



ISSN:1306-3111

e-Journal of New World Sciences Academy
2012, Volume: 7, Number: 2, Article Number: 2A0076

TECHNOLOGICAL APPLIED SCIENCES

Received: December 2011

Accepted: April 2012

Series : 2A

ISSN : 1308-7231

© 2010 www.newwsa.com

Elif Ağcakoca

Muharrem Aktaş

Sakarya University

elifd@sakarya.edu.tr

muharrema@sakarya.edu.tr

Sakarya-Turkey

**HM-CFRP İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ KOMPOZİT I-KİRİŞLERDE HM-CFRP'NİN SIYRILMAMASI
İÇİN FAYDALI MESAFENİN BELİRLENMESİ**

ÖZET

Fiber Takviyeli Polimer (FRP) malzemelerinin korozyona dayanıklı olması, ince ve hafif olması, sistemin ağırlığını fazla artırmaması, yorulmanın sebep olduğu çatlakları önlemesi gibi nedenlerden dolayı, güçlendirmede tercih edilmektedir. Çeliğin dayanıklı bir malzeme olmasından dolayı, güçlendirilmesinde kullanılacak FRP malzemesinin de yüksek dayanıma sahip olması gerekmektedir. Son yıllarda üretilen Yüksek Modüllü Karbon Takviyeli Polimer (HM-CFRP)'in çelik kirişlerin güçlendirilmesinde iyi bir performans göstereceği düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: HM-CFRP, ABAQUS, Faydalı Mesafe,
Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar,
Sıyrılma.

**DEFINING DEVELOPMENT LENGTH OF HM-CFRP IN COMPOSITE I-SECTION
STRENGTHENED WITH HM-CFRP**

ABSTRACT

Fiber Reinforced Polymer (FRP) materials are preferred in strengthening processes as these materials are resistive against corrosion, thin and light, i.e., they do not cause a significant increase in the weight of the system, and good for preventing the fatigue cracks. As the steel has high strength, FRP material used for strengthening should also have high strength. It is thought that High Modulus Carbon Fiber Reinforced Polymer (HM-CFRP) produced in recent years shows a high performance in strengthening of steel beams.

Keywords: HM-CFRP, ABAQUS, Development Length,
Nonlinear Finite Element, Slip.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yapıların güçlendirilmesini gerektirecek birçok sebep vardır. Bu sebeplerden en önemlisi yapıya etkiyen yüklerin, tasarım aşamasında gerçek yük değerlerine göre küçük alınmış olmasıdır. Ayrıca daha sonradan korozyon veya yaşlanmayla oluşan bozulmalara bağlı yük taşıma kapasitesinde meydana gelen kayıplar ya da yetersiz detaylandırmaya bağlı ortaya çıkan erken kırılmalar oluşabilmektedir. Bu gibi durumları önlenmek için dayanıklılığı arttırmak gerekebilir. Bir başka güçlendirme gereği de değişen deprem yönetmelikleri sonucu ortaya çıkmaktadır.

Bilimin yeni malzeme arayışı ile fiber teknolojisinin güçlendirme alanına girmesi, güçlendirmede yeni bir sayfa açmıştır. Çelik köprü kirişlerinin devamlı korozyona maruz kalmaları, FRP malzemelerinin korozyona dayanıklı olması buna karşın yüksek dayanıma sahip olması gibi özelliklerden dolayı ayrı bir tercih sebebi olmaktadır[1 ve 2]. FRP malzemesinin ince ve hafif olması, sistemin ağırlığını fazla artırmaması FRP için bir avantaj daha sağlamaktadır. Ayrıca FRP malzemesi yorulmanın sebep olduğu çatlakları da önlemektedir [3].

Literatürde FRP levhaları ile ilgili değişik çalışmalar yapılmıştır. Bunların arasında birbirine bağlanma ve plakanın uç detayları hakkında çalışmalar sayılabilir[4]. CFRP'nin uçları düz ve eğimli olacak şekilde kesilmiş, CFRP plakaların uç detaylarının kopma davranışı üzerine etkisi incelenmiştir [5 ve 6]. Güçlendirmede en büyük sorunun FRP ve çelik arasındaki bağlantıda olduğu vurgulanmış, bu yüzden FRP ile güçlendirilmiş kirişin en zayıf noktasının burası olduğu anlaşılmış ve son zamanlarda yapılan çalışmalarla çelik yapıların güçlendirmesinde uç detayları ile ilgili ilerlemeler kaydedilmiştir. Ancak betonarme yapıların güçlendirilmesinde bağlantı sorunlarına hala çözüm üretilmemiştir[7]. FRP ve çelik arasındaki yük transferinde; bağlantı boyu, yapıştırıcı tipi, FRP kalınlığı gibi etkenler önemlidir[8, 9 ve 10]. HM-CFRP ile güçlendirilmiş kompozit kirişte, yapıştırıcının kalınlığının bağlantıya olan etkisi vurgulanmış[11], CFRP plakalarla güçlendirilmiş çelik-betonarme kompozit köprü kirişlerinde ise CFRP'nin kalınlığının dayanıma olan katkısı üzerinde durulmuştur[12]. Ayrıca CFRP'nin korozyona dayanıklı bir malzeme olduğu vurgulanmıştır[1]. Bazı çalışmalarda, korozyondan dolayı kesit kayıplarını temsil etmek üzere çekme başlığından belli miktarda parçalar çıkartılmıştır. Korozyonu simule etmek için çekme başlığına zarar verilmiş, çekme başlıkları CFRP ile güçlendirilmiş ve davranışları incelenmiştir[13,14]. Korozyonun çelik yapılar üzerinde meydana getirdiği hasarların onarılması üzerinde durulmuştur. Zarar verilmiş numuneye yapılan güçlendirme ile orijinal kirişe yapılan güçlendirmenin hemen hemen aynı sonuçları verdiği gözlenmiştir [15]. Çelik köprülerin veya iletişim kulelerinin kullanım amaçlarının da değişiklikler olabilmekte ve dayanımlarında artış istenebilmektedir [16].

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Bu çalışmanın amacı deneysel verilerle doğrulanmış doğrusal olmayan sonlu elemanlar modeli kullanarak güçlendirme malzemesi olarak kullanılan HM-CFRP'nin çelik malzeme yüzeyinden sıyrılmadan kopması için gerekli faydalı uzunluğun tespit edilmesidir.

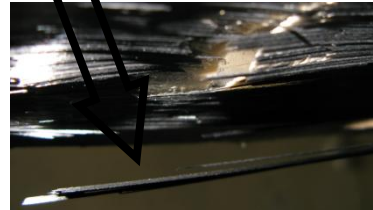
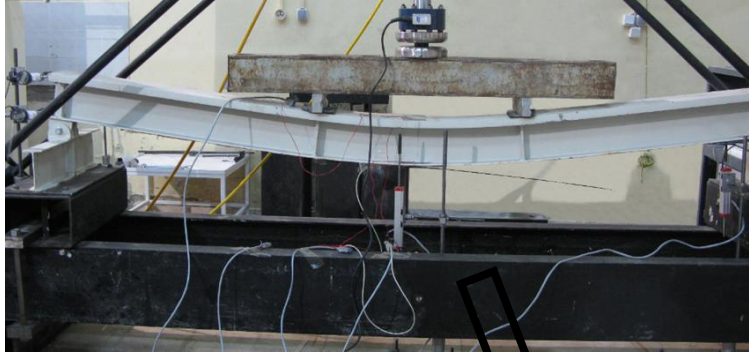
HM-CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin yükleme altındaki davranışlarını incelemek için bilgisayar modellemesine ihtiyaç vardır. Günümüz koşullarında hem ekonomik olarak, hem de laboratuvar şartları

açısından sınırlı sayıda ve sınırlı boyutlarda numuneler üzerinde gerçek deneyler yapılabilmektedir. HM-CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin, deney sonuçlarına yeterli yakınlıkta uyum sağlamak için bilgisayar ortamında ne şekilde modelleneceği, hangi eleman türlerinin kullanılacağı, sonlu eleman ağı sıklığının ne olması gerektiği ve çözüm yöntemi ile ilgili yeterli düzeyde bilgi mevcut değildir. Literatürde, güçlendirilmiş kirişlerin bilgisayar modelleri belirli bir noktaya kadar yapılmıştır. HM-CFRP'nin kırılmaya kadar olan davranışı dikkate alınmış ve numerik model deneyleri o noktada kesilmiştir. Bu çalışmada, HM-CFRP kopması sonrasında kirişin davranışı incelenmeye devam edilmiştir. Ayrıca çalışma, bu konuda yapılacak benzer amaçlı çalışmalara ışık tutması bakımından da önem arz etmektedir.

3. HM-CFRP'Lİ KIRIŞ DENEYİ (EXPERIMENT OF HM-CFRP STRENGTHENED I BEAM)

HM-CFRP'li kiriş deneyi için üstü çelik levhali I kiriş kullanılmıştır. 3000mm uzunluğundaki çelik kirişin, IPE 160 profilinin alt başlığına Spabond 345 marka yapıştırıcı sürülmüş ve üzerine 2400mm uzunluğunda HM-CFRP şerit yapıştırılarak ST1 kirişi elde edilmiştir. HM-CFRP şeridinin kalınlığı 1.4mm, genişliği ise 50mm'dir. Yapıştırıcının kuruması için deneyden önce bir ay beklenmiştir.

3000 mm uzunluğundaki HM-CFRP ile güçlendirilmiş çelik levhali kirişe dört nokta yükleme deneyi yapılmıştır. Yükleme sonunda, çekme başlığına yapıştırılan HM-CFRP'nin kopması sonucu göçme gerçekleşmiştir (Şekil 1). Çekme ve basınç başlıklarında akma meydana gelerek plastik deformasyonlar oluşmuştur.



Şekil 1. HM-CFRP ile güçlendirilmiş çelik levhali kiriş deneyi sonrası
(Figure 1. Post- experimental test specimen)

Elde edilen yük ve orta nokta düşey yer değiştirme verileri kullanılarak yük deplasman grafiği çizilmiştir (Şekil 2).

HM-CFRP kullanılarak yapılan güçlendirmelerde, güçlendirme oranı yüksek olan kesit, çelik malzemesi akana kadar daha fazla yük taşırken,

FRP malzemesi koştuktan sonra güçlendirme oranı etkisini kaybedip diğeri malzeme davranışı numune üzerinde etkili olmaya başlamıştır. [17]

4. NUMERİK MODEL (NUMERICAL MODEL)

Sonlu elemanlar yönteminin daha etkin ve yaygın kullanımı bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak sağlanmıştır. Genel amaçlı sonlu elemanlar paket programları 1970'li yıllardan itibaren ortaya çıkmaya başlamıştır. 1980'li yılların sonlarına doğru artık paket programlar mikro bilgisayarlarda kullanılmaya başlanmıştır.

Sonlu elemanlar metodunda gerçek cisimler birbirine bağlanmış sonlu eleman adı verilen alt bölümler ile tarif edilmektedir. Bu elemanlar birbirlerine düğüm noktası adı verilen özel noktalarla bağlanmışlardır. Düğüm noktaları genellikle elemanların birbirine bağlandıkları yerler olan eleman sınırlarında bulunmaktadır. Böylece elemanlara, malzeme özellikleri ve sınır şartları atanabilmektedir.

Nümerik model oluşturulurken; çelik, epoksi ve HM-CFRP'den oluşan güçlendirilmiş çelik profilin davranışını tam olarak yansıtmaları için çalışılmıştır. Kullanılacak olan sonlu eleman tipleri, malzeme matematik modelleri, arayüz modellemesi ve modelin mesh yoğunluğu hassasiyeti gerçek deney sonuçları ile kıyaslanarak belirlenmiştir. Böylece gerek zaman gerekse parasal olarak ekonomik olmayan laboratuvar deneyleri yerine, bilgisayarda deneyler yapılarak parametrik çalışmalar yapılabilmiştir.

Çalışmada ABAQUS sonlu eleman modeli kullanılmıştır. Simülasyonlar genellikle 10 000 ile 1 milyon çözüm adımında olur. Oluşturulan üç boyutlu sonlu eleman modeli malzeme ve geometri bakımından non-linear'dir. Analitik modelde girilen malzeme özellikleri için, yapılan malzeme deneylerinin de elde edilen mekanik sonuçlardan yararlanılmıştır. Bilgisayar modeli kurulurken farklı mesh boyutları kullanılmış ve doğrulamada en yakın sonucu veren mesh aralığı faydalı mesafe bulunması sırasında dikkate alınmıştır [10 ve 18].

Nümerik model deneydeki yükleme ve sınır şartlarına uygun olarak oluşturulmuştur. Simetri kullanılmamış, kirişin tamamı modellenmiştir. Mesnetler sabit ve hareketli olarak modellenmiştir. Yük üst başlığa iki noktadan deplasman olarak verilerek 4 nokta yükleme uygulanmıştır.

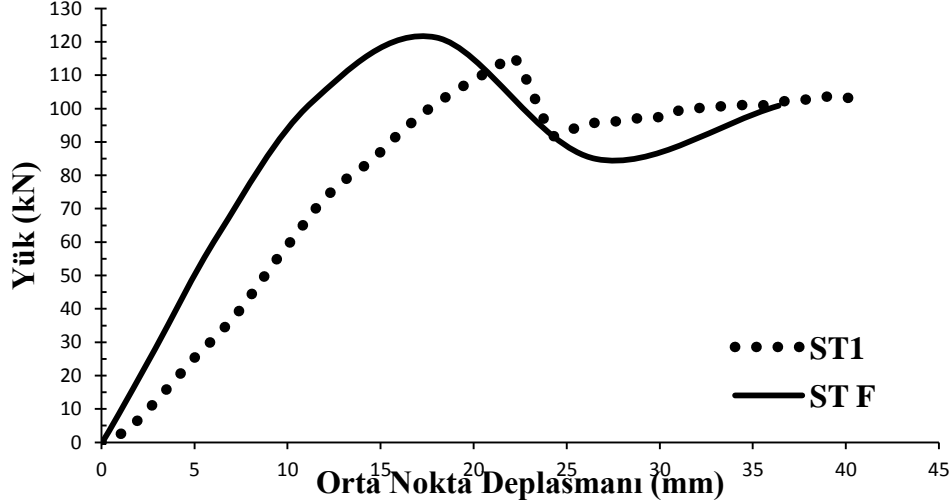
4.1. Sonlu Eleman Doğrulama (Finite Element Verification)

ST1 deney kirişi sonlu eleman programı ABAQUS Explicit ile modellenmeye çalışılmış ve STF kirişi elde edilmiştir. Çelik liner elastoplastik, HM-CFRP brittle cracking ve epoksi ise traction separation olarak isimlendirilen yapışkan malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir. Deney ve sonlu eleman modeli benzer davranışı göstermektedir (Şekil 2).

ABAQUS/Explicit çözümleri sonucunda elde edilen yük-deplasman grafiği, deney yük-deplasman grafiği ile birlikte çizilmiştir. Hazırlanacak olan sonlu elemanlar modellerinden elde edilecek olan deplasmanlar da hata olabileceği unutulmamalıdır. Zira nümerik analizde ön kusurlar ve deney esnasında oluşan kusurlar göz ardı edilmektedir (Şekil 2).

HM-CFRP ile güçlendirilmiş kiriş deneyi ve sonlu eleman modeli ile tanımlanmak istenmiştir. Malzemelerin elastik sonrası davranışının kirişin eğilme davranışına olan etkisine bakılmıştır. Kırılma sonrası davranışta I kiriş etkili olmuştur. Nonliner malzeme modellemesi ile

yapılan nümerik analiz deneyle de bu davranış doğrulanmıştır. HM-CFRP malzemesi koştuktan sonra ST1'de görülen kiriş davranışı, ST F'de gözlemlenmiştir. ST1 ve STF'deki yük ve deplasmanlardaki farklar Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 2. Deney ve nümerik analiz sonuçlarının karşılaştırılması
(Figure 2. Comparison of experimental and numerical results of test)

Tablo 1. Deney ve nümerik analiz karşılaştırılması
(Table 1. Comparison of experimental and numerical results of test)

| | Deney | Nümerik analiz | % Fark |
|--------------------------|--------|----------------|--------|
| Deplasman (mm) | 24 | 18 | 25 |
| Maksimum Yük (kN) | 115.39 | 121.35 | 5 |

5. PARAMETRİK ÇALIŞMA (PARAMETRIC STUDY)

Güçlendirilmiş kirişte istenilen davranış için gerekli HM-CFRP miktarını bulmak ve çelik kesit ile HM-CFRP'nin birlikte çalışmasını sağlamak için gerekli faydalı bağlanma boyunu belirlemek için çalışmalar yapılmıştır. Üzeri çelik levhalı kirişlerin çekme başlığı belirli kalınlık ve uzunlukta HM-CFRP ile güçlendirilerek kiriş davranışında meydana gelen değişimler incelenmiştir. Çalışmada kullanılan kirişler IPE profil grubundan seçilmiştir. IPE160 ve IPE270 profillerinin 3 metre uzunluğunda modelleri oluşturulmuştur. Böylece gerçek numune üzerinde sınırlı sayıda yapılmış olan laboratuvar deneyleri, doğrulanmış nümerik model ile çok geniş bir deney seti üzerinde belirlenen parametrelerin etkileri gözlemlenerek test edilecektir.

Parametrik çalışmada, faydalı mesafenin davranışa olan etkisi incelenmiştir. 3 metre uzunluğundaki IPE 160 ve IPE 270 profillerinden oluşan modellerde her bir HM-CFRP oranı için faydalı mesafe 200 mm ile 1000 mm arasında kademeli olarak değiştirilmiştir. Yük-deplasman grafikleri elde edilmiş ve kiriş dayanımının tükenmesinin epoksi sıyrılmasından mı, yoksa HM-CFRP kopmasından mı meydana geldiği araştırılmıştır. Böylece HM-CFRP kopmadan önce epoksi sıyrılmasını önlemek için gerekli minimum faydalı mesafe belirlenmiştir. HM-CFRP'nin değerleri değiştirilirken HM-CFRP üretici firmasının ürettiği FRP'nin geometrik özellikleri kullanılmıştır.

Kiriş kesit geometrisi: Kesit geometrisi belirlenirken tarafsız eksenin çelik levhanın içinde olması istenmiştir. Bunun nedeni, çelik levhanın basınç başlığı, profil ve HM-CFRP'nin çekme başlığı olarak davranmasını sağlamaktır.

Faydalı mesafe: HM-CFRP'nin uç noktasının, sabit moment bölgesinin başlangıç noktasına (tekil yükün uygulanma noktası) mesafesidir (Şekil 3).

HM-CFRP uzunluğu: HM-CFRP uzunluğunun belirlenmesi, faydalı mesafenin belirlenmesine bağlıdır. HM-CFRP kopmadan önce epoksi sıyrılmasını önlemek için gerekli faydalı mesafeyi belirlemek gerekmektedir.

HM-CFRP oranı: HM-CFRP kesit alanının profil kesit alanına oranıdır (çelik levha kesit alanı dahil edilmemiştir).

IPE 160 ve IPE 270 profillerinden oluşan modellerde farklı HM-CFRP oranları için faydalı mesafe kademeli olarak değiştirilerek 187 çözüm yapılmış ve faydalı mesafe için optimum bir değer bulunmaya çalışılmıştır (Tablo2).

5.1. Faydalı Mesafenin Kiriş Davranışına Etkisi (Effects of Development Length on the Behavior)

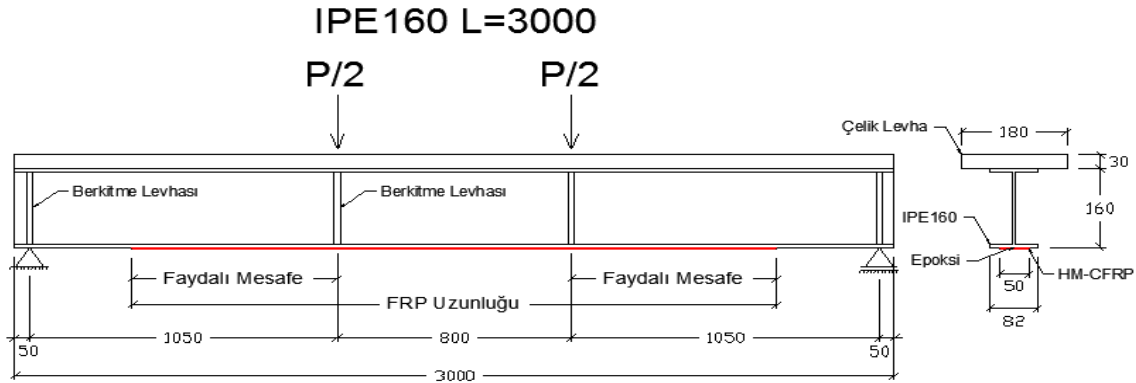
Faydalı mesafenin tam anlamıyla yeterli olmaması durumunda, HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması meydana gelmektedir. Bu durumda HM-CFRP'nin çalışabildiği oranda dayanım artışı olmaktadır. Tablo 2'de faydalı mesafe için yapılan numerik modellerde kullanılan profil tipleri ve bunlar üzerinde çalışılan model sayıları verilmiştir.

Tablo 2. Parametrik çalışmada kullanılan profiller
(Table 2. Sections employed in parametric study)

| Profil Tipi | Kiriş Boyu (mm) | Farklı Faydalı Mesafeler için Model Sayısı |
|---|-----------------|--|
| IPE 160 | 3000 | 125 |
| IPE 270 | 3000 | 62 |
| 2 Profil Tipi için Toplam 187 adet çözüm yapılmıştır. | | |

5.1.1. IPE 160 Kirişi (IPE 160 Beam)

Faydalı mesafenin kiriş davranışına olan etkisini araştırmak için seçilen IPE 160 profilinden oluşan kirişin geometrik özellikleri Şekil 3'de verilmiştir.

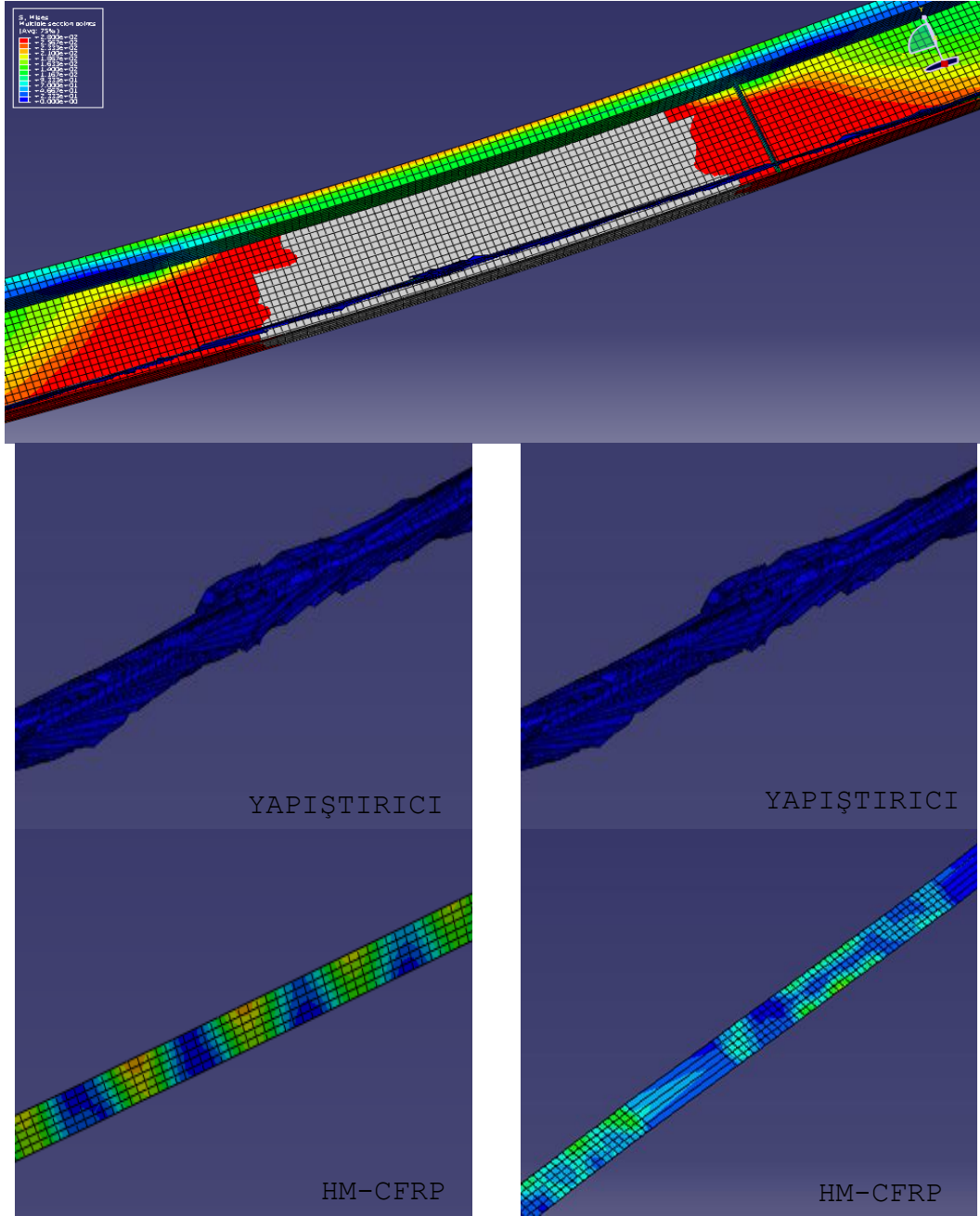


Şekil 3. IPE 160 L=3000mm kirişi
(Figure 3. IPE 160 beam with L=3000mm)

Tablo 3. IPE 160 L=3000mm kirişinde göçme modları
 (Table 3. Failure modes in IPE 160 with L=3000 mm)

| IPE 160 KİRİŞİ L=3000 | | | | | | | | SONUÇ |
|-----------------------|---------------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------|
| Kiriş Uz. (mm) | Profil Alanı (mm ²) | Faydalı Mesafe (mm) | FRP Uzunluğu (mm) | FRP Kalınlığı (mm) | FRP Genişliği (mm) | FRP Alanı (mm ²) | Oran (FRP A. / Profil A.) | Kopma Durumu |
| 3000 | 2010 | 400 | 1600 (%54) | 1,4 | 50 | 70 | 3,5% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 600 | 2000 (%67) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 688 | 2176 (%73) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 2010 | 400 | 1600 (%54) | 1,5 | 50 | 77 | 3,8% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 600 | 2000 (%67) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 688 | 2176 (%73) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 2010 | 400 | 1600 (%54) | 1,68 | 50 | 84 | 4,2% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 600 | 2000 (%67) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 688 | 2176 (%73) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 2010 | 400 | 1600 (%54) | 1,84 | 50 | 92 | 4,6% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 600 | 2000 (%67) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 688 | 2176 (%73) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 2010 | 400 | 1600 (%54) | 2,04 | 50 | 102 | 5,1% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 600 | 2000 (%67) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 688 | 2176 (%73) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 2010 | 400 | 1600 (%54) | 2,25 | 50 | 112,5 | 5,6% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 600 | 2000 (%67) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 688 | 2176 (%73) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 2010 | 400 | 1600 (%54) | 2,47 | 50 | 123,5 | 6,1% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 600 | 2000 (%67) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 688 | 2176 (%73) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 2010 | 325 | 1450 (%48) | 2,69 | 50 | 134,5 | 6,7% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 400 | 1600 (%54) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 600 | 2000 (%67) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 2010 | 325 | 1450 (%48) | 3,01 | 50 | 150,5 | 7,5% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 400 | 1600 (%54) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 600 | 2000 (%67) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 2010 | 325 | 1450 (%48) | 3,29 | 50 | 164,5 | 8,2% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 688 | 2176 (%73) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 870 | 2540 (%84) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 2010 | 325 | 1450 (%48) | 3,60 | 50 | 180 | 9% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 688 | 2176 (%73) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 870 | 2540 (%84) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 2010 | 325 | 1450 (%48) | 3,90 | 50 | 195,0 | 9,7% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 688 | 2176 (%73) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 870 | 2540 (%84) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 2010 | 325 | 1450 (%48) | 4,39 | 50 | 219,5 | 10,9% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 688 | 2176 (%73) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 870 | 2540 (%84) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 2010 | 325 | 1450 (%48) | 4,80 | 50 | 240 | 11,9% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 688 | 2176 (%73) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 870 | 2540 (%84) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 2010 | 325 | 1450 (%48) | 5,28 | 50 | 264 | 13,1% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 688 | 2176 (%73) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 870 | 2540 (%84) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 2010 | 325 | 1450 (%48) | 5,81 | 50 | 290,5 | 14,5% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 688 | 2176 (%73) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 870 | 2540 (%84) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 2010 | 688 | 2176 (%73) | 6,96 | 50 | 348 | 17,3% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 870 | 2540 (%84) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 900 | 2600 (%87) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |

IPE 160 profilinden oluşan modellerde farklı HM-CFRP oranları için faydalı mesafe kademeli olarak değiştirilerek çözümler yapılmış ve kiriş davranışındaki değişiklikler Tablo 3'de gösterilmiştir.



a-"Epoksi sıyrılma" davranışı
a-Slip behavior of epoxy

b-"HM-CFRP kopma" davranışı
b-Rapture behavior of HM-CFRP

Şekil 4. Göçme modunun belirlenmesi
(Figure 4. Defining failure modes)

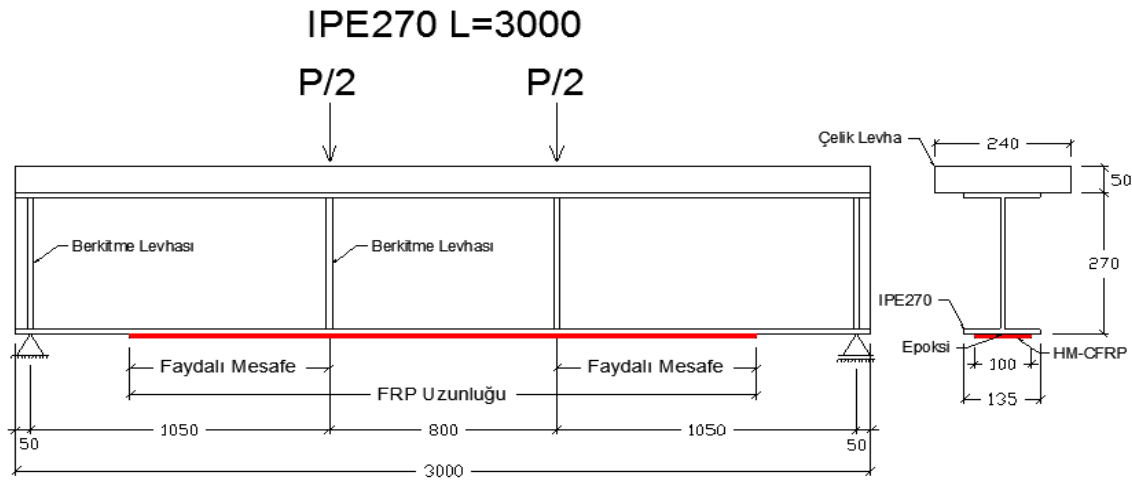
Şekil 4'de yapıştırıcı ve epoksinin eğilme davranışı altında gerilme durumları verilmiştir.

Şekil 4a'da yapıştırıcı dayanımına ulaşmış ancak HM-CFRP maksimum dayanıma ulaşmadığı için hala yük alabilmektedir. Dolayısı ile kısa faydalı mesafede kiriş davranışında epoksi davranışı etkili olmuştur.

Faydalı mesafenin tam anlamıyla yeterli olmaması durumunda, HM-CFRP'nin çalışabildiği oranda dayanım artışı olmaktadır. Şekil 4b'de ise yapıştırıcı ile HM-CFRP beraber maksimum dayanıma ulaşmışlardır. Dolayısı ile yeterli faydalı mesafede kiriş davranışında HM-CFRP etkilidir. Ayrıca yüksek güçlendirme oranlarında da, faydalı mesafe yeterli uzunlukta olsa bile HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması meydana gelebilmektedir (Şekil 4b). Tablo 3 ve 4'deki ''Epoksi Sıyrılıyor'', ''HM-CFRP Kopuyor'' ifadesi bu anlamda kullanılmıştır.

5.1.2. IPE 270 Kirişi (IPE 270 Beam)

Faydalı mesafenin kiriş davranışına olan etkisini araştırmak için seçilen IPE 270 profilinden oluşan kirişin geometrik özellikleri Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. IPE 270 L=3000mm kirişi
(Figure 5. IPE 270 beam with L=3000mm)

IPE 270 profilinden oluşan modellerde farklı HM-CFRP oranları için faydalı mesafe kademeli olarak değiştirilerek çözümler yapılmış ve kiriş davranışına olan etkiler Tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 4. IPE 270 L=3000mm kirişinde göçme modları
 Table 4. Failure modes in IPE 270 with L=3000 mm

| IPE 270 KİRİŞİ L=3000 | | | | | | | | SONUÇ |
|-----------------------|---------------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------|
| Kiriş Uz. (mm) | Profil Alanı (mm ²) | Faydalı Mesafe (mm) | FRP Uzunluğu (mm) | FRP Kalınlığı (mm) | FRP Genişliği (mm) | FRP Alanı (mm ²) | Oran (FRP A. / Profil A.) | Toplam Yük (kN) |
| 3000 | 4590 | 400 | 1600 (%54) | 1,60 | 100 | 160 | 3,5% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 600 | 2000 (%66) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 700 | 2175 (%73) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 4590 | 200 | 1200 (%40) | 1,75 | 100 | 175 | 3,8% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 400 | 1600 (%54) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 600 | 2000 (%66) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 700 | 2175 (%73) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 4590 | 400 | 1600 (%54) | 1,92 | 100 | 192 | 4,2% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 600 | 2000 (%66) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 700 | 2175 (%73) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 4590 | 600 | 2000 (%66) | 2,11 | 100 | 211 | 4,6% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 700 | 2175 (%73) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 900 | 2000 (%87) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 4590 | 600 | 2000 (%66) | 2,33 | 100 | 233 | 5,1% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 700 | 2175 (%73) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 900 | 2000 (%87) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 4590 | 600 | 2000 (%66) | 2,82 | 100 | 282 | 6,1% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 700 | 2175 (%73) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 900 | 2000 (%87) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 4590 | 600 | 2000 (%66) | 3,07 | 100 | 307 | 6,7% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 700 | 2175 (%73) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 900 | 2000 (%87) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 4590 | 600 | 2000 (%66) | 3,37 | 100 | 337 | 7,3% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 700 | 2175 (%73) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 900 | 2000 (%87) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 4590 | 600 | 2000 (%66) | 3,70 | 100 | 370 | 8,1% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 700 | 2175 (%73) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 900 | 2000 (%87) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 4590 | 600 | 2000 (%66) | 4,07 | 100 | 407 | 8,9% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 700 | 2175 (%73) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 900 | 2000 (%87) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 4590 | 600 | 2000 (%66) | 4,47 | 100 | 447 | 9,7% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 700 | 2175 (%73) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 900 | 2000 (%87) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 4590 | 600 | 2000 (%66) | 4,91 | 100 | 491 | 10,7% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 700 | 2175 (%73) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 900 | 2000 (%87) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |
| 3000 | 4590 | 600 | 2000 (%66) | 5,40 | 100 | 540 | 11,8% | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 700 | 2175 (%73) | | | | | Epoksi Sıyrılıyor |
| | | 900 | 2000 (%87) | | | | | HM-CFRP Kopuyor |

IPE 160 ve IPE 270 profillerinden oluşan modellerin çözüm sonuçlarından görüldüğü üzere, HM-CFRP kopmadan önce epoksi sıyrılmasını önlemek için gerekli minimum faydalı mesafe, HM-CFRP oranları için farklı değerler almaktadır. Ancak, dayanım artışı için kullanılacak HM-CFRP miktarı ve boyu hem ekonomik olarak, hem de verimlilik açısından değerlendirilerek optimum bir sınır değer kabul etmek gerekmektedir.

Tablo 3'deki IPE 160 profilinden oluşan modellerin çözüm sonuçlarına bakılacak olursa, faydalı mesafenin 900mm değeri (FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %87'si) HM-CFRP oranının %11 değerine kadar yeterli olmaktadır. Tablo 4'deki IPE 270 profilinden oluşan modellerin çözüm sonuçlarına bakılacak olursa, faydalı mesafenin 900mm değeri (FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %87'si) HM-CFRP oranının %9 değerine kadar

yeterli olmaktadır. Daha fazla oranda güçlendirme yapmak teorik olarak mümkün olsa bile pratik olarak mümkün değildir. Çünkü belirli kalınlığa kadar HM-CFRP üretilmektedir, daha fazla oranda güçlendirme yapmak için çok miktarda HM-CFRP'nin üst üste birbirine yapıştırılması gerekmektedir. Üst üste birbirine yapıştırılmış HM-CFRP'lerin verimli olup olamayacağı da bilinmemektedir.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Sonlu elemanlar metodu ile non-linear modelleme teknikleri kullanılmıştır. Çelik, epoksi ve HM-CFRP'den oluşan kompozit bir elemanın davranışı deney davranışı ile karşılaştırıldığında %5'lik farkla doğrulanmıştır. Bu çalışmada bu gerçelleme yeterli yaklaşımdadır.

Tablo 3'deki %3.5 oranında güçlendirilmiş IPE 160 L=3000mm kirişi, laboratuvar deneyinde kullanılan gerçek numunelerinin numerik modelidir. Deney numunelerinin faydalı mesafesi 800mm'dir. Tablodan görüleceği üzere, epoksi sıyrılması; %3.5 HM-CFRP oranı için faydalı mesafe 600mm'ye kadar meydana gelmektedir. Faydalı mesafe 600 mm'den sonra ise HM-CFRP kopması olmaktadır. Bu davranış deney ve bilgisayar modeli ile doğrulanmıştır. Her ikisinde de HM-CFRP kopma davranışı görülmüştür. Parametrik çalışma kısmında ise; HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması olmaması için aşağıdaki kriterler elde edilmiştir;

- HM-CFRP oranı, %3.5 ile %3.8 için faydalı mesafe 688mm'den, FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %73'ünden küçük olmamalıdır.
- HM-CFRP oranı, %4.2 ile %9 arasında faydalı mesafe 870mm'den, FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %84'ünden küçük olmamalıdır.
- HM-CFRP oranı, %9.7 ile %10.9 için faydalı mesafe 900mm'den, FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %87'sinden küçük olmamalıdır.
- HM-CFRP oranı, %11.9 ile %13.1 için faydalı mesafe 950mm'den, FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %90'ından küçük olmamalıdır.

HM-CFRP oranı, %14.5'den sonra faydalı mesafe yeterli uzunlukta olsa bile HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması meydana gelmektedir. Dolayısı ile HM-CFRP ile epoksinin beraber çalışması için, belirli bir kritik noktaya kadar, güçlendirme oranı artıkça gerekli bağlanma boyu artmıştır. Benzer davranış IPE 270 kirişinde gözlemlenmiştir.

HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması olmaması için;

- HM-CFRP oranı, %3.5 ile %3.8 için faydalı mesafe 700mm'den, FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %73'ünden küçük olmamalıdır.
- HM-CFRP oranı, %4.2 ile %8.9 arasında faydalı mesafe 900mm'den, FRP uzunluğu kiriş uzunluğunun %87'sinden küçük olmamalıdır.

HM-CFRP oranı, %9.7'den sonra faydalı mesafe yeterli uzunlukta olsa bile HM-CFRP kopma dayanımına ulaşmadan epoksi sıyrılması meydana gelmektedir. Burada da belirli bir kritik noktaya kadar, güçlendirme oranı artıkça gerekli bağlanma boyu artmıştır.



REFERANSLAR (REFERENCE)

1. Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H., (2003). Strengthening of steel-concrete composite girders using carbon fiber reinforced polymer sheets. *Journal of Structural Engineering*, Volume:129, Number:2, pp:30-40.
2. Alsayed, S.H., Al-Salloum, Y.A., and Almusallam, T.H., (2000). Fibre-reinforced polymer repair materials-some facts. *Proceeding of the Inst Civ Eng*, Volume:138, Number:3, pp:131-4.
3. Dawood, M., Rizkalla, S., and Sumner, E.A., (2007). Fatigue and overloading behavior of steel-concrete composite flexural member strengthened with high modulus materials. *J Compos Construct*, Volume 11, Number:6, pp:659-669.
4. Rizkalla, S., Dawood, M., and Schnerch, D., (2008). Development of carbon fiber reinforced polymer system for strengthening steel structures. *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, pp:388-397, United States.
5. Dawood, M. and Rizkalla, S., (2006). Bond and splice behavior of high modulus CFRP materials bonded to steel structures. *Third International Conference on FRP composites in Civil Engineering*, USA.
6. Dawood, M., Rizkalla, S., and Sumner, E.A., (2006). Fundamental characteristics of high modulus CFRP materials for strengthening of steel-concrete composite beams. *Proceedings for Structural Faults & Repair*, Scotland.
7. Buyukozturk, O., Günes, O., and Karaca, E., (2004). Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites. *Construct Build Mater*, Volume: 18, Number:1, pp:9-19.
8. Hollaway, L.C. and Cadei, J., (2002). Progress in the technique of upgrading metallic structures with advanced polymer composites. *Prog Struct Eng Mater*, Volume: 4, Number:2, pp:131-48.
9. Colombi, P. and Poggi, C., (2006). An experimental analytical and numerical study of the static behavior of steel beams reinforced by pultruded CFRP strips. *Composites Part B*, Volume: 37, Number:1, pp: 64-73.
10. Ağcakoca, E., "Developing Method For Repairing And Strengthening I-Section Steel-Concrete Composite Beams With HM-CFRP". PhD Thesis, SAU.
11. Dawood, M., Sumner, E.A., and Rizkalla, S., (2006). Fundamental characteristics of new high modulus CFRP materials for strengthening steel bridges and structures, USA.
12. Tavakkolizadeh, M., Saadatmanesh, H., (2001). Galvanic corrosion of carbon and steel in aggressive environments. *Journal of Composites for Construction*, Volume:5 , Number:3, pp: 200-210.
13. Tavakkolizadeh, M. and Saadatmanesh, H., (2003). Repair of damaged steel-concrete composite girders using carbon fiber-reinforced polymer sheets. *Journal of Composites for Constructions*, Volume: 7, Number:4, pp: 311-322.
14. Miller, T.C., Chajes, M.J., and Hasting, J.N., (2001). Strengthening of a steel bridge girder using CFRP Plates. *Bridge Engineering*, Volume: 6, Number:6, pp: 514-522.



15. Al-Saidy, A.H., Klaiber, A.H., and Wipf, T.J., (2004). Repair of steel composite beams with carbon fiber reinforced polymer plates. *Journal of Composites for Construction*, Volume:8, pp:163-172, Oman.
16. Gargia, J.A., Chiminelli, A., Lizaranzu, M., and Jimenez, M.A., (2010). Characterization and material model definition of toughened adhesives for finite element analysis. *International Journal of Adhesion*, Volume: 31, Number:4, pp:182-192.
17. Dawood, M., Schnerch, D., Sumner, E.A., and Rizkalla, S., (2006). Strengthening steel bridges with new high modulus CFRP materials. *International Conference on Bridge Maintenance Safety and Management*, Portugal.
18. Sallam, H.E.M., Seleem, M.H., and Sharaky, I.A., (2008). Failure analysis of strengthened steel I-beams by bonded CFRP plates. *Mansoura Eng J EGYPT*, Volume:3, Number:2, pp:48-65.