered cementitious composites subjected to dynamic tensile loading and projectile impact. *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE*, 17(2), 143-152.
- Maranan G, (2016). Behavior of concentrically loaded geopolymer-concrete circular columns reinforced longitudinally and transversely with GFRP bars. *Engineering Structures*, 117, 422-36.
- Meier U, (2012). Carbon fiber reinforced polymer cables: why? Why not? What if? *Arabian Journal Science and Engineering*, 37(2), 399-411. William F. Powers advanced materials and processes, 38-41.
- Mugahed Y., Amrana H., Rayed A., Raizal S.M., Rashidd, Alabduljabbara H, Hunge CC, (2018). Properties and

- applications of FRP in strengthening RC structures: A review, *Structures*, 16, 208-238.
- Nakayama Y.H.N, Kanakubo T, (2008). Bond behavior between deformed aramid fiber-reinforced plastic reinforcement and concrete. The 14th WorldConference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Nanni A, (2001). North American design guidelines for concrete reinforcement and strengthening using FRP: Principles, applications and unresolved issues, *Proceedings, International Conference of FRP Composites in Civil Engineering*, Volume 1, Teng, J-G. (Ed.), ISBN 0-08-043945-4, 61–72.
- Nasser M.Z., Hawileh R.A., Abdalla J.A, (2019). Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review *Engineering Structures* vol. 198: 109542.
- Nicolae T, Gabriel O, Dorina I, Ioana E, Vlad M, Cătălin B, (2008). Fibre Reinforced Polymer Composites as Internal And External Reinforcements For Building Elements, *Buletinul Institutului Politehnic Din Iași Publicat De Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi” Din Iași Tomul LIV (LVIII), Fasc. 1.*
- Önal M.M, (2014). Strengthening reinforced concrete beams with CFRP and GFRP, *Advance Material Science Engineering*, 8, 967964.
- Ozkul H., Yıldırım H, (2000). Strengthening of Steel Reinforced Concrete Beams with FRP, *Second Japan-Turkey Workshop on Repair and Strengthening*.
- Palmieri A., Matthys S., Taerwe L, (2012). Experimental investigation on fire endurance of insulated concrete beams strengthened with near surface mounted FRP bar reinforcement, *Composite Part B Engineering*, 43(3), 885–95.
- Pham B, (2015). Design of FRP retrofitted concrete structures using AS5100 Part 8, *Concrete Institute of Australia Conference, and Melbourne, Victoria, Australia.*
- Rasheed H, Abdalla JA, Hawileh R., Al-Tamimi A, (2017). Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded Aluminum Alloy Plates. *Engineering Structures*, 147(15), 473–85.
- Realfonzo R., Napoli A, Pinilla J.G.R, (2014). Cyclic behavior of RC beam-column joints strengthened with FRP systems, *Construction and Building Materials*, 54, 282–297.
- Riadh A. M., Kalfat R, (2018). Rehabilitation of Concrete Structures with Fiber-Reinforced Polymer, ISBN: 9780128115114
- Sahu N.P, (2014). Study on aramid fibre and comparison with other composite materials, *International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 1:303–6.
- Sarasini F., Tirillò J., Ferrante L., Valente M., Valente T., Lampani L, (2014). Dropweight impact behaviour of woven hybrid basalt-carbon/epoxy composites, *Composite Part B Engineering*, 59, 204–20.
- Shokrieh M.M, Omidi M.J, (2009). Tension behavior of unidirectional glass/epoxy composites under different strain rates, *Composite Structures*, 88(4), 595–601.
- Siddika A., Mamun Abdullah A., Alyousef R., Amranc Y.H.M, (2019). Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites, *Journal of Building Engineering*, 25, 100798.
- Smith S.T., Hu S., Kim S.J., Seracino R, (2011). FRP-strengthened RC slabs anchored with FRP anchors, *Engineering Structures*, 33, 1075–1087.
- Suleiman R, (1991). Repair and Strengthening of Reinforced Concrete Columns, Ph. D. Thesis in Middle East Technical University, Ankara.
- Tarigan J., Pakpahan A., Surbakti M., Nursyamsi N, (2019). Analysis and experimental usage of CFRP wrap type on flexural strength of concrete beam, *MATEC Web of Conferences*, 258, 03001, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201922585803001>.
- Teng J.G., Chen J. F., Smith S. T., Lam L, (2002). FRP strengthened RC structures. *Front Physics*, 266.
- Triantafillou T.C, (1998). Shear strengthening of reinforced concrete beams using epoxy-bonded FRP composites *ACI Structural Journal*, 95 (2), 107-115.
- Yang Y., Liu J., Xiong G, (2013). Flexural behavior of wood beams strengthened with HFRP, *Construction and Building Materials*, 43, 118-124.
- Yıldız K., Gürkan İ., Turgut F., Cebeci H, (2019). KNT-Cam Fiber Takviyeli Kompozitlerin Kırılma Tokluğunun Birleşik Bir Güçlendirme Stratejisi ile İyileştirilmesi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 17, 1325-1333.
- Yılmaz K., Akçil M., Çelik A., (2002). Fiber Takviyeli Polimer Uygulamalarında Yapışma Yüzeyi Kalitesinin Kompozit Performansına Etkisi, *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 6, 2.
- Yoshimura K., Kikuchi K., Kuroki M, Ozawa K, Masuda Y, (2000). Experimental Study on Seismic Behavior of RC Short Columns Strengthened by Carbon Fiber Sheets. *Composite and Hybrid Structures: Proceedings of the 6th ASCCS International Conference on Steel-Concrete Composite Structures*, Los Angeles, California, 927-934.
- Yu, J., X. Shang, Z. Lu, (2016). Efficiency of externally bonded L-shaped FRP laminates in strengthening reinforced-concrete interior beam-column joints, *Journal of Composite Construction*, 20 (3), 04015064.
- Zarringol M, (2016). A comparative study on the efficiency of CFRP and GFRP in the improvement of compressive strength, acoustic impedance and bracing of filled and hollow concrete columns in different layers and ages, *Journal of Sustainable Development*, 9(5), 110.
- Zhang M.H., Sharif MSH, Lu G, (2007). Impact resistance of high-strength fiber reinforced concrete. *Magazine of Concrete Research*, 59(3), 199–210.
- Zhou J., Bi F., Wang Z., Zhang J, (2016). Experimental investigation of size effect on mechanical properties of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) confined concrete circular specimens, *Construction and Building Materials*, 127, 643–52.