



## CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin sonlu elemanlar parametrik analizleri

**Zeynep FIRAT ALEMDAR\***

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul  
[zalemdar@yildiz.edu.tr](mailto:zalemdar@yildiz.edu.tr) ORCID: 0000-0002-0793-8582, Tel: 0 (212) 383 5142

**Nasibe İNKAYA**

Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul  
[nasibe.03@gmail.com](mailto:nasibe.03@gmail.com) ORCID: 0000-0003-2575-7432

Geliş: 02.10.2018, Revizyon: 27.12.2018, Kabul Tarihi: 15.01.2019

### Öz

Depremselliğin önemli olduğu Türkiye’de yapı elemanları, yatay yükler altında gerekli ve yeterli performansı gösterebilmeleri açısından, yük taşıma kapasitesinde ve sistem sünekliğinde önemli artışa neden olan lifli polimer (LP) malzeme ile güçlendirilmektedir. Bu çalışmada, doğrusal olmayan sonlu eleman yöntemi kullanılarak LP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin, doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada geçmişte yapılan deneysel çalışmalar dikkate alınarak ANSYS programında sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Literatürdeki deneysel çalışmalarda kullanılan CFRP malzemenin sistem olarak mekanik özellikleri ASTM D7522 standartlarına uygun olarak laboratuvar şartlarında test edilmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen CFRP sisteme ait malzeme özellikleri sonlu elemanlar modellerinde dikkate alınmış ve betonarme kirişler statik yükler altında analiz edilmiştir. Sonlu eleman modelleri CFRP genişliği, uygulanan karbon lif kat adedi ve kiriş yan yüzeylerindeki sargı yüksekliğine bağlı olarak farklılaştırılarak CFRP sistemin kiriş performansı üzerine etkileri araştırılmıştır. Uygulanan CFRP sistemin kiriş tabanındaki genişliğinin ve CFRP sistemdeki karbon fiber katman sayılarının artırılması ile betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesinin arttığı görülmektedir. Kiriş yan yüzeylerinin de CFRP ile sarılması durumunda, kirişin sadece alt yüzeyinin güçlendirildiği referans kirişe göre yük taşıma kapasitesinde önemli bir artış gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sonlu elemanlar yöntemi, lifli polimer, güçlendirme, sıyrılma testi

\* Yazışmaların yapılacağı yazar

## Giriş

Geleneksel güçlendirme yöntemlerine (mantolama, çelik levha kullanımı ve epoksi enjeksiyonu uygulaması gibi) ilave olarak betonarme yapı elemanlarının onarım ve güçlendirilmesinde lifli polimer kullanılması 1980'li yılların ortalarından itibaren günümüze kadar yaygınlaşmıştır. Lifli Polimerler (Fiber Reinforced Polymer, FRP) isimlerini içinde bulundurduğu malzemeye göre alırlar. Örneğin; Karbon Lifli Polimer (CFRP; carbon fiber reinforced polymer), Cam Lifli Polimer (GFRP; glass fiber reinforced polymer), Aramid Lifli Polimer (AFRP; aramid fiber reinforced polymer). Betonarme kirişlerin dışardan FRP uygulanarak güçlendirilmesi, bu kompozit malzemenin yüksek dayanım-ağırlık oranı, iyi korozyon direnci, farklı kesit şekilleri ve köşelere uygulanabilirlik özellikleri açısından etkin bir metod olarak kabul edilmektedir (Yang vd., 2008).

Karbon lifli polimerler kullanılarak güçlendirilmiş yapısal elemanlarla ilgili deneysel ve teorik sayısız çalışma bulunabilir. Deneysel çalışmalar genellikle CFRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin eğilme ve kesme etkisine karşı dayanımını belirlemek, korozyon aktivitesini araştırmak, beton ve FRP arasındaki bağ davranışını incelemek ve enerji sönümlenme oranlarının tespiti üzerine yoğunlaşmıştır (Pham ve Al-Mahadi, 2004; Gheorghiu vd., 2007; Masoud ve Soudki, 2006; Jianzhuang vd., 2004; Lee ve Hausmann, 2004; Çetinkaya vd., 2004; Alsayed, 1998; Khalifa ve Nanni, 2000). CFRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin rijitlik, yük taşıma, kesme kuvveti, süneklik ve enerji sönümlenme kapasitelerinin önemli oranda arttığı ve korozyon nedeni ile ana donatıdaki kütle kaybının azaldığı gözlemlenmiştir.

Ayrıca son yıllarda CFRP ile güçlendirilmiş veya onarılmış betonarme kolon elemanlarına ait çalışmalar yapılmış ve bina ve köprü kolonlarında bu güçlendirme tekniğinin pratik bir yöntem olduğu belirtilmiştir (Özcan vd., 2008; Bousias vd., 2004; Iacobucci vd., 2003; Sause vd., 2004; Seible vd., 1997; Sheikh ve Yau, 2002;

Xiao ve Ma, 1997). İlk tam ölçekli deneysel çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi ve karbon elyaf üreticisi DowAksa işbirliği ile yapılmıştır. Bu çalışmada Yalova'da tam ölçekli, aynı temel ve yapı malzemeleri kullanılarak 2007 Deprem Yönetmeliği'nden önceki geleneksel yöntemler ile üç katlı iki adet bina inşa edilmiştir. Binaların birinde kolonlar yüksek mukavemetli CFRP malzeme ile güçlendirilmiş, diğer binada güçlendirme yapılmamıştır. CFRP ile güçlendirilmiş bir binanın olası bir depremde nasıl davranış göstereceği karşılaştırılmalı olarak test edilmiştir. Sismik şok simülasyonu uygulanan test sonunda, CFRP malzeme ile güçlendirilen bina ayakta kalırken, güçlendirilmeyen bina ise yıkılmıştır (Şekil 1). Güçlendirilmeyen bina 3. günün sonunda 0,0135 öteleme oranında yıkılmasına rağmen güçlendirilen bina 0,15 öteleme oranında dahi yıkılmamıştır (Pitilakis, 2018).



Şekil 1. Yıkılan bina ve FRP ile güçlendirilip ayakta kalan bina

Literatürdeki teorik çalışmaların çoğu ise FRP ile güçlendirilen betonarme ve çelik kirişlerin sonlu eleman (SE) analizlerini kapsamaktadır. Bu çalışmalarda, FRP'yi uygularken kullanılan yapıştırıcının doğrusal olmayan davranışı, yüzeyden ayrışma mekanizmaları ve arayüz gerilmelerini etkileyen parametreler (yapıştırıcının kalınlığı, yapıştırıcı türü ve beton yüzeyinin durumu) incelenmiştir (Rabinovitch, 2005; Sayın ve Manisalı, 2009; Büyüköztürk vd., 2003). Ayrıca analitik modellere uygun olarak deney numuneleri laboratuvar ortamında üretilmiştir. Deneysel sonuçlar nümerik analizler ile karşılaştırılmış ve birbirine oldukça benzer yük- sehim eğrileri elde edilmiştir. Nümerik

sonuçlar incelendiğinde, yapıştırıcı kalınlığının artırılması FRP uzunluğu boyunca kenar kısımda oluşan normal ve kayma gerilmelerinde ve kirişin sehim miktarında azalmaya, fakat kirişlerin ani göçme yapma olasılığına neden olduğunu göstermiştir (Sayın ve Manısalı, 2009). Lineer elastik, nonlineer elastik ve elasto plastik yapıştırıcılar kullanılarak FRP ile güçlendirilen kirişlerin yük taşıma kapasitesinin ve sünekliklerinin arttığı ve plastik mafsals mekanizması oluşmasının sağlandığı görülmüştür (Rabinovitch, 2005).

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak CFRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin plastik (doğrusal olmayan) analizleri gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki deneysel çalışmalarda kullanılan CFRP malzemenin sistem olarak mekanik özellikleri ASTM D7522 standartlarına uygun olarak test edilmiş ve SE modelinde dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmalarla doğrulanan modelde CFRP'nin genişliğinin ve kat adedinin değiştirilmesi ve kirişin yan yüzeylerinin CFRP ile sarılması durumuna göre betonarme kirişlerin yapısal davranışı irdelenmiştir.

### Sıyırılma Testi

ASTM D7522 standardı, epoksi kullanılarak beton yüzeye yapıştırılan CFRP sistemin yüzeyden sıyırılma dayanımını ölçebilmek için test yöntemini tanımlamaktadır. Bu doğrultuda, 100 mm çapa sahip 50 mm yüksekliğinde bir adet ve 100 mm çapa sahip 100 mm yüksekliğinde iki adet silindirik beton numune sıyırılma deneyleri için üretilmiştir. Birincisine 3 kat CFRP, ikincisine 5 CFRP ve üçüncüsüne 7 kat CFRP sarılarak sargı katman sayısının etkisi incelenmiştir.

Test için kullanılan epoksi MasterBrace SAT 4500 lifli polimer sistemi için geliştirilmiş epoksi yapıştırıcısıdır. İki bileşenli, yüksek dayanımlı, solvent içermeyen ve mavi renkli epoksi esaslı özel yapıştırıcı olup FRP sistemi ile güçlendirilecek elemanlarda karbon/cam lifli polimer malzemenin yüzeye yapıştırılması amacıyla kullanılır. Mekanik dayanımlarının yüksek olması, kolay uygulanabilir olması ve

düşük viskoziteye sahip olması sebebiyle tercih edilir. Deneyde kullanılan MasterBrace FRP 300/50 CFH (Yüksek modüllü karbon lifli polimer kumaş) çok hafif ve kolay taşınabilir olması, iki yönde de istenilen ölçülerde kolayca kesilebilir olması, tek yönlü sürekli liflerden oluştuğu için eğilme ve kesmeye karşı yapılan güçlendirmelerde tasarım ve uygulama açısından büyük kolaylık sağlaması, yorulma dayanımının yüksek olması ve sünme değerinin çok düşük olması sebebiyle tercih edilmiştir.

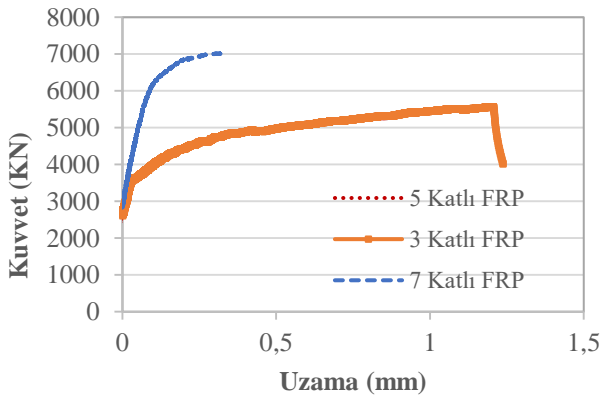
Uygulama öncesinde karbon fiber kumaşlar numunelere göre kesilmiş ve beton numunelerin üst yüzeyleri astarlandıktan sonra epoksi malzeme 0,8-1 mm kalınlık elde edecek şekilde rulo ile sürülmüştür. Kesilmiş lifli polimer kumaşlar FRP lifleri doğrultusunda gerilerek yüzeye yapıştırılmıştır. Yapıştırıcının kumaş içine emilmesi için rulo ile lifler doğrultusunda bastırılarak hava boşlukları alınmıştır. Bu şekilde 1. numuneye 3 kat, 2. numuneye 5 kat ve 3. numuneye 7 kat olacak şekilde kumaş rulo ile bastırılarak yapıştırıcı içinde lamine edilmiştir. İlk kat için 1,8 kg/m<sup>2</sup>, sonraki her kat için 0,8 kg/m<sup>2</sup> epoksi kullanılmıştır. En üst kata 10 mm kalınlığında dairesel çelik plaka yerleştirilip kurumaya bırakılmıştır.

Daha sonra INSTRON test cihazına numune yerleştirilmiş ve test yüzeyine normal kuvvet uygulanarak sıyırılma testine tabi tutulmuştur (Şekil 2). Kuvvetin uygulanacağı çelik tutamak dikkatli hizalanmalıdır. Bu durum simetrik olmayan ya da karışık modda kopmanın önüne geçecektir. Sıyırılma deneyinde uygulanan kuvvetin yükleme hızı ASTM D7522 Standardının 11.8 maddesine göre 1 MPa/dk olacak şekilde uygulanmıştır. Ayrılma gerçekleşene kadar teste devam edilmiştir.



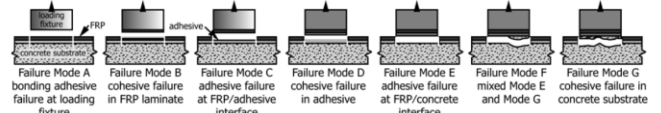
Şekil 2. Sıyırılma testi düzeneği

3 katlı karbon lifle güçlendirilmiş beton numune 3600 N, 5 katlı karbon lifle güçlendirilmiş beton numune 5550 N ve 7 katlı karbon lifle güçlendirilmiş beton numune 7000 N normal kuvvet değerine ulaşıncaya kopma dayanımına ulaşmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Sıyırılma testi kopma dayanım grafiği

ASTM D7522 Standardına göre toplamda 7 tip kopma modu vardır. Bunlar A, B, C, D, E, F ve G tipi kopma modlarıdır (Şekil 4). Deney sonuçlarına göre; 3 katlı FRP ile güçlendirilen numune F tipinde, 5 ve 7 katlı FRP ile güçlendirilen numune B tipi kopmaya örnek verilebilir (Şekil 5).



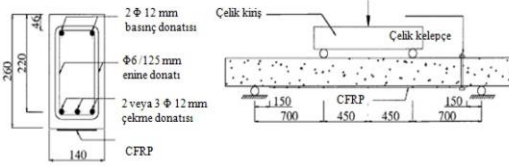
Şekil 4. Sıyırılma testine göre kopma modları



Şekil 5. Sırasıyla soldan F, B ve B tipi kopma modları

### Sonlu Elemanlar Analizi

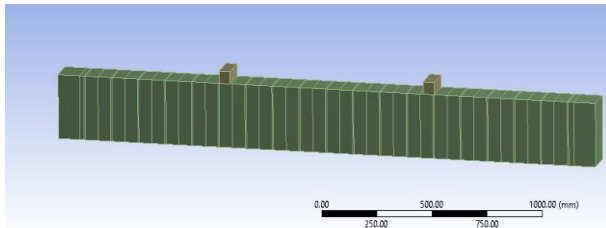
Literatürde bulunan deneysel çalışmaların sonlu elemanlar modelinin oluşturulması için ANSYS Workbench programı kullanılmıştır. Analizler "Static Structural" modülü ile yapılmış ve çözümlemeye statik yükler dikkate alınmıştır. Pham ve Al-Mahadi araştırmacılarının yaptıkları test çalışmalarının sonlu elemanlar çözümlemesi oluşturulmuştur. Söz konusu araştırmacılara ait deney numunelerinde açıklığı 2300 mm, genişliği 140 mm ve yüksekliği 260 mm olan betonarme kirişler kullanılmıştır (Pham ve Al-Mahadi, 2004). Çalışmadaki test elemanlarından iki kat CFRP kullanılarak alt yüzeyi güçlendirilmiş bir kiriş dikkate alınmıştır. Bu kirişte 12 mm çapında 2 veya 3 adet çekme donatısı, 12 mm çapında 2 adet basınç donatısı ve 6 mm çapında 90 mm aralıkla enine donatı kullanılmıştır. Boyuna ve enine donatıların akma dayanımları sırası ile 504 ve 423 MPa olarak belirlenmiştir. Kirişlerin basınç dayanımı, kontrol kirişi için 57,7 MPa ve CFRP uygulanan kirişler için ortalama 47,7 MPa'dır. Modellemesi yapılan kiriş detayı Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. CFRP ile güçlendirilen kiriş detayı

### Geometrinin Oluşturulması

Beton kiriş, basınç donatıları, çekme donatıları, enine donatı ve CFRP malzeme 3 boyutlu olarak ANSYS programında tanımlanmıştır. Beton kiriş elemanın en kesit geometrisi  $140 \times 260 \text{ mm}^2$  ve kiriş toplam boyu 2500 mm olarak alınmıştır. Model oluşturulurken CFRP kompozitin sonlu eleman noktaları beton elemanın sonlu eleman noktalarına yapıştırılmıştır. Karbon lifli polimer kumaşların kiriş alt yüzeyine yapışması için kullanılan epoksi malzemesi modellenmemiştir. Enine ve boyuna donatılar yüzey alanı aynı kalacak şekilde modelde sonlu elemanlarına ayırma kolaylığı bakımından kare kesit olarak tanımlanmıştır. Yük aktarımı sağlanacak olan bölgeler  $50 \times 50 \text{ mm}$  kesitli 140 mm uzunluğunda çelik plaka olarak modellenmiştir. Şekil 7'de iki katlı FRP kompozitle güçlendirilen betonarme kirişin geometrisi görülmektedir.

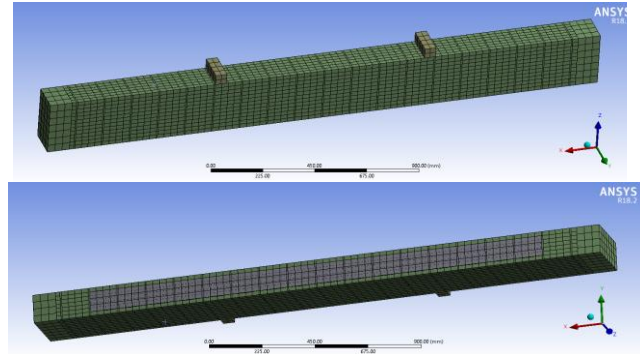


Şekil 7. Güçlendirilmiş kirişin üç boyutlu modeli

### Mesh: Elemanlara Ayırma İşlemi

Sonlu elemanlar programlarında uygulanan mesh işlemi kullanıcının olabildiğince hızlı simülasyon yapması için en doğru ağı oluşturmasını sağlar. Bu çalışmada sonlu eleman tipi "Multizone" olarak seçilmiştir. Temas yüzeylerdeki elemanların sayısının daha fazla olması çözüm hassasiyeti açısından önemlidir. Bu nedenle sonlu eleman ağının boyutu, boyuna donatı kesitinin ölçüsü olan 11 mm olarak seçilmiştir. Modelin sonlu eleman ağı Şekil 8'de gösterilmiştir. Modelde 100.249 adet düğüm

noktası ve yaklaşık 15000 adet eleman bulunmaktadır.



Şekil 8. Modelin sonlu eleman ağı (üstten ve alttan görünüşü)

### Mesnet ve Deplasman Koşullarının Belirlenmesi

Sonlu elemanlar programında literatürdeki deneysel çalışmadan elde edilen 30 mm yer değiştirme değeri üç boyutlu modelde tanımlanan çelik plaka yüzeyine yük olarak verilmiştir. Kiriş alt yüzeyine tanımlanan mesnetler kiriş boyuna doğrultusunda (X eksen) hareket edecek, kiriş enkesit eksenlerinde (Y ve Z eksenleri) sabit olacak şekilde mesnet koşulları belirlenmiştir.

### Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Programın malzeme veri tabanından beton malzeme için "Linear İzotropik" ve "Multilinear İzotropik Hardening" malzeme tanımları yapılmıştır. Betonun basınç mukavemet değeri yapılan laboratuvar deneylerinden 47,7 MPa olarak ölçüldüğünden, Elastisite modülü değeri 34530 MPa olarak hesaplanmıştır. Modelde Elastisite modülü çatlamış betonarme kesit hesabı dikkate alındığından %20 değerine düşürülerek 6906 MPa olarak tanımlanmıştır. Betonun maksimum birim şekil değiştirme değeri 0,004 ve Poisson oranı 0,2 alınmıştır. Beton için Multilinear Isotropic malzeme tanımı Şekil 9'daki gibidir.

Table of Properties Row 12: Multilinear Isotropic Hardening		
A	B	C
1 Temperature (C)	1 Plastic Strain (m m <sup>-1</sup> )	Stress (Pa)
2	2 0	3.09E+06
*	3 0.0001	1.52E+07
	4 0.0009	3E+07
	5 0.0014	3.6E+07
	6 0.0019	4.77E+07
	7 0.0039	4.77E+07
	*	

Şekil 9. Betonun multilinear isotropic malzeme tanımı

Betonun basınç ve çekme yükleri altındaki davranışı farklı olduğundan programda ayrıca Drucker - Prager beton modeli tanımlanmıştır. Bu özellik sayesinde betonun tek eksenli basınç dayanımı 47,7 MPa, tek eksenli çekme dayanımı 0,5 MPa ve çift eksenli basınç dayanımı 48 MPa olarak girilmiştir (Şekil 10).

Drucker-Prager		
Drucker-Prager Base		
Uniaxial Compressive Strength	47.7	MPa
Uniaxial Tensile Strength	0.5	MPa
Biaxial Compressive Strength	48	MPa

Şekil 10. Drucker - Prager beton modeli

Modelde çelik donatılar ve yükleme plakaları için homojen ve izotropik malzeme kullanılmış ve boyuna donatı 11\*11 mm<sup>2</sup>, enine donatı 6\*6 mm<sup>2</sup> kare kesitli olacak şekilde modellenmiştir. Modelde Elastisite modülü ve Poisson oranı lineer izotropik malzeme modeliyle; akma ve pekleşme dayanımları ise çok doğrulu izotropik pekleşmeli malzeme modeliyle yapılmıştır (Şekil 11).

Table of Properties Row 12: Multilinear Isotropic Hardening		
A	B	C
1 Temperature (C)	1 Plastic Strain (m m <sup>-1</sup> )	Stress (Pa)
2	2 0	5.04E+08
*	3 0.00595	5.04E+08
	4 0.09795	5.99E+08
	*	

Şekil 11. Çeliğin multilinear isotropic malzeme tanımı

Modellemede dikkate alınan deney numunesinde, kullanılan 2 katlı CFRP malzeme 100\*2000 mm boyunda ve 0,76 mm kalınlığında tanımlanmıştır (Şekil 8). Pham ve Al-Mahadi araştırmacılarının yaptıkları test çalışmalarında kullanılan CFRP kumaşlar için ölçülen Elastisite

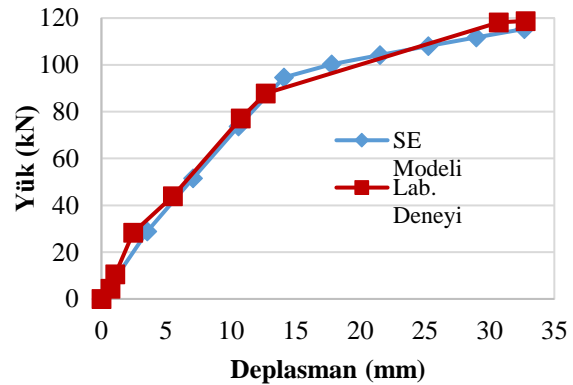
modülü ve çekme dayanımı değerleri sırası ile 213500 ve 3900 MPa verilmiştir (2004). Modelde epoksi elemanı dikkate alınmadığından, ASTM D7522 Standardına göre YTÜ Yapı laboratuvarında yapılan sıyırma deneylerden elde edilen Şekil 3'deki grafiğe göre 7 katlı CFRP sistem için çekme dayanımı (1) eşitliği ile hesaplanmıştır.

$$\sigma_c = 7000/7850 = 0,892 \text{ MPa} \quad (1)$$

Elastisite modülü ise Şekil 3'deki grafiğin eğiminden 44.583 MPa olarak hesaplanmıştır. CFRP sistem için izotropik malzeme tanımı yapıp deneylerden elde edilen Elastisite modülü ve çekme dayanımı değerleri programa tanımlanmıştır.

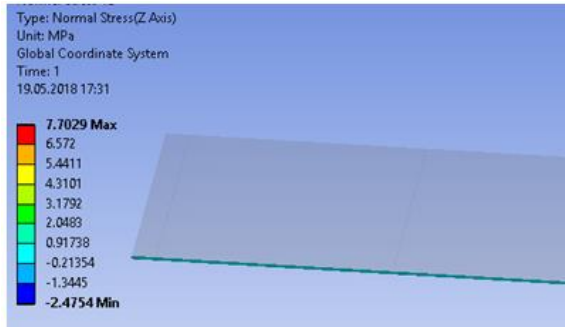
## Deneyel Çalışma ile Sonlu Eleman Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Sonlu elemanlar modelinin doğrulanması için, Pham ve Al-Mahadi araştırmacılarından referans alınan S3b isimli kirişe ait açıklık ortası yer değiştirme ve göçme yükü değerleri üç boyutlu üretilen ANSYS modelinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Laboratuvar testi sonuçlarında açıklık ortasında ölçülen yer değiştirme değeri 32 mm ve göçme anındaki yük değeri 118 kN elde edilmiştir. Sonlu elemanlar analiz sonuçlarında ise açıklık ortasındaki yer değiştirme 32 mm iken kiriş üzerindeki toplam yük değeri 115 kN hesaplanmıştır. Şekil 12'de elde edilen yük-deplasman eğrilerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 12. ANSYS modelin ve Pham araştırmacısının yük - deplasman eğrisi

CFRP sistemin Z eksenindeki (malzemeye dik doğrultuda çekmeye çalışan eksen) gerilme dağılımı Şekil 13'de gösterilmiştir. Sonlu elemanlar modelinden elde edilen gerilme değerlerinin, ASTM D7522 standardına göre yapılan CFRP sisteme ait deneyde bulunan kopma dayanım (0,892 MPa) değerini aştığı tespit edilmiştir. Ayrıca eğilme testi sonucu hasar görmüş kiriş incelendiğinde CFRP sistemin beton yüzeyden tamamen ayrıldığı aynen analiz sonuçlarından elde edildiği gibi görülmektedir (Şekil 14).



Şekil 13. CFRP sistemin Z eksenindeki gerilme dağılımı

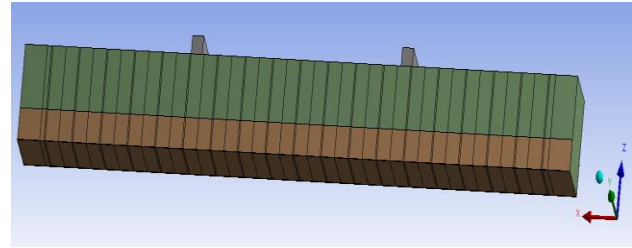


Şekil 14. S3b beton kirişinde CFRP kopma bölgesi

#### Parametrik Sonlu Eleman Analizleri

Analizde referans alınan S3b kirişi geometrik özellikleri ve malzeme karakteristik değerleri sabit tutularak, CFRP sistemin kullanım durumuna göre gruplandırılmış ve parametrik olarak irdelenmiştir. Betonun alt yüzeyindeki CFRP malzemenin genişliğine, kat adedine ve

kirişin yan yüzeylerini sarmasına bağlı olarak sırasıyla B1, B2 ve B3 şeklinde gruplar oluşturulmuştur. G sembolü CFRP'nin kiriş alt yüzeyindeki genişliğini göstermektedir ve bu genişlik analizlerde 80, 100 ve 140 mm değerler almaktadır. K sembolüyle gösterilen kirişler CFRP sisteminin oluşturan karbon fiber liflerin kaç katlı olarak kullanıldığını ifade etmektedir ve kat adedi 2, 3 ve 4 olarak alınmıştır. H sembolüyle gösterilen kirişler ise betonarme kirişin alt yüzünün tamamının kaplı ve ön ve arka yan yüzeylerinin belirli bir yüksekliğinin CFRP ile güçlendirildiğini göstermektedir. Tablo 1'de farklı kiriş modellerine ait ayrıntılar verilmiştir. Şekil 15'de B3H86 kirişine ait sonlu elemanlar modeli yer almaktadır.



Şekil 15. B3H86 kirişine ait SE modeli

Tablo 1. Kirişlerin adlandırılması

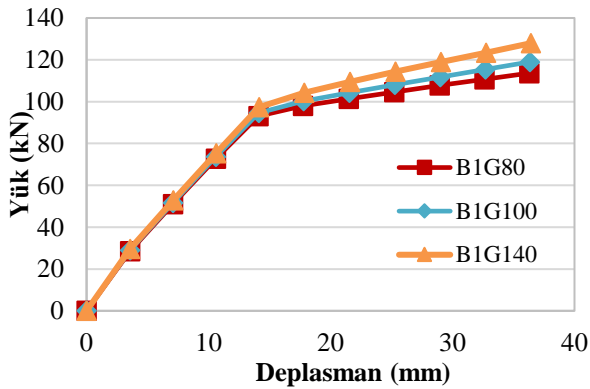
Kiriş Adı	Açıklaması
B1G80	80 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş kiriş
B1G100	100 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş kiriş
B1G140	140 mm genişlikte CFRP ile güçlendirilmiş kiriş
B2K2	2 kat CFRP ile güçlendirilmiş kiriş
B2K3	3 kat CFRP ile güçlendirilmiş kiriş
B2K4	4 kat CFRP ile güçlendirilmiş kiriş
B3H86	Yan yüzeyleri 86 mm yükseklikte CFRP ile güçlendirilmiş
B3H130	Yan yüzeyleri 130 mm yükseklikte CFRP ile güçlendirilmiş
B3H172	Yan yüzeyleri 172 mm yükseklikte CFRP ile güçlendirilmiş

Parametrik sonlu eleman analizleri ANSYS SE programı ile yapılmıştır. CFRP sisteminin kiriş

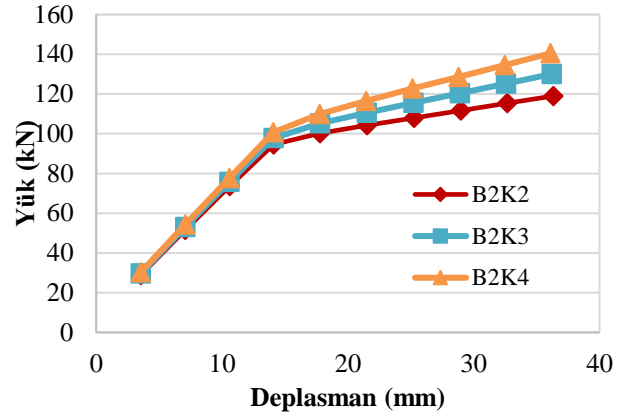
tabanındaki genişliğinin arttırılması, betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesini arttırmıştır. B1G80 isimli kirişin CFRP sistem genişliği referans kirişe göre 20 mm kısa olduğundan yük taşıma kapasitesinin %5 azaldığı görülmektedir. B1G140 kirişinde ise yük taşıma kapasitesinin %7 arttığı Şekil 16'de verilmiştir.

Kirişin yük taşıma kapasitesi ile CFRP sistemdeki karbon fiber liflerin kat adedi arasında da analizler sonunda doğrusal bir ilişki gözlemlenmiştir. Referans kirişte uygulanan CFRP sistem 2 kat karbon fiber lif içermektedir. Üç katlı life sahip B2K3 kirişinde yük artışı %6 ve dört katlı B2K4 kirişinde yük artışı %16,5 olmuştur (Şekil 17).

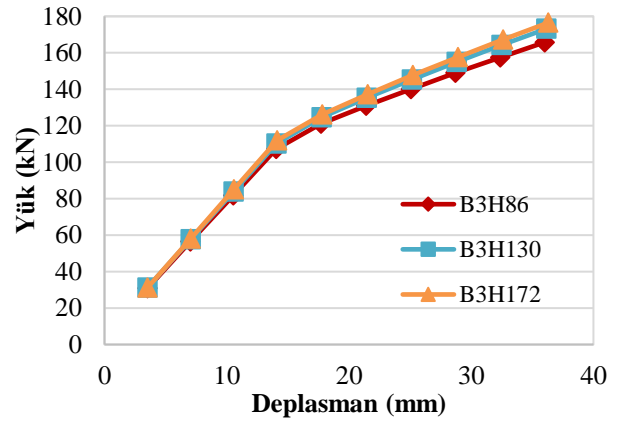
Kirişin yan yüzeylerinin CFRP ile sarılması durumunda, kirişin sadece alt yüzeyinin güçlendirildiği referans kirişe göre yük taşıma kapasitesinde ciddi bir artış gözlemlenmiştir (Şekil 18). Yan yüzeylerdeki CFRP sistem uygulama yüksekliğinin 86 mm olduğu B3H86 kirişinde yük taşıma kapasitesi %27 oranında artmıştır. CFRP yüksekliğinin 130 mm olduğu (B3H130) durumda %33 ve yüksekliğin 172 mm olduğu B3H172 kirişinde ise %36 oranında taşıma kapasitesi artmıştır.



Şekil 16. CFRP genişliklerine göre yük - deplasman grafiği



Şekil 17. CFRP kat adedine göre yük - deplasman grafiği

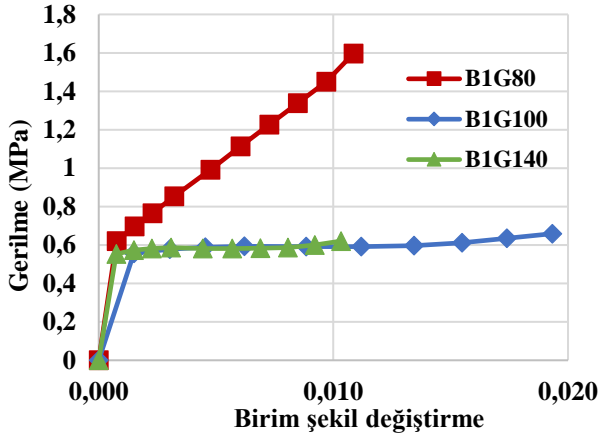


Şekil 18. CFRP'nin yan yüzleri sarmasına göre yük - deplasman grafiği

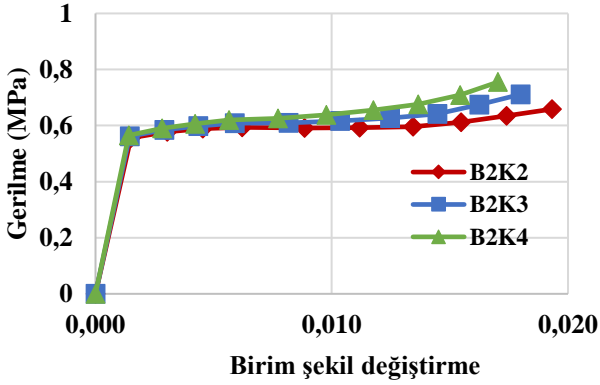
Ayrıca, tüm parametrik analizlerde beton kirişin çekme bölgesinde beton lifler üzerinde oluşan gerilme - birim şekil değiştirme değerleri zamana bağlı olarak dikkate alınmıştır (Şekil 19-21). Birim şekil değiştirme değeri, elastik ve plastik birim şekil değiştirme değerlerinin toplamı şeklinde hesaplanmıştır.

Çekme bölgesinde incelenen beton elemanda aynı gerilme altında birim şekil değiştirme değerlerinin CFRP genişliğinin artması durumunda arttığı görülmüştür (Şekil 19). Beton birim şekil değiştirme değerleri, CFRP kat adedi ve betonun yan yüzeylerini sardığı yükseklik değerleri arttıkça azalmaktadır (Şekil 20-21).

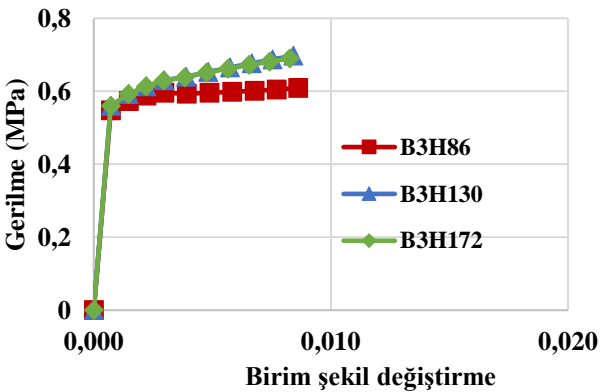




Şekil 19. CFRP genişliklerine göre çekme bölgesi maksimum gerilme - birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 20. CFRP kat adedine göre çekme bölgesi maksimum gerilme - birim şekil değiştirme grafiği



Şekil 21. CFRP'nin yan yüzleri sarmasına göre çekme bölgesi maksimum gerilme - birim şekil değiştirme grafiği

ACI 440'a (Amerika Beton Enstitüsü) göre beton maksimum birim şekil değiştirme değerine ulaşmadan FRP'deki birim şekil değiştirme maksimum değere ulaşırsa,  $\varepsilon_f = \varepsilon_{fu}$ , FRP kopması meydana gelir. FRP'nin kopma birim uzaması (2) eşitliği ile hesaplanabilir.

$$\varepsilon_{fu} = \frac{f_{fu}}{E_f} \quad (2)$$

Eşitlikte  $f_{fu}$  FRP'nin maksimum çekme dayanımını,  $E_f$ 'de FRP'nin Elastisite modülünü temsil etmektedir.

Eğer betonarme sistem FRP'ye gelen yükleri karşılayamazsa, FRP sıyrılması meydana gelebilir. Bu göçme durumunu engellemek için (3) eşitliği ile FRP'deki etkili birim şekil değiştirme, sıyrılmanın meydana geldiği birim şekil değiştirme düzeyi ile sınırlandırılır.

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9 \varepsilon_{fu} \quad (3)$$

Burada,  $f_c$  betonun basınç dayanımını,  $n$  FRP kat adedini ve  $t_f$  de FRP kumaş/plaka kalınlığını ifade etmektedir.

Çözümlemesi yapılan kirişlerde maksimum yük altında (göçme anında) CFRP birim şekil değiştirme değerleri incelenmiştir. Tablo 2'de sonlu elemanlar analizden elde edilen değerler ACI 440'a göre hesaplanan kopma ve sıyrılma birim şekil değiştirme değerleri ile karşılaştırılmıştır. CFRP genişliği ve kat adedi arttıkça analizden elde edilen birim şekil değiştirme değerleri azalmaktadır. Fakat, CFRP'nin betonun yan yüzlerini sardığı durumlarda yan yüzlerdeki CFRP yüksekliği arttıkça birim şekil değiştirme değerleri arasında kesin bir ilişki bulunamamıştır. Tüm kiriş gruplarında birim şekil değiştirme değerleri, eşitlik (2) ile hesaplanan kopma birim uzama sınır değerini aşmaktadır. Bu da CFRP sistemin beton alt yüzeyinden test sonucunda koptuğunu göstermiştir (Şekil 14).

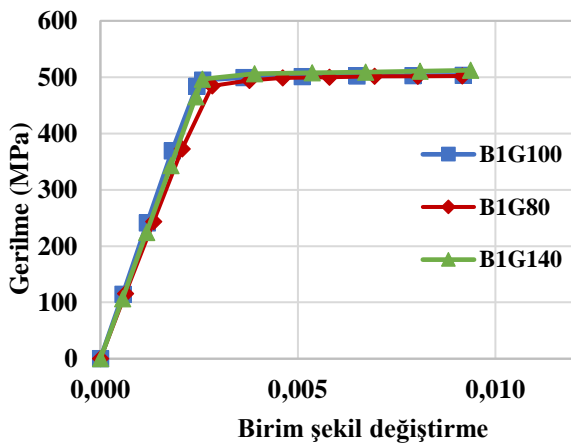
Tablo 2. CFRP birim şekil değiştirme değerleri

Kiriş Adı	ANSYS	ACI 440 (Sıyrılma)	Kopma birim uzaması
B1G80	0,0119	0,0153	0,00002
B1G100	0,0118	0,0153	0,00002
B1G140	0,0111	0,0153	0,00002
B2K2	0,0119	0,0153	0,00002
B2K3	0,0109	0,0125	0,00002
B2K4	0,0104	0,0109	0,00002
B3H86	0,0333	0,0153	0,00002
B3H130	0,0378	0,0153	0,00002
B3H172	0,0327	0,0153	0,00002

Tablo 3. Donatıdaki gerilme değerleri

Kiriş Adı	Referans Yük (kN)	Donatıdaki gerilme (MPa)
B1G80	110	478
B1G100	110	454
B1G140	110	399
B2K2	115	483
B2K3	115	436
B2K4	115	413
B3H86	123.4	411
B3H130	123.4	406
B3H172	123.4	405

Parametrik analizlerde incelenen durumlardan bir diğeri ise çekme bölgesindeki boyuna donatının davranışını içermektedir. Bu amaçla donatıdaki gerilme-şekil değiştirme değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre boyuna donatıdaki maksimum gerilme değeri akma sınırını (504 MPa) aşmıştır (Şekil 22). Referans alınan kirişin yük taşıma kapasitesi sabit alınarak boyuna donatıdaki gerilmeler tüm farklı kiriş grupları için incelenmiştir (Tablo 3). Analizler sonucunda, CFRP genişliğinin, kat adedinin ve yan yüzeylerdeki uygulama yüksekliğinin artması durumlarında donatıdaki gerilmelerin azaldığı ve akma dayanımına daha geç ulaşıldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 22. Boyuna donatıdaki gerilme-şekil değiştirme

## Sonuçlar

Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak literatürde mevcut olan bir deneysel çalışma referans alınmış ve yük deplasman eğrisi elde edilmiştir. Referans kirişte elde edilen deney sonuçlarında kirişin göçme anındaki yükü 120,45 kN, SE modelinde bulunan değer 115 kN çıkmıştır. Sonuçlar SE modelinin doğruluğunu göstermektedir.

Mevcut SE modelinin, CFRP sistemin farklı kullanım durumuna göre doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiş ve kirişlerin yapısal davranışları irdelenmiştir. Yapılan sonlu eleman analizleri sonucunda, kiriş alt yüzeyine uygulanan CFRP sistemin genişliğinin, kat adedinin artırılması veya kiriş yan yüzeylerinin de CFRP ile sarılması durumlarında kiriş göçme yükünde artış görülmüştür.

Boyuna donatıdaki gerilmeler incelendiğinde, CFRP sistemin genişliğinin, kat adedinin artırılması veya kiriş yan yüzeylerde uygulanan CFRP yüksekliğinin artması durumlarında donatının akma dayanımına daha geç ulaştığı ve CFRP malzemenin çekme etkisine katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Bu durum betonarme kirişin sünekliliğinin azaldığını göstermektedir.

Analizleri gerçekleştirilen kirişlerde CFRP genişliğinin ve kat adedinin artması durumunda, maksimum yükleme anında CFRP sistemde

oluşan birim şekil değiştirme değerleri dikkate alınmıştır. Bu değerler azalmakta fakat ACI440'a göre hesaplanan kopma birim uzama sınır değerini aşmaktadır. Böylece CFRP sistemin betonarme kirişin alt yüzeyinden ayrıldığı araştırmacıların yaptıkları deneysel çalışmalar ile de tespit edilmiştir.

Ayrıca betonarme kirişin çekme bölgesindeki beton lifte oluşan gerilme - birim şekil değiştirme değerleri incelenmiştir. Aynı birim şekil değiştirme değerinde CFRP genişliğinin artması durumunda betondaki çekme gerilmesi değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Kat adedinin ve yan yüzeylerde uygulanan CFRP yüksekliğinin artması durumunda çekme gerilmesi değerinin arttığı görülmüştür. Bu değerlerin maksimum çekme kapasitesini aştığı, kirişin çatladığı ve hatta parça kopmaları meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durum deneysel sonuçlar ile uyum göstermiştir.

Bu çalışmada CFRP sistem bir bütün olarak modellenmiş ve epoksi yapıştırıcı ayrı bir malzeme olarak SE modellerinde dikkate alınmamıştır. Çalışmanın devamında epoksi malzemesi ayrı olarak tanımlanabilir ve sonuçlar mevcut durumla karşılaştırılabilir. Ayrıca karbon lif katman sayısı artırılarak standarda uygun olacak şekilde hem sıyrılmama testi tekrarlanmalı, hem de SE modelleri yenilenerek katman sayısındaki artışın kirişlere etkileri incelenmelidir.

## Kaynaklar

ACI 440, (2008). Guide for the design and construction of externally bonded frp systems for strengthening concrete structures, *American Concrete Institute Committee 440*, Miami.

Alsayed, S.H., (1998). Flexural behaviour of concrete beams reinforced with gfrp bars, *Cement and Concrete Composites*, **20**, 1-11.

ASTM D7522 /D7522M, (2015). Standard test method for pull-off strength for frp laminate systems bonded to concrete substrate, *ASTM Standardı*, West Conchohocken.

Bousias, S.N., Triantafillou, T.C., Fardis, M.N., Spathis, L., O'Regan, B.A., (2004). Fiber-reinforced polymer retrofitting of rectangular reinforced concrete columns with or without

corrosion, *ACI Structural Journal*, **101**(4), 512-520.

Büyüköztürk, O., Güneş O., Karaca E., (2003). Progress on understanding debonding problems in reinforced concrete and steel members strengthened using FRP composites, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, *Construction and Building Materials Dergisi*, **18**, 9-19, Cambridge.

Çetinkaya, N., Kaplan, H., Şenel, Ş.M., (2004). Betonarme kirişlerin lifli polimer (frp) malzemeler kullanılarak onarım ve güçlendirilmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **10**, 291-298.

Gheorghiu, C., Labossiere, P., Proulx, J., (2007). Response of cfrp-strengthened beams under fatigue with different load amplitudes, *Construction and Building Materials*, **21**, 756-63.

Iacobucci, R.D., Sheikh, S.A., Bayrak, O., (2003). Retrofit of square concrete columns with carbon fiber-reinforced polymer for seismic resistance, *ACI Structural Journal*, **100**, 6, 785-794.

Jianzhuang, X., Li, J., Quanfan, Z., (2004). Experimental study on bond behaviour between FRP and concrete, *Construction and Building Materials*, **18**, 745-52.

Khalifa, A., Nanni, A., (2000). Improving shear capacity of existing RC T-section beams using CFRP composites, *Cement and Concrete Composites*, **22**, 165-74.

Lee, H.K., Hausmann, L.R., (2004). Structural repair and strengthening of damaged RC beams with sprayed FRP, *Composite Structures*, **63**, 201-9.

Masoud, S., Soudki, K., (2006). Evaluation of corrosion activity in FRP repaired RC beams, *Cement and Concrete Composites*, **28**, 969-77.

Ozcan, O., Binici, B., Ozcebe, G., (2008). Improving seismic performance of deficient reinforced concrete columns using carbon fiber-reinforced polymers, *Engineering Structures*, **30**, 1632-1646.

Pham H., Al-Mahaidi R., (2004). Experimental investigation into flexural retrofitting of reinforced concrete bridge beams using FRP composites, *Composite Structures*, **66**, 617-625.

Pitilakis, K., (2018). Recent advances in earthquake engineering in Europe, Springer, Thessaloniki.

Rabinovitch, O., (2005). Bending behaviour of reinforced concrete beams strengthened with composite materials using inelastic and nonlinear adhesives, *ASCE, Journal of Structural Engineering*, **10**, 1580-92.

Sause, R., Harries, K.A., Walkup, S.L., Pessiki, S., Ricles, J.M., (2004). Flexural behavior of

- concrete columns retrofitted with carbon fiber reinforced polymer jackets, *ACI Structural Journal*, **101**, 708-716.
- Sayın, B., Manisalı, E., (2009). Lif takviyeli plastik levhalar ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerde arayüz gerilmelerini etkileyen parametreler, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, **16**,1, 63-75.
- Seible F., Priestley M.J.N., Hegemier G.A., Innamorato D., (1997). Seismic retrofitting of RC columns with continuous carbon fiber jackets, *Journal of Composites for Construction*, **1**, 52-62.
- Sheikh SA, Yau G., (2002). Seismic behavior of concrete columns confined with steel and fiber-reinforced polymers, *ACI Structural Journal*, **99**, 72-80.
- Xiao Y, Ma R., (1997). Seismic retrofit of RC circular columns using prefabricated composite jacketing, *Journal of Structural Engineering*, **123**, 1356-1364.
- Yang, J., Ye, J., Niu, Z0., (2008). Simplified solutions for the stress transfer in concrete beams bonded with FRP plates, *Engineering Structures*, **30**, 533-45.

---

DowAska Hayat Kurtaran Güçlendirme Teknolojisi.  
<http://www.dowaksa.com/dowaksa-hayat-kurtaran-yapi-guclendirme-teknolojisini-yalovada-gerceklestirdigi-deprem-simulasyonunda-basariyla-sergiledi>. Erişim tarihi Mayıs 2, 2018.

## **Modeling and analysis of strengthened reinforced concrete beams with CFRP by finite element method**

### **Extended abstract**

*In Turkey, structural elements are strengthened with fiber polymer (LP) that causes a considerable increase in load bearing capacity and ductility system in order to exemplify a necessary and sufficient performance under lateral loads. In this study, nonlinear analyses of reinforced concrete beams retrofitted with LP material are performed by using nonlinear finite element (FE) method. Considering the laboratory tests done by Pham and Al-Mahaidi, finite element models of the beams are created in the ANSYS program. The mechanical properties of the CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) material used in the experimental studies in the literature have been tested in accordance with ASTM D7522 standards. According to the results of the laboratory experiment, the CFRP system was modeled mathematically and reinforced concrete beams were analyzed under static loads. The load-displacement curve results obtained from the FE analyses and the experimental data showed good match.*

*After verification of the FE model, some parametric studies were investigated to evaluate the behavior of the reinforced concrete beams with CFRP materials. CFRP width along the bottom side of the beams, the number of layers in the CFRP system and the height of the materials applied along the front and back surfaces of the beams were varied in the analyses. Load capacity, the maximum stress-strain curve results on the concrete fibers along the bottom side of the beams, strain values on the CFRP system under the maximum load and the stress-strain values along the longitudinal reinforcement were obtained from the FE parametric analyses. The results showed that when the CFRP width increases the load capacity of the beam increases. Models indicates that if the CFRP layers are increased the load capacities are enhanced up to 6% and 16.5% on the beams with 3 layers and 4 layers, respectively. In the beams with CFRP systems along the front and back surfaces, the load capacities are improved by 27%, 33% and 36% when the CFRP heights on the surfaces are 86 mm, 130 mm, and 172 mm., respectively.*

*Stress-strain curves obtained from the FE analyses reveals that the concrete strain values on the tension*

*side of the beams are increased by the increment on the width of the CFRP system. Although, the strain values on concrete fibers are decreased with the increase in CFRP layers and the height along the surfaces.*

*In the FE models, the CFRP strain values are determined under the maximum load and compared with the values according to ACI 440 standard. The results indicates that the strain values are well beyond the fracture strain limit. Therefore, the CFRP system were ruptured from the bottom face of the beam as obtained during the laboratory testing.*

*The stress-strain curves of the longitudinal reinforcement are evaluated for each parametric analyses. The stress values are decreased by the increase in the CFRP width, number of layers and the CFRP height along the faces. This case showed that the CFRP system contributed to the tension capacity of the beams and the ductility of the beams were decreased.*

**Keywords:** *Finite element method, fiber reinforced polymer, strengthening, pull-off test.*