

Fiber Takviyeli Polimer Donatılarının Kimyasal Ankraj Olarak Kullanımı

Alper Can HASBEK^{1*}, Özlem ÇALIŞKAN²

¹İnşaat Mühendisliği ABD. / Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye

²İnşaat Mühendisliği Bölümü / Mühendislik Fakültesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye

*achasbek@gmail.com

Özet – Yapıların güvenliği ve dayanıklılığı inşaat mühendisliğinin temel prensiplerindedir. Ancak birçok mevcut yapı çevresel etkiler, malzeme yorgunluğu ve günümüzün yönetmeliklerine uygun olmaması gibi sebeplerden dolayı onarım ve güçlendirme ihtiyacı duymaktadır. Onarım ve güçlendirme uygulamaları, yapıların hizmet ömrünü uzatmak, yapısal güvenliği artırmak ve ekonomik açıdan avantaj sağlamak amacıyla gerçekleştirilen mühendislik uygulamalarıdır. Gelişen teknoloji ve yapılan araştırmalar neticesinde, bu tür uygulamalarda kimyasal ankrajların kullanımı yaygın hale gelmiştir. Kimyasal ankraj, tasarım yüklerini betona aktarabilmek amacıyla ankraj donatısının yapıştırıcı malzeme ile betona sabitlenmesi işlemidir. Bu yöntemde, ankraj donatısına etki eden yüklerin, yapıştırıcı ve beton arasındaki aderans gerilmeleri ile karşılanması hedeflenmektedir. Bu bağlamda, kimyasal ankraj dayanımının; yapıştırıcının özellikleri, ankraj donatısının mekanik ve fiziksel özellikleri, beton kalitesi ve çevresel koşullara bağlı olduğu söylenebilir. Kimyasal ankraj uygulamalarında, ortam koşullarının olumsuz etkilerini minimize edebilmek amacıyla, korozyon dayanımı düşük olan çelik donatılar yerine; hafif, yüksek çekme dayanımına sahip, korozyona karşı dirençli, elektriksel yalıtımlı ve manyetik etkilerden minimum düzeyde etkilenen fiber takviyeli polimer (FRP) donatılar tercih edilebilmektedir. Bu çalışmada fiber takviyeli polimer donatılar ve kimyasal ankrajlar ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar derlenmiş; FRP donatılarının kimyasal ankraj uygulamalarında kullanımı, bu uygulamanın sağladığı avantajlar ve performans etkileri değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler – Kimyasal ankraj, fiber takviyeli polimer donatı, CFRP, GFRP, AFRP

I. GİRİŞ

Betonarme yapılar; uygulama aşamasında yetersiz donatı kullanımı, işçilikteki hatalar, proje aşamasında hesaba katılmayan ilave yüklerin oluşması, kullanım amacının değişmesi, yapıların kullanım sırasında tahrip edilmesi ve yangın, deprem gibi afetlerden dolayı onarım veya güçlendirme işlemlerine ihtiyaç duyarlar [1]. Onarım hasarlı bir yapının veya elemanlarının önceki haline getirilmesi için yapılan işlemler olarak, güçlendirme ise bir yapının taşıma kapasitesi, rijitliği, sünekliği gibi yapının taşıyıcı parametrelerini mevcut duruma veya mevcut durumdan daha iyi hale getirme işlemleri olarak tanımlanabilir [2]. Betonarme yapıların onarım ve güçlendirmesi işlemlerinde yeni betonarme elemanlarla mevcut betonarme elemanların birlikte çalışabilmesini sağlamak büyük önem taşıyan bir konudur. Beton ve donatının birlikte çalışabilmesi betonun donatıya tam olarak yapışması ile mümkündür. Donatının betondan sıyrılmaması için beton ile arasında yeterli yapışma olması sağlanarak çekme kuvvetlerinin yapışma işlemi ile dengelenmesi gerekmektedir. Donatının betona bağlanması işlemi ankraj olarak tanımlanmaktadır [3]. Ankraj işlemi mekanik ve kimyasal ankraj olmak üzere iki grupta incelenebilir. Sertleşmiş betona yapılan kimyasal ankrajlar; donatının boyutuna uygun olarak beton üzerine bir delik açılması ve donatı deliğe yerleştirildikten sonra delik yüzeyi ile donatı arasındaki boşluğu bağlayıcı kimyasal bir malzeme ile doldurarak gerçekleşir. Bağlayıcı malzemelere polimer, epoksi, vinilester esaslı yapıştırıcılar ve çimento esaslı döküm harçları örnek gösterilebilir [4]. Polimer teknolojisindeki gelişmeler ışığında daha yüksek performanslı yapıştırıcıların üretilmesi ile birlikte onarım ve güçlendirme işlemlerinde kimyasal ankraj

uygulamaları yaygın bir kullanıma ulaşmıştır. Kimyasal yapıştırıcılar ile yapılan ankrajların hızlı ve pratik olması maliyetlerin de düşmesine büyük oranda katkı sağlamaktadır [5]. İnşaat endüstrisinde olduğu gibi onarım ve güçlendirme uygulamalarında da kullanılan malzemelerin durabilitesi oldukça önem arz etmektedir ve bu yüzden akademik çalışmaların önemli bir konusu haline gelmiştir. Yapıların kullanım ömrünü etkileyen önemli bir problem de çelik donatıların korozyonudur. Nemli ortamlarda, suya maruz kalan yapılarda, işçilik hatalarından dolayı donatı çeliğinin tam örtülmediği gibi durumlarda korozyon çok önemli bir problem haline gelmektedir. Korozyonun risk teşkil ettiği durumlarda çelik donatılar yerine lif takviyeli polimer (FRP) donatılar çok önemli bir alternatif haline gelmiştir. FRP'ler korozyona karşı dayanıklı malzeme olmalarının yanı sıra yüksek çekme dayanımı göstermektedir. Ayrıca çelik donatılara göre hafif bir malzeme olması da FRP'lerin tercih edilme nedenleri arasında gösterilebilir [6].

II. KİMYASAL ANKRAJLARDA FİBER TAKVİYELİ POLİMERLERİN DONATI OLARAK KULLANIMI

1950'li yıllardan itibaren yaygınlık kazanmaya başlayan kompozit malzemeler genellikle organik bir reçine olan bir matris ve bu matrise gömülü elyaf (lif) olmak üzere iki bileşene sahiptir. Kompozit malzemelerde cam lifi, karbon elyafı ve aramid lifleri kullanımı yaygındır. FRP ürünlerinin mühendislik hizmetlerindeki kullanım amacı geleneksel inşaat malzemelerine göre daha yüksek performans elde ederek yapının ömrünün uzamasını sağlamaktır. Lif takviyeli polimer donatıların (FRP);

- Korozyona karşı dayanıklı olması,
- Düşük elektrik ve ısı iletkenliğine sahip olması,
- Yüksek çekme mukavemeti göstermesi,
- Hafif bir malzeme olması,
- Malzeme yorulmasına karşı yüksek direnç göstermesi,
- Bakım maliyetlerindeki potansiyel tasarruf gibi özellikleri, kimyasal ankrajlarda iyi bir alternatif olarak öne çıkarmaktadır [7].

Lif takviyeli polimer donatıların geleneksel çelik donatıya göre dezavantajları ise;

- Çekme gerilmesi altında kopmadan önce akma yapmaması,
- Liflerin doğrultusundan dolayı enine dayanımının düşük olması,
- Ultraviyole ışınlar ve radyasyona maruz kalma durumlarında kimyasal reçinelerin ve liflerin formunu koruyamaması,
- Yeterli beton paspayı bulunmayan durumlarda yangına karşı hassasiyet göstermeleri,
- Düşük elastisite modülü,
- Dayanımlarının lif doğrultusuna bağlı olarak değişim göstermesi,
- Yüksek maliyet olarak öne çıkmaktadır [8].

Yaygın kullanıma sahip aramid lif takviyeli polimer (AFRP) donatı, karbon lif takviyeli polimer (CFRP) donatı, cam lif takviyeli polimer (GFRP) donatı ile geleneksel çelik donatının çekme etkisi altındaki özellikleri Tablo 1'de verilmiştir [9].

Tablo 1 incelendiğinde geleneksel çelik donatılarda görülen kopma öncesi akma davranışı lif takviyeli polimer donatılarda görülmemektedir. Çelik donatıda akma gerçekleşip sünek davranış sergilerken lif takviyeli polimer donatılarda kopma akma olmaksızın gerçekleşir ve malzeme gevrek davranış sergiler. Ayrıca GFRP'nin elastisite modülünün çeliğin elastisite modülünden oldukça küçük olduğu görülmektedir. Bu durum aynı kesite sahip GFRP kullanılan betonarme elemanlarda çelik donatı kullanılan betonarme elemanlara göre daha büyük çatlaklar ve daha fazla sehimler oluşmasına sebep olur.

Tablo 1. Lif takviyeli polimer (FRP) donatılar ve çelik donatının çekme etkisi altında özellikleri ve donatıların tipik yoğunlukları (ACI 440.1R., 2006)

Parametre	Çelik	GFRP	CFRP	AFRP
Akma gerilmesi (MPa)	276 ~ 517	Akma yok	Akma yok	Akma yok
Çekme dayanımı (MPa)	483 ~ 690	483 ~ 1600	600 ~ 3690	1720 ~ 2540
Elastisite modülü (MPa)	200000	35000 ~ 51000	120000 ~ 580000	41000 ~ 125000
Akma Şekil değiştirme (%)	0.14~0.25	Akma yok	Akma yok	Akma yok
Kopma Şekil Değiştirme (%)	6 ~ 12	1.2 ~ 3.1	0.5 ~ 1.7	1.9 ~ 4.4
Yoğunluk (gr/cm ³)	7.9	1.25 ~ 2.1	1.5 ~ 1.6	1.25 ~ 1.4

A. Aramid lif takviyeli polimerler (AFRP)

Aramidler 1960'ların başında endüstriyel olarak bilim mühendislik ve uygulama araştırmalarının konusu olmaya başlamıştır. Aramid lifleri, düşük yoğunluk, yüksek uzama ve yüksek mukavemet kombinasyonuna sahiptir. Bu kombinasyon aramidlerin darbeye dayanıklı bir lif türü olmasını sağlamaktadır. Öte yandan, aramidin basınç dayanımının zayıf olması ve neme karşı cam ve karbon liflere göre daha duyarlı olması dezavantajlarıdır. Bu nedenle AFRP çubuklar vinilester reçinesi ile emprenye edilmiş aramid lif demetlerinden oluşmaktadır [10]. Şekil 1'de AFRP donatı gösterilmiştir [11].



Şekil 1. AFRP donatı [11]

AFRP donatılar betonarme yapılar için donatı çubukları, kirişlerin, plak ve duvarların dıştan güçlendirilmesi uygulamalarında levha olarak, kolonların sarılması için sargı ve kabuk gibi çeşitli şekillerde üretilebilir [12]. AFRP donatılarla takviye edilen yüksek dayanımlı betonarme kiriş ile çelik takviyeli kirişlerin eğilme testi sonuçları karşılaştırıldığında; çatlama öncesi AFRP donatılı kirişler ile çelik donatılı kirişlerin rijitlik açısından benzer davranış gösterdiği, çatlama sonrası bölgede herhangi bir yük seviyesinde AFRP donatılı kirişlerde sehim ve çatlak genişliklerinin çelik donatılı kirişlerin verdiği değerlere göre birkaç kat daha yüksek çıktığı görülmüştür. Daha esnek hale gelen AFRP donatılarla takviye edilen kirişlerin dikey çatlaklar gösterdiği ve olağandışı bir eğilme-kesme modunda başarısız olabileceği tespit edilmiştir [13].

B. Karbon lif takviyeli polimerler (CFRP)

Karbon lif takviyeli polimer malzemelerin özellikleri hem karbon liflerine hem de onları bir arada tutan polimer matrislere bağlıdır. Epoksi matrisi lifler arasındaki gerilimi aktarmada ve çevresel bozulmalara karşı direnç göstermesinde önemli rol oynamaktadır [14]. Çekme dayanımları yüksektir ve taşıdığı yüke

oranla kesit olarak daha az yer kaplarlar. CFRP donatılarının hafif, manyetik olmama ve korozyona karşı dayanıklı olma özellikleri betonarme yapıların rijitliğini ve sürekliliğini korumada fayda sağlamaktadır [15]. Karbon lif takviyeli polimer donatılar akma davranışı göstermemektedir. Kopma dayanımına geldiğinde ani kırılma davranışı gösterirler. CFRP'lerin ani kırılma davranışı geleneksel çelik donatılara göre dezavantajı olarak değerlendirilebilir [16]. CFRP'lerin gerçek dayanımı ile teorik hesaplamalar arasında hala büyük farklar mevcuttur. Bu temel sorunun çözümü için en önemli faktör uygun ara yüzey optimizasyonu olarak belirtilmiştir. Ara yüzey, matris ve lif arasındaki yük transferini ve yayılımını doğrudan etkiler. Dolayısıyla kompozitlerin mukavemetini ve tokluğunu belirler [17]. Karbon fiberler düzensiz bir iç yapıya sahiptir ve düşük yüzey enerjisine sahiptir. Dolayısıyla karbon fiberlerin reçine ile arasındaki ara yüzey performansı zayıftır. Bu durum CFRP'nin kullanım alanlarını önemli ölçüde kısıtlamaktadır [18]. Şekil 2'de CFRP donatı ve CFRP sargısı gösterilmiştir [19].



Şekil 2. CFRP donatı ve CFRP sargısı [19]

C. Cam lif takviyeli polimerler (GFRP)

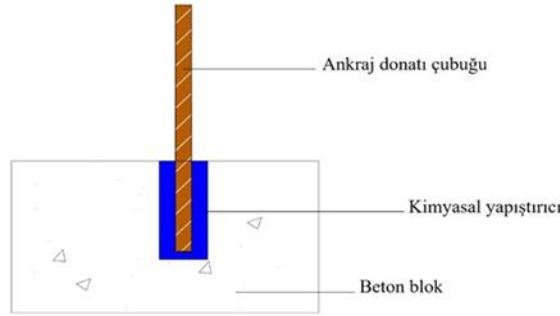
Karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) ve cam fiber takviyeli polimer (GFRP) kompozit malzemeler, yüksek mukavemet ve düşük özgül ağırlık özellikleri ile geleneksel malzemelerin yerini giderek daha fazla almaktadır. Özelleştirilmiş mukavemet özellikleri ve çeşitli kombinasyonlarda üretilebilir olmaları, ayrıca yüksek yorulma direnci, yüksek sıcaklıkta aşınma ve oksidasyon direnci gibi yetenekleri, bu malzemeleri mühendislik uygulamalarında iyi bir seçenek haline getirmektedir [20]. Cam lif takviyeli polimer (GFRP) donatılar, karbon lif takviyeli polimere (CFRP) kıyasla daha düşük maliyetli olmaları nedeniyle köprüler ve diğer beton yapılarında giderek daha fazla kullanılmaktadır [21]. Lif takviyeli polimerlerin betonun içinde donatı olarak kullanılmasındaki en kritik sorunlardan biri de aderans dayanımıdır. GFRP donatı çapı arttıkça aderans dayanımının arttığı, betonun basınç dayanımındaki artışın da aderans dayanımını olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Ayrıca sıcaklık artışının GFRP donatı ile beton arasındaki aderansı olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir [22]. Cam lif takviyeli polimerler kesme kuvvetlerini karşılamak amacı ile etriye olarak da kullanılabilir. Betonarme kirişlerde etriye olarak kullanımı üzerine yapılan deneysel çalışmada GFRP etriyelerin kesme dayanımı takviyesinde etkili bir fayda sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca nervürlü-kumlu yüzey özelliklere sahip GFRP donatı kullanılarak elde edilen etriyeli kirişlerin, kumlanmamış GFRP nervürlü kirişlere kıyasla beton ile daha iyi bir aderans sağladığı ve kesme dayanımında %10 civarında ilave iyileşme sağladığı tespit edilmiştir [23]. GFRP'ler korozyona karşı iyi bir malzeme davranışı sergilese de dış ortamdan etkilenmektedir. Farklı pH değerlerinde yapılan deneylerde 75 gün boyunca asitli ortamda bırakılan GFRP donatı numunelerinin musluk suyu ortamında %11, pH = 2 ortamında %22, pH = 3 ortamında %17.2 ve pH = 4 ortamında %14 oranında bağ mukavemet değeri kaybettiği gözlenmiştir. Çelik donatılarda ise pH = 2 ortamında %19.6 ve pH = 3 ortamında %12.3 oranında bağ mukavemet değeri kaybı görülmüştür. Bu deney sonuçlarına göre aynı asidik ortamdan çelik donatıların daha fazla etkilendiği, bağ mukavemet dayanımlarının daha çok azaldığı gözlemlenmiştir. Çelik donatılarda asit etkisi daha fazla tesir etmiştir [24]. Şekil 3'te kumla kaplı ve nervürlü GFRP donatısı gösterilmiştir [25].



Şekil 3. (a) Kumla kaplı GFRP donatısı (b) Nervürlü GFRP donatısı [25]

III. KİMYASAL ANKRAJ DAYANIMINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Donatıların çekme gerilmeleri altında betondan sıyrılmaması için beton içerisine kenetlenme boyu kadar uzatılması gerekmektedir. Mevcut betonarme elemanlara onarım ve güçlendirme amacıyla ekilecek filizlerin kenetlenme boyu kadar beton içerisine yerleştirilmesi uygulama olarak mümkün değildir. Bu tür durumlarda gerekli kenetlenmenin sağlanması sonradan yapılan ankrajlarla mümkün olmaktadır. Ankrajlar donatıları maruz kaldıkları çekme yüklerini bağlandıkları betona ankrajın bağlı derinliği boyunca aderans gerilmeleri vasıtasıyla aktarırlar [26]. Şekil 4’te kimyasal ankraj şeması gösterilmiştir [27].



Şekil 4. Kimyasal ankraj şeması [27]

Şekil 4’ten anlaşıldığı üzere kimyasal ankraj dayanımını etkileyen faktörler; ortam şartları, ankraj donatı çubuğu, kimyasal yapıştırıcı ve betonun özelliklerine bağlıdır.

- Ankraj donatı çubuğunun çapı ve dayanımı
- Ankraj deliğinin temizliği ve ıslaklığı
- Ortamın nemi ve sıcaklığı
- Açılan delik çapı ve gömme derinliği
- Betonun dayanımı ve kullanılabilirliği
- Ankrajların kenara ve birbirlerine olan mesafeleri
- Kimyasal yapıştırıcının nitelikleri kimyasal ankraj dayanımını etkileyen faktörlerdir [27].

Gömme derinliği ve ankraj donatısı dayanımı arttıkça kimyasal ankraj dayanımının da arttığı yapılan çalışmalarda ortaya konmuştur. Yapıştırıcı ile beton arasındaki bağı güçlü tutmak için ve ankrajdan tam performans alabilmek için deliğin temizliği önemlidir. Yapıştırıcılar sayesinde ankraj donatı çubukları dikey ve yatay olarak tutturulabilir ve farklı yapışma dayanımları elde edilebilir [28]. Nem etkisi üzerine yapılan çalışmalarda ise nemli yüzeylere yapılan ankrajlarda oluşan yapışma dayanımının; kuru ve temiz yüzeylerde elde edilen referans yapışma dayanımının ortalama %77’si, ıslak yüzeylere yapılan ankrajlarda ise referans yapışma dayanımının %43’ü kadar olduğu tespiti yapılmıştır [29].

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, onarım ve güçlendirme yöntemleri arasında yaygın bir kullanım alanına sahip olan kimyasal ankraj uygulamalarında, geleneksel çelik donatılara alternatif olarak kullanılabilen fiber takviyeli polimer (FRP) donatılar incelenmiştir. Literatürdeki güncel çalışmalar derlenerek, fiber takviyeli donatıların geleneksel çelik donatılara kıyasla sunduğu avantajlar ve dezavantajlar değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında ulaşılan başlıca sonuçlar aşağıda sunulmaktadır.

- Fiber takviyeli polimer donatılar, korozyona karşı yüksek direnç göstermeleri sayesinde, nemli ve suya maruz kalan ortamlar için önemli bir avantaj sağlamaktadır.
- FRP donatılar, geleneksel çelik donatılara kıyasla daha düşük elektrik ve ısı iletkenliğine sahip olmalarının yanı sıra manyetik alanlardan daha az etkilenmektedir. Bu özellikleri, özellikle elektromanyetik duyarlılığı yüksek yapı projelerinde tercih edilmesini sağlamaktadır.
- Geleneksel çelik donatılar, akma sınırına ulaştıktan sonra sünek davranış sergilemektedir. Buna karşılık, FRP donatılar çekme etkisi altında akma göstermeksizin ani kopma ile sonuçlanan gevrek bir davranış sergilemektedir. Bu durum, özellikle deprem etkilerinin önemli olduğu yapı tasarımlarında FRP donatıların kullanımında dikkat edilmesi gereken bir husustur.
- FRP donatıların düşük elastisite modülüne sahip olması, yapıda daha büyük çatlak açıklıklarının ve sehimlerin oluşmasına neden olabilmektedir.
- Aramid, cam ve karbon esaslı FRP donatılar, kendi aralarında farklı mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olup, her birinin belirli avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Bu nedenle, kullanılacak ortam koşulları ve yapısal gereksinimler göz önünde bulundurularak uygun FRP donatı türünün seçilmesi, kimyasal ankraj uygulamalarının hem daha dayanıklı hem de daha ekonomik olmasını sağlamaktadır.
- Kimyasal ankraj uygulamalarında; kullanılan donatının türü, betonun özellikleri, kimyasal yapıştırıcıların performansı ve çevresel koşulların, ankrajın dayanımını doğrudan etkileyen temel parametreler olduğu değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Koçak, A. R. (2003). Betonarme Yapıların Lif Takviyeli Polimerler (Frp) İle Onarımı Ve Güçlendirilmesi. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] Yiğit, Y. (2002). Betonarme yapılarda onarım ve güçlendirme yöntemleri ve bir güçlendirme uygulaması. Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] Demir, İ., Şimşek, O., & Yaprak, H. (2009). Epoksi türünün ankraj performansına etkisi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu.
- [4] Özkul, H., Mutlu, M., & Sağlam, A. R. (2001). Beton ankrajları. Sika Teknik Bülten, 4, 1-11.
- [5] Seyhan, E. C. (2006). Kimyasal ankrajların davranışlarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] Arslan, Ş. (2020). FRP donatılarda durabilite (Master's thesis, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi).
- [7] Yavuz, G. (2011). *Lif takviyeli polimerlerin betonarme kirişlerde donatı olarak kullanımı. Engineering Sciences, 6(4), 1001-1015.*
- [8] Özşahin, B., Mülayim, A., & Arkoç, O. (2015). *Betonarme yapı elemanlarında lif takviyeli polimerlerin kullanımı. IX Sinan Symposium Book of Proceedings, 109-115, Edirne.*
- [9] ACI 440.1R (2006) Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars, American Concrete Institute.
- [10] Chinaka, E., Shokouhian, M., Head, M., & Efe, S. (2019). An experimental investigation of bond strength of AFRP bars with self-consolidating concrete. *Civil Engineering Design*. doi:10.1002/cend.201900013
- [11] ROLLAND, A., BENZARTI, K., QUIERTANT, M., CHATAIGNER, S., & ARGOUL, P. (2014). Characterization of Aramid FRP rebars and study of their bond behaviour with concrete. In *Proceedings of the 7th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE.*
- [12] Pirayeh Gar, S. (2012). *Structural performance of a fulldepth precast bridge deck system prestressed and reinforced with AFRP bars. Doctoral dissertation, Texas A&M University.*
- [13] Rashid, M. A., Mansur, M. A. & Paramasivam, P. (2005). "Behavior of Aramid Fiber Reinforced Polymer Reinforced High Strength Concrete Beams Under Bending." *ASCE Journal of Composites for Construction, 9(2), 117-127.*

- [14] De Rose, D., "The Rehabilitation of a Concrete Structure Using Fibre Reinforced Plastics", Master Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto, (1997).
- [15] Akbaş, T. T. (2018). CFRP donatıların yüksek dayanımlı beton ile aderansına etki eden faktörlerin deneysel olarak incelenmesi. Doktora Tezi İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2018.
- [16] Ghafoori, F. (2021). Çok katlı betonarme binaların kiriş ve kolonlarında CFRP donatı davranışlarının modelsel olarak incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [17] Ananda, R.S., & Patra, K. (2017). Mechanistic cutting force modelling for micro-drilling of CFRP composite laminates. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 16, 55-58.
- [18] Brinksmeier, E., Fangmann, S., & Rentsch, R. (2011). Drilling of composites and resulting surface integrity. CIRP Annals–Manufacturing Technology, 60, 57–60.
- [19] Zhao, J., Ren, W., Ruan, X., Gong, X., & Si, C. (2021). Experimental study on the seismic performance of columns reinforced by the CFRP bar and sheet. Applied Composite Materials, 28(4), 1291-1313.
- [20] Karataş, M. A., & Gökkaya, H. (2018). A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials. Defence Technology, 14(4), 318-326.
- [21] Nkurunziza, G., Debaiky, A., Cousin, P., & Benmokrane, B. (2005). Durability of GFRP bars: A critical review of the literature. Progress in structural engineering and materials, 7(4), 194-209.
- [22] Algın, Z., Mermerdaş, K., & Şeker, M. (2019). Yüksek Sıcaklığın Cam Elyaf Takviyeli Polimer Donatı ile Beton Arasındaki Aderans Dayanımına Etkisi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19(3), 804-813. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.591078>
- [23] Kadı, M. E. (2019). Cam elyaf takviyeli polimer etriye donatılı dikdörtgen kesitli betonarme kirişlerinin kesme davranışının incelenmesi (Master's thesis, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).
- [24] Zhou, J., Chen, X., & Chen, S. (2011). Durability and service life prediction of GFRP bars embedded in concrete under acid environment. Nuclear Engineering and Design, 241(10), 4095-4102.
- [25] Kazemi, H., Yekrangnia, M., Shakiba, M., Bazli, M., & Vatani Oskouei, A. (2023). Bond durability between anchored GFRP bar and seawater concrete under offshore environmental conditions. Materials and Structures, 56(3), 64.
- [26] Yılmaz, S., Çalışkan, Ö., Kaplan, H., & Kırac, N. (2010). Kimyasal ankrajların dayanımını etkileyen faktörler. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23(1), 123-134.
- [27] Ağdağ, Y. (2019). Kimyasal ankraj çekme dayanımını etkileyen faktörler. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik.
- [28] Darwin D. and Zavegh S. S. (1996). Bond strength of grouted reinforcing bars. ACI Structural Journal, 93(4), 486-495.
- [29] Cook R. A., and Konz R. C. (2001). Factor influencing bond strength of adhesive anchors. ACI Structural Journal, 98(1), 76-86.