

Karbon Elyafı Güçlendirilen Çelik Yapı Elemanlarının Mekanik Performansının İncelenmesi

*¹Tahir Akgül, ¹İsa Vural, ¹Emine Aydın, ¹Metin İpek
¹Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Sakarya Üniversitesi Türkiye

Özet

Çelik Yapılarda güçlendirme amacıyla yaygın olarak kullanılan karbon elyaf takviyeli plastikler (CFRP) ağırlıklarına kıyasla yüksek mekanik dayanıma, mükemmel korozyon direncine ve açık hava koşullarına karşı mükemmel performansa sahip bir malzemedir. Ayrıca CFRP farklı üretim yöntemleriyle ihtiyaca uygun, esnek, her türlü şekil alabilen ve kullanım esnasında kolay bir şekilde uygulanabilen teknolojik ürünlerdir.

Bu çalışmada, çelik çubuk ve lamaların narinlik ve süneklik düzeyini, mukavemeti yüksek, hafif, korozyona uğramayan karbon elyaf (CFRP) takviyeli plastik kullanarak güçlendirilen çelik yapı elemanlarının daha narin boyutlarla daha büyük açıklıkların geçilebilmenin mümkün olabilirliliği incelenmiştir. Karbon kumaş ve levhalarla Güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş numunelerin çekme, eğilme ve burkulma gibi mekanik testleri yapılmıştır. Bu testler sonucunda CFRP'nin çelik yapı elemanlarının mekanik dayanımını % 30 oranında artırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: CFRP, güçlendirme, çelik, çekme, burkulma, eğilme

Investigation of Mechanical Strength of Reinforced Steel Structure Members with Carbon Fiber

Abstract

Carbon fiber reinforced plastics (CFRP) are commonly used to reinforced steel constructions. These materials have high mechanical strength, excellent corrosion resistance and excellent performance against outdoor weather conditions compared to their weight. In addition, CFRP is a technological product that is suitable for various production methods, flexible, can take any shape and can be easily applied during use.

In this study, it was aimed to strengthen the slenderness and ductility level of steel bars and floors by using high strength, lightweight, non-corroding carbon fiber (CFRP) reinforced plastics. In this view, it has been investigated that it is possible that steel structural members can pass larger openings with more delicate dimensions. Mechanical tests such as tensile, bending and buckling of unreinforced specimens and reinforced specimens with carbon fabrics and sheets were carried out. As a result of these tests, it was determined that CFRP increased the mechanical strength of steel structural elements by 30%.

Key words: GFRP, Reinforcement, Still, Tensile, Buckling, Bending

1. Giriş

Çelik homojen ve izotrop bir malzemedir. Mekanik özellikleri herhangi doğrultu boyunca değişmez. Elastiklik modülü diğer malzemelere göre oldukça yüksektir. Sünek bir malzemedir,

büyük şekil değiştirmeler yapabilir. Ancak bu sünek davranışı büyük açıklıkların geçilmesine gereksiz kesit artışlarına neden olmaktadır.

Sünek malzemeler plastik şekil değiştirme yeteneğine sahiptirler. Çelik kopmadan önce büyük miktarda şekil değiştirebilmektedir. (uzar, eğilir, burulur). Çeliğin sünek davranışından dolayı büyük açıklıkların küçük kesitlerle geçilmesi mümkün değildir. Süneklik belli bir düzeye kadar istenilen bir özellik olmasına karşın, çelik benzeri malzemeler tekrarlı yükler altında zamanla yorulan bir malzemedir. Bu yorulma sonucu da sarkmalar ve ani kırılmalar meydana gelir. Bu nedenle çelik yapılarda tasarım esnasında yada zamanla güçlendirilmeye ihtiyaç duymaktadır.

Günümüzde ahşap ve betonarme binaların güçlendirmesinde olduğu gibi çelik yapılarda da karbon elyaf takviyeli plastiklerin (CFRP) uygulamalarının sayısının oldukça fazla olduğu görülmektedir. Çelik ve karbon elyaf takviyeli plastikler kendi aralarında özellikleri üst düzey olan malzemelerdir. Buna rağmen günümüzde çelik yapıların git gide yaygınlaşması ve yapılar için büyük önem arz eden eksiklikleri güçlendirme ihtiyaçını doğurmuştur. karbon elyaf takviyeli plastikler mukavemeti yüksek ve uygulaması çok kolay bir malzeme olduğu için alternatif güçlendirme tekniklerinin arasında gösterilir [1].

Literatür ve uygulama alanları incelendiğinde 2008 yılında ABD'nin Chicago eyaletinde yapılan çalışmalarda FRP malzemelerini yapısal çeliği güçlendirmek için kullanarak çeliğin özellikle burkulma problemi üzerinde durmuş ve bu soruna çözüm aranmıştır. Çalışma sonucunda güçlendirmenin olumlu etkilerinin yanında güçlendirilen numune boyunun uzaması halinde GFRP etkisinin düştüğü tespit edilmiştir[2].

Ülkemizde 2009 yılında yapılan bir başka çalışmada ise çelik plakalar, değişken kalınlık ve yüzey alanlarında GFRP ile güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş çelik plaka testleri ile burkulma değerleri karşılaştırılmıştır [3].

Amerika'da 2014 yılında yapılan bir çalışmada; çatlağı bulunan çelik malzemesini karbon fiber (CFRP) ile güçlendirme yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucu CFRP'nin güçlendirmede oldukça etkili olduğu gözlenmiştir. Burada özellikle eğilme testi üzerinde durulmuştur. [4]

Sakarya üniversitesinde Emine A. Tarafından yapılan doktora çalışmasında ise, ısıl işlem ile çelik yapı elemanlarına uygulanan geçici onarımın kalıcı bir onarım haline getirebilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla çelik plaka elemanlarına ısıl işlemden sonra cam fiber takviyeli polimerler yapıştırılmıştır. Güçlendirme işlemi için çeşitli yapıştırma kompozisyonları denenmiştir. Deneysel olan bu çalışma sonucunda önerilen yöntemin sonuçları tartışılmıştır.[5]

Sakarya Üniversitesinde 2016 yılında yapılan bir çalışmada cam elyaf takviyeli plastiklerin çelik elemanların güçlendirilmesinde etkisi incelenmiş ve bu çalışma sonucunda çelik yapının mekanik performansının %30 oranında artığı tespit edilmiştir. [6]

Literatür incelendiğinde yukarıda numune olarak ifade edilen bazı çalışmalar dışında FRP'lerin her türlü yapı malzemesi güçlendirilmesinde kullanıldığı görülmektedir [7,8,9,10,11]. Öte yandan çelik yapı elemanlarının güçlendirilmesinde FRP kullanımının gittikçe yaygınlaştığı gözlemlenmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Çelik

Ülkemizde her ne kadar yapı stokunun büyük bir kısmını betonarme yapılar oluşturuyor olsa dahi çelik yapıların özellikle fabrika, depo ve afet yapılarında kullanımı oldukça yaygındır. Bu nedenle bu çalışmada özellikle çelik yapıların CFRP kumaş ve plakalarla güçlendirilerek yapı elemanlarının mekanik özellikleri irdelenmiştir.

Bu çalışmada yapısal çelikte en çok kullanılan çelik St37 çeliği kullanılmıştır. Buda malzemenin çekmedeki kopma mukavemetinin 370 Mpa olduğunu ifade eder. Ancak Çelik yapılarda büyük deformasyonların oluşmaması için dayanımın kopma değil, akma sınırı içerisinde kalması istenir [12].

2.2 Karbon Elyaf Takviyeli Plastikler (CFRP)

CFRP, karbon elyaf ile takviye edilerek fiziksel mukavemet değerleri artırılmış doymamış polyesterden oluşan kompozit bir malzemedir. CFRP ahşap, beton, metal, v.b malzemelerin güçlendirilmesinde kullanılan bir malzeme olup, kullanım amacına uygun değişik özelliklerde ve şekillerde kolayca üretilebilen mekanik dayanımı oldukça yüksek, üstün teknolojik bir kompozit malzemedir.

Karbon elyaflarının diğer elyaflara kıyasla daha pahalı olmasına karşın bir çok kullanım alanı bulabilmesinin temel sebebi çok yüksek mukavemete sahip olmasıdır (Tablo 1). CFRP'ler değişik ihtiyaçlara cevap verebilecek çok sayıda çeşitleri bulunan ve farklı kimyasal kompozisyonlara sahip ürünlerdir.

Tablo 1. Bazı FRP ve Metal malzemelerin mekanik özellikleri

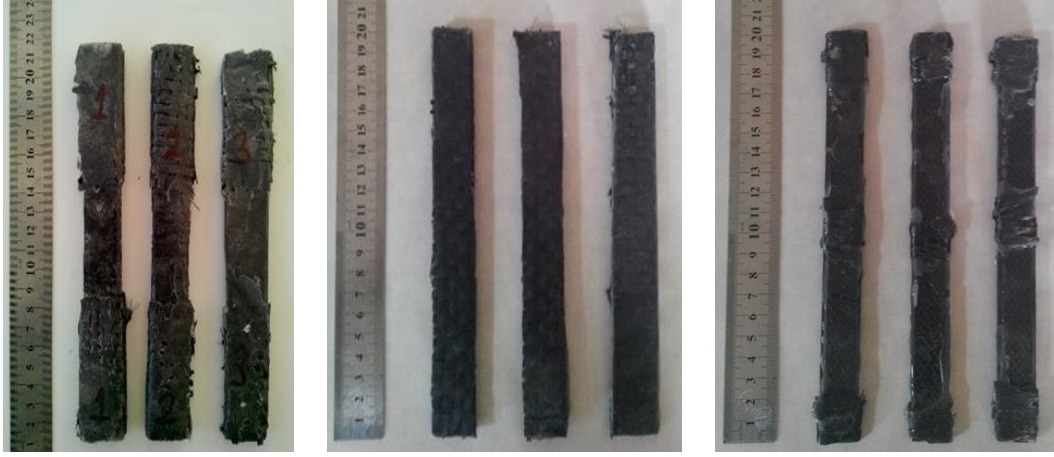
Malzeme	Elastik Modül (Gpa)	Çekme Gerilmesi (Mpa)	Yoğunluk (g/cc)
Karbon Elyaf (Elyaf/Reçine =1)	120	2550	1.51
Cam Elyaf (Elyaf/Reçine =1)	65.5	450	2.5
ST 37 Çeliği	205	370	7.85
Alüminyum 2024	71.7	124	2.81

2.3. Güçlendirilmiş Çelik numunelerin hazırlanması

Yapılan deneysel çalışmalarda çeliğin dezavantajlı yönlerini geliştirebilmek amacıyla CFRP ile güçlendirilmiş numuneler hazırlanmış ve farklı testlere tabi tutulmuştur. Elde edilen şahit numuneler ile güçlendirilmiş numunelerin deneysel sonuçlar kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Bu amaçla Burkulma, Eğilme ve Çekme deneyleri yapılmıştır. Hazırlanan test numuneleri ASTM A370-10 ve ASTM E8/E8M-09 standartlarına uygun hazırlanmış ve test edilmiştir [13,14]. Tüm numunelerimiz 4x20x200 mm ebatlarında dikdörtgen lamalardır.

Karbon elyafın çeliğe yapıştırılmasında Esa kimya tarafından üretilen çift bileşenli epoksi

kullanılmıştır. Bileşenler üretici firmanın belirttiği miktarlarda homojen olarak karıştırılmıştır. Epoksinin kuruma süresi 24 saattir. Numunelerin teste hazır tam kuruma süresi ise 72 saat olarak alınmıştır.



Şekil 1. CFRP kumaş ve plakalarla güçlendirilmiş çelik lamalar

Yapılan deneysel çalışmalarda Sakarya Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat laboratuvarları kullanılmıştır. Burkulma ve üç nokta eğilme testleri 50 kN'luk Shimadzu masaüstü çekme, eğilme, basınç test cihazı kullanılmıştır. çekme testlerinde ise bu cihazın kapasitesi yetersiz kaldığından AVŞA marka 400 kN'luk eksenel çekme makinası kullanılmıştır. Bu makine hidrolik yüklemeli ve bilgisayar donanımlıdır (Şekil 2).



Şekil 2. Kullanılan mekanik test cihazları

3. Deneysel Sonuçlar

3.1 Eğilme Deneyi Sonuçları

Bu bölümde öncelikle şahit numuneler test edilmiş ve böylece güçlendirme öncesinde şahit numunelerin eğilme dayanımı belirlenmiştir. Daha sonra aynı numunelere tek yönlü ve çift yönlü CFRP levhalar epoksi yardımıyla yapıştırılmış olup, bunlar da aynı deneye tabi tutulmuştur. Yapıştırılan levhalar 2 mm kalınlığında olup tek yönlü levhalarda tüm lifler aynı doğrultuda çift yönlü levhalarda ise liflerin yarısı düşey doğrultuda diğer yarısı da yatay doğrultuda olacak şekilde Esa kimya tarafından üretilen CFRP levhalardır. Güçlendirilmiş numunelerin başlıklardan ayrılmaması amacıyla yine karbon elyaf kumaştan başlık uygulaması da yapılmıştır. Bu şekilde üç farklı numune türünden üçer adet hazırlanmış ve test edilmiştir (bkz. şekil 3).



Şekil 3. Eğilme deneyi sonrası şahit ve CFRP takviyeli numuneler

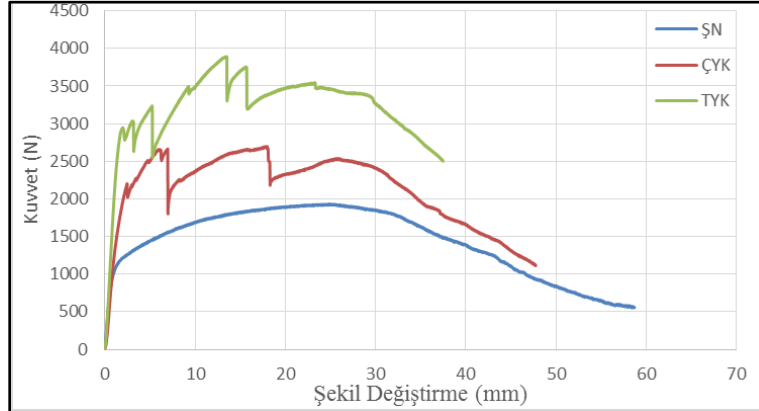
Deney hızı 5 mm/dk olarak belirlenmiştir. Mesnet açıklığı ise 80 mm olarak seçilmiştir. Deneylerin sonucunda ise Kuvvet-Yer Değiştirme grafiği oluşturulmuştur. Eğilme deneyinde numune U şekli alana kadar deneyin devam etmesi sağlanmıştır [15].

Tablo 1. Eğilme dayanımı deney sonuçları

Malzeme/No	Şahit Numune (N)	Çift Yönlü CFRP	Tek Yönlü CFRP
1	1935,9	2840,6	3450
2	1931,25	2698,4	3187,5
3	1917,18	2373,4	3893
Ortalama	1928,11	2637,46	3510,2

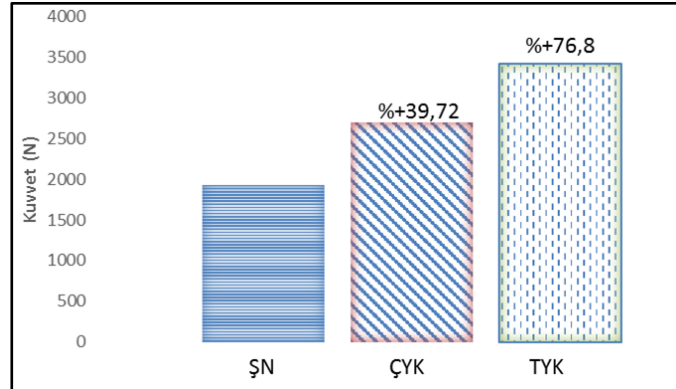
Yapılan üç nokta eğilme testi sonucunda; Şahit numunelerimiz ortalama 1928,1 N maksimum yük taşımıştır. Numunelerde standart sapma ise oldukça düşüktür. Bu durum çeliğin homojen bir

malzeme oluşundan kaynaklanmaktadır. Şahit numuneler test edildikten sonra, aynı ölçülerdeki ve aynı özellikteki numunelere çift yönlü karbon elyaf takviyeli levha epoksi yardımıyla yapıştırılmıştır. Numunelerin yalnızca çekme bölgesine yani alt tarafa levha uygulanmıştır. Bu numuneler ortalama maksimum 2637,46 N eğilme dayanımı elde edilmiştir. Tek yönlü CFRP levha ile güçlendirilen numuneler ise max ortalama 3510,2 N eğilme dayanımına sahiptir. Sonuçlar tablo 2 ve şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Üç nokta eğilme deneyinde elde edilen ortalama kuvvet-yerdeğiştirme grafiği

Çift yönlü CFRP takviyeli numunelerde lifler iki yönlü çalıştığı için, numunede çekme gerilmesinin oluşacağı doğrultudaki liflerin sayısı azdır. Bu nedenle çift yönlü cam elyaf levhada %39.72'lik bir artış sağlanmıştır. Tek yönlü CFRP takviyeli numunelerde ise lifler tek yönde ve numunede çekme gerilmesinin oluşacağı doğrultuda çalışır. Bu da tek yönlü cam elyaf ile güçlendirdiğimiz numunelerde %76.8'lük bir artış elde etmemizi sağlamıştır. (bkz. Şekil 5)



Şekil 5. Eğilme deneyi sonucu elde edilen ortalama değerler ve artış yüzdeleri

3.2. Burkulma Deneyi Sonuçları

Burkulma deneyinde öncelikle şahit numunelerin deneyleri yapılmış daha sonra aynı boyutlardaki farklı çelik levhalara epoksi yardımıyla CFRP kumaş sarılmış ve deneye tabi tutulmuştur. Burkulma deneyi için basınç düzeneği kurulmuştur. Deneylerde çelik homojen bir malzeme olduğu için üçer adet numunenin yeterli olacağı düşünülmüştür. Böylece iki farklı numune türünden üçer adet numune hazırlanmış ve test edilmiştir (bkz şekil 6). Burkulma deneyi sonucunda elde edilen

veriler karşılaştırılacak olursa temel olarak aynı uzama miktarında numunenin taşıdığı yük üzerinden yorum yapılabilirdiği gibi numunenin taşıdığı maksimum yükü dikkate alarak da değerlendirme yapılabilir.

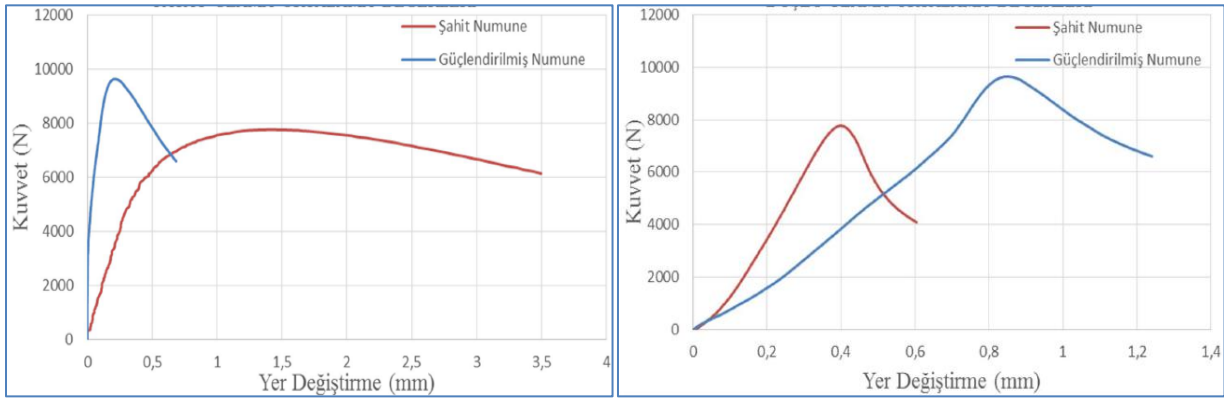


Şekil 6. GFRP takviyeli numunelerde burkulma deneyi

Deney sonucunda maksimum yükler dikkate alındığında Şahit numunelerimiz ortalama 7760,5 N yük taşıırken, GFRP takviyeli numunelerimiz ise 9651,3 N yük taşımıştır. Elde edilen değerler aşağıdaki tablo 3 ve şekil 7’de verilmiştir.

Tablo 3. Burkulma deneyi sonucu elde edilen maksimum kuvvetler

	Şahit Numuneler (N)	GFRP Takviyeli Numuneler (N)
1	7760,2	9986,4
2	7766	9465,1
3	7755,5	9603
Ortalama	7760,5	9651,3



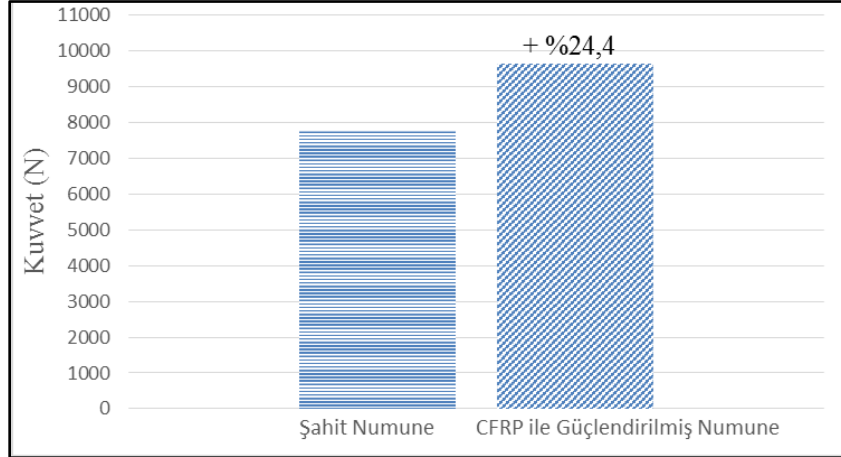
(a)

(b)

Şekil 7. Burkulma deneyi ortalama Kuvvet-Yer değiştirme grafiği (a) yatay yönde (b) düşey yönde

Şahit numuneler ile güçlendirilmiş numuneler arasında karşılaştırma yapılırken dikkat edilmesi gereken bir başka konu da bu yükler altında yer değiştirme miktarlarının aynı olmasıdır. Yani hedeflediğimiz gibi numunelerimiz, aynı deformasyona karşılık daha fazla yük taşımıştır.

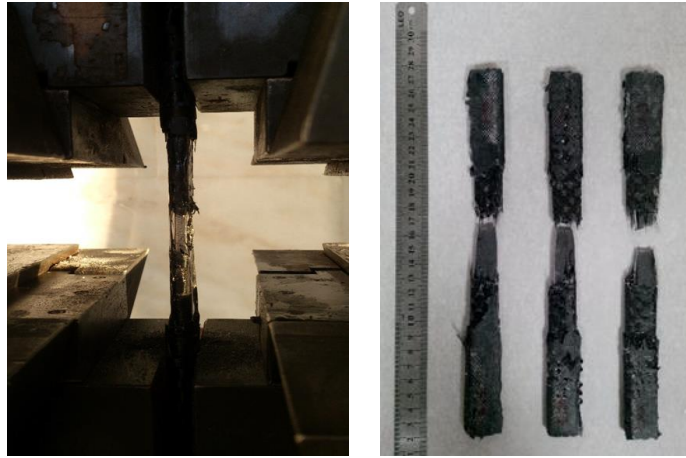
Burkulma deneyi sonucunda elde edilen şahit numune değerleri ile güçlendirilmiş numune değerleri birbirleri ile kıyaslandığında güçlendirilmiş numunelerin ortalama % 24.4 oranında daha yüksek burkulma dayanımına sahip oldukları görülmektedir (bkz. şekil 8).



Şekil 8. Burkulma deneyi sonucu elde edilen ortalama değerler ve artış yüzdesi

3.3. Çekme Deneyi Sonuçları

Son olarak çekme deneyinde şahit numuneler test edildikten sonra aynı boyutlarda hazırlanmış numunelere CFRP kumaş epoksi yardımıyla sarılmış olup, çekme cihazı çenelerinin CFRP kumaşı kesmemesi için numunelere başlık yapılmıştır. Çekme cihazının çene kısmında kalan bölgelere yine CFRP kumaş kullanılarak başlık yapıldıktan sonra deneyler gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyinde iki numune türünden üçer adet hazırlanmış ve test edilmiştir (bkz şekil 9).



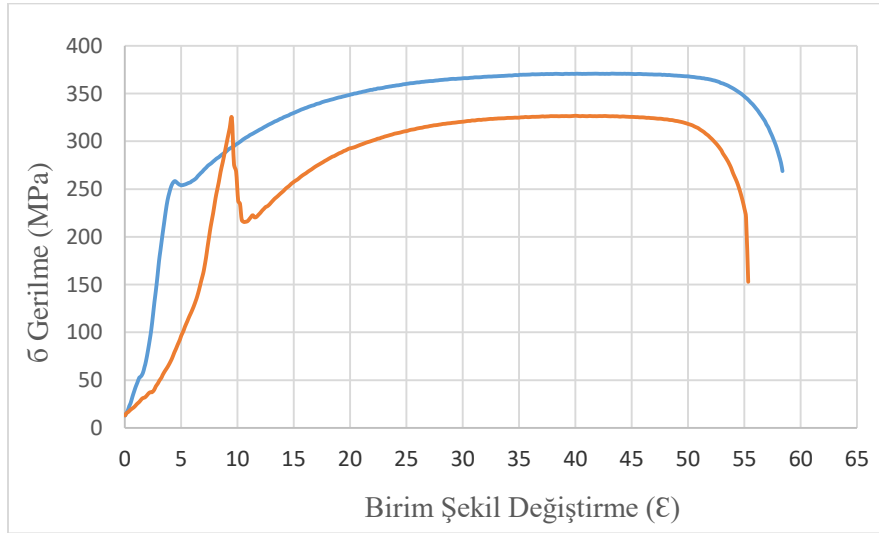
Şekil 9. CFRP takiyeli numunelerde çekme deneyi

Deney hızı 5 mm/dk olarak belirlenmiştir. Ön yükleme 50 N olarak seçilmiştir. Deneylerin sonucunda ise Gerilme-Şekil değiştirme grafiği oluşturulmuştur. Deney sonuçları akma dayanımına göre incelenmiş olup aşağıdaki tablo 4'te belirtilmiştir.

Tablo 4. Çekme deneyi sonucu elde edilen akma dayanımları

	Şahit Numuneler (N/mm ²)	CFRP Takviyeli Numuneler (N/mm ²)
1	254	324,3
2	255,8	324,4
3	253,4	313,9
Ortalama	254,4	320,86

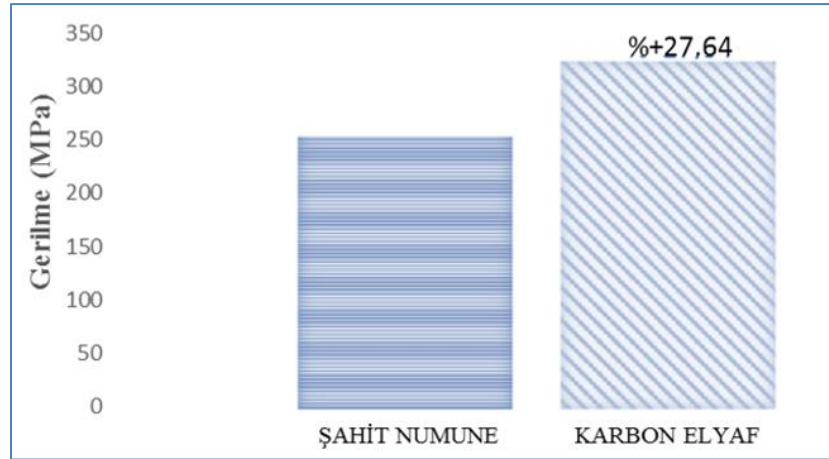
Yapılan çekme deneyleri sonucunda şahit numunelerin ortalama akma dayanımları 254,4 N/mm² olarak belirlenmiş olup CFRP'lerle güçlendirilen numunelerde ortalama akma dayanımı 320,86 N/mm² olarak belirlenmiştir. Şahit numunelerin ortalama değeri ile güçlendirilmiş numunelerin ortalama değerleri dikkate alınarak şekil 10'da gerilme-şekil değiştirme grafikleri çizilmiştir.



Şekil 10. Çekme deneyi ortalama Gerilme-Şekil Değiştirme grafiği

Burada grafiklerden de görüleceği gibi cam elyaf kırılana kadar numuneler normalden daha fazla yük taşımıştır. Cam elyaf kırıldıktan sonra ise gerilmenin normal değerlere döndüğü ve pekleşmeye geçtiği görülüyor. Çelik, yapılarda çekme gerilmelerine çalışan bir malzeme olduğu için akma dayanımına ulaşana kadar daha fazla yük taşıması istenen ve hedeflenen bir durumdur.

Çekme deneyi sonucunda elde edilen şahit numune değerleri ile güçlendirilmiş numune değerleri birbirleri ile kıyaslandığında güçlendirilmiş numunelerin ortalama % 27.64 oranında daha yüksek akma dayanımına sahip oldukları görülmektedir (bkz. şekil 11).



Şekil 11. Çekme deneyi sonucu elde edilen ortalama değerler ve artış yüzdesi

4. Sonuç ve Öneriler

Yapılan tüm deneysel çalışmalar dikkate alındığında; Özellikle mevcut yapılarda güçlendirmeyi amaçlamış olan bu çalışmanın sonucunda, kirişlerde tek yönlü GFRP levha bir çözüm olarak sunulur. Tek yönlü GFRP levha ile yapılacak güçlendirmede, mevcut yapılarda %76,8 oranında eğilme dayanımında artış elde edilebileceği tespit edilmiştir.

Yapılarda döşemelerin güçlendirilmesi için yine tek yönlü GFRP levha en uygun çözüm olacaktır. Uygun aralılarda uygulanabilecek levha ile döşemelerde güçlendirme sağlanmış olur. Tek yönlü GFRP döşemenin kısa ve uzun doğrultusunda uygulanabilir. Ancak döşemelerde kısa doğrultunun daha fazla zorlandığı göz önünde bulundurulursa yalnız bu doğrultuda da uygulanabilir.

Mevcut yapılarda kolonlarda güçlendirme için sunulabilecek çözüm ise, kolonun CFRP kumaş ile sarılmasıdır. Kolonlarda bu şekilde bir güçlendirme yapılması burkulma dayanımının %24,4 oranında arttırılabilmesini sağlamıştır. Ayrıca çekmeye çalışan elemanlarında dayanımı % 27,64 oranında arttığı tespit edilmiştir.

CFRP ile yapılacak güçlendirmenin hasarlı yapılarda çözüm olma potansiyeli net olarak ortaya çıkmış olup bu teknik hızlı ve pratik çözüm aranan çelik yapılarda rahatlıkla uygulanabilir, özellikle CFRP'nin uygulama kolaylığı güçlendirmenin hızlı şekilde tamamlanabilmesini ve yapıların hemen kullanıma açılabilmesini sağlaması büyük bir avantaj olarak görülebilir.

Kaynaklar:

- [1] AKGÜL T., Ahşapların Ve Birleşim Noktalarının Fiber Takviyeli Polimerlerle (FRP) Güçlendirilmesi, Sakarya Üniversitesi, Türkiye, 2007
- [2] BECQUE, A numerical investigation of local_overall interaction buckling of stainless steel lipped channel columns, Journal of Constructional Steel Research, 2009
- [3] GÜVEN, Çelik Plakaların Mevzi Burkulma Davranışlarının Cam Elyafıla Güçlendirilmiş Polimer İle Geliştirilmesi Üzerine Deneysel Çalışma, İzmir İleri Teknoloji Enstitüsü, Türkiye, 2009

- [4] BURNINGHAM, New unibody clamp anchors for posttensioning carbon-fiberreinforced polymer rods, University of Utah in Salt Lake City, USA, 2014
- [5] AKTAŞ M., AYDIN E., Isıl İşlem İle Onarılan Narin Çelik Plakaların Cam Fiber Takviyeli Polimerler (GFRP) İle Güçlendirilmesi, Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği, Türkiye, 2012
- [6] AKGÜL T., “GFRP’lerle Güçlendirilen Çelik Yapı Elemanlarının Mekanik Dayanımının İncelenmesi” 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science ISITES2016 3-5 November 2016 Alanya/Antalya - Turkey
- [7] BIGAUD, Time-variant flexural reliability of RC beams with externally bonded CFRP under combined fatigue-corrosion actions, Angers University, France, 2014
- [8] CUI, Development of ductile composite reinforcement bars for concrete structures, 2007
- [9] FENG, Mechanical Analysis of Stress Distribution in a Carbon Fiber-Reinforced Polymer Rod Bonding Anchor, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, 2014
- [10] HARRIES, Enhancing Stability of Structural Steel Sections Using FRP, Thin-Walled Structures
- [11] HIROHATA, Dominant factors deciding compressive behaviour of cruciform column projection panel corrected by heating, Steel Structures, 2007
- [12] HMİDAN, Correction factors for stress intensity of CFRP-strengthened wide-flange steel beams with various crack configurations, North Dakota State University, Fargo, United States, 2014
- [13] ASTM A370-10 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products
- [14] ASTM E8/E8M-09, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials
- [15] TS EN ISO 7438 “Metalik malzemeler - Eğme deneyi” Türk Standartları Enstitüsü, 2016