

# Lif Takviyeli Plastik Levhalar ile Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerde Arayüz Gerilmelerini Etkileyen Parametreler

## Parameters That Effect the Interfacial Stresses in Fibre Reinforced Plastic Laminates Strengthened Rc Beams

Barış SAYIN\* ve Ekrem MANİSALI

İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 34320, İstanbul

Geliş Tarihi/Received : 01.07.2009, Kabul Tarihi/Accepted : 18.11.2009

### ÖZET

Betonarme kirişlerin, dıştan FRP (Lif Takviyeli Plastik) levhalarla güçlendirilmesi, güçlendirmede etkin bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Yöntem, FRP malzemesinin, yüksek dayanım-ağırlık oranı, iyi korozyon direnci, farklı kesit şekilleri ve köşelere uygulanabilirlik avantajlarından dolayı kullanılır olmuştur. Konuyla ilgili birçok çalışma 1990'lı yılların başlarından itibaren yürütülmüştür. Gerçekleştirilecek olan çalışma kapsamında, FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin arayüz gerilmelerini etkileyen parametreler deneysel ve nümerik olarak incelenecektir. FRP'nin kirişe uygulanmasında kullanılan yapıştırıcı kalınlığı, yapıştırıcı türü ve beton yüzeyinin durumu, üretilen deney numuneleri üzerinde eğilme etkisine maruz bırakılarak mukayeseli olarak incelenecektir. Sonrasında, ANSYS® WB sonlu elemanlar programı kullanılarak FRP'li betonarme kirişler modellenecek ve analizler gerçekleştirilecektir. Yapıştırıcı kalınlığı, yapıştırıcı türü, beton yüzeyi parametreleri girilerek yapılacak analizler neticesinde gerilme değerleri elde edilecektir. Böylece, analitik ifadelerde yer alan kayma gerilmesi ve normal gerilme bağıntılarının modifiye edilmesi gerekliliği ortaya konulacaktır. Sonlu eleman analizleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılacak, uyumluluğu irdelenip, sonuçlar ve önerilerin sunulması suretiyle çalışma tamamlanacaktır.

**Anahtar Kelimeler :** *Lif takviyeli plastik, Betonarme kiriş, Kompozit malzeme, Yapıştırıcı.*

### ABSTRACT

The use of externally bonded fiber-reinforced plastic (FRP) laminates for strengthening of reinforced concrete beams has become an effective method. This method has been used because of the advantages of FRP materials such as their high strength-to-weight ratio, good corrosion resistance, and versatility in coping with different sectional shapes and corners. Many studies on this theme have been carried out since the early 1900s. In this study, interfacial stresses of reinforced concrete beams strengthened with FRP effect the parameters will be studied as experimental and numerical. Adhesives used in the beams applied to FRP's thickness, adhesive type and the state of the concrete surface, produced experimental samples are exposed to the bending effect will be studied as a comparative. Afterwards, by using the ANSYS® WB finite element program to model and analyze RC beams by externally bonding FRP will be carried out. Adhesive thickness, adhesive type, the concrete surface will be performed by entering the parameters for analysis of stress can be obtained as a result. Thus, the analytical expressions of stress and normal stress equations will establish should be modified. Finite element analysis and experimental results will be compared, compatibility investigated, the results and recommendations presented by the study be completed.

**Keywords :** *Fibre reinforced plastic (FRP), RC beam, Composite material, Adhesive.*

---

\* Yazılan yazar/Corresponding author. E-posta adresi/E-mail address : barsayin@istanbul.edu.tr (B. Sayın)

## 1. GİRİŞ

Türkiye’de, taşıyıcı sistemi çerçeve türünden olan betonarme binalar incelendiğinde, söz konusu binaların önemli kısmının geçerli olan son deprem şartnamesini ve hatta bir önceki şartnamenin kriterlerini sağlamadığı ortaya çıkmaktadır. Özellikle İstanbul’daki binaların önemli bir kısmının projesinin mevcut olmadığı, mühendislik hizmeti görmediği veya projesinin mevcut olduğu bildirilse bile, bu projeye uyulmadığı kuvvetle tahmin edilmektedir. Bu nedenle, gerek taşıma kapasitesinin yetersizliği gerekse yaşanan depremler sonrası onarım ve güçlendirme zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, İstanbul başta olmak üzere Marmara Bölgesi’nde olası şiddetli bir depreme karşı binaların incelenmesi ve gerekenlerin güçlendirilmesi özellikle 1999’da yaşanan deprem sonrası, günümüz toplumunun karşı karşıya bulunduğu en önemli sorunlardan birini oluşturmaktadır.

1999 yılında yaşanan Kocaeli Depremi sonrası, özellikle betonarme yapılarda taşıyıcı elemanların güçlendirilmesi yönünde çeşitli çalışmalar ve uygulamalar yapılmıştır. Betonarme binaların güçlendirilmesinde, taşıyıcı elemanların güçlendirilmesi söz konusu olmaktadır. Betonarme kirişlerin, dıştan FRP şeritlerle güçlendirilmesi, güçlendirmede etkin bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Yang v.d., 2008). Yöntem, FRP kompozitlerinin, yüksek dayanım-ağırlık oranı, iyi korozyon direnci, farklı kesit şekilleri ve köşelere uygulanabilirlik avantajlarından dolayı kullanılabilir olmuştur.

Konuyla ilgili birçok çalışma 1990’lı yılların başlarından itibaren yürütülmüştür. FRP levhaların veya şeritlerin betonarme elemanlar gibi bilinen malzemelerle güçlendirilmesi yaygın bir yöntem haline gelmiştir (Yang ve Ye, 2005). Betonarme yapıları güçlendirmek/onarmak için kullanılan lif takviyeli plastik (FRP) levhalar, on yıldan fazla bir süredir yapı endüstrisinde yer almaktadır. FRP plakaların, eğilme etkisine karşı betonarme kirişlerde rijitliği ve yük taşıma kapasitesini önemli oranda artırdığı, bununla beraber sünekliliği azalttığı ve yapısal tasarımda istenmeyen ani göçmelere neden olduğu gözlenmiştir.

Çalışmanın konusu, betonarme kirişlerin FRP ile güçlendirilmesinde kompozit malzeme davranışını etkileyen parametrelerle ilgilidir. Bu kapsamda, FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kayma gerilmesi ve normal gerilmeleri belirlenecektir.

Kirişlerin FRP ile güçlendirilmesinde, güçlendirilen kiriş davranışının gerçek davranışı yansıtması amaçlanmıştır. Kirişin gerçek davranışını belirlemek için yapılan deneysel çalışmada laboratuvar ortamında

0.12x10x55 cm boyutlarındaki FRP plakalar, 15x15x75 cm boyutlarındaki betonarme kirişlere epoksi esaslı yapıştırıcı ile yapıştırılmış, yapıştırıcı kalınlıkları ise <1 mm ile 4 mm arasında alınmıştır. Çalışmada yapıştırıcı kalınlığı, yapıştırıcı türü ve beton yüzeyinin durumu, üretilen deney numuneleri üzerinde eğilme etkisine maruz bırakılarak mukayeseli olarak incelenmiştir. Sonrasında, Ansys sonlu elemanlar programında FRP’li betonarme kiriş modellenmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir. Programa, yapıştırıcı kalınlığı, yapıştırıcı türü, beton yüzeyi parametrelerinin özellikleri girilerek analizler neticesinde kayma gerilmesi ve normal gerilme sonuçları elde edilmiştir. Sonlu eleman analizleri ile deneysel sonuçlar mukayese edilerek incelenmiştir. Analiz programının çalışma kapsamına alınmasındaki amaç, deneysel çalışma sonrasında, kiriş elemanlarının modellenip analizler vasıtasıyla, elde edilen değerlerin karşılaştırılması ve kompozit eleman davranışını programla elde ederek, kiriş davranışını belirleyen etkenlerin program kullanılarak daha hızlı ve kapsamlı olarak bulunmasıdır.

## 2. BETONARME KİRİŞLERİN FRP İLE GÜÇLENDİRİLMESİ KONUSUNDAKİ ÇALIŞMALAR

Betonarme kirişlerin FRP ile güçlendirilmesi konusunda literatürde birçok çalışma mevcuttur. Çalışma konusuyla ilgili araştırmalar irdelenmiş, FRP’nin güçlendirmede kullanım sahası sunulmaya çalışılmıştır.

Gheorghiu ve arkadaşları, CFRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin dayanımını belirlemek için kapsamlı bir deneysel çalışma yürüterek, betonarme kiriş gibi yapısal elemanlara uygulanan FRP sistemlerinin yeterliliğini araştırmışlardır. Bununla birlikte, aşırı yüklemeye maruz kalan FRP uygulanmış yapısal eleman dayanımı hakkında deneysel verinin azlığı anlaşılmıştır. Çalışmada, küçük ölçekli kiriş, çeşitli sayıda yorulma yüklemesi çevrimlerine ve yük şartlarına maruz bırakılmış ve daha sonra monotonik yükleme sonucu göçme durumu deneye tâbi tutulmuştur. CFRP-beton birleşme noktaları kirişin nihâi kapasitesini etkilemeden yorulma yüklemesi değiştirilerek belirlenmiştir. Yük-sehim eğrileri ve deformasyon davranışları, çeşitli yük şartlarına maruz kalan, CFRP ile güçlendirilen kirişlerin performansını belirlemek için ortaya konulmuştur. Çalışmada, deney elemanların dayanımlarında çeşitli yorulma yüklemelerinin etkisi belirlenmiştir. Kirişler, yorulma çevrimlerinin sayısından bağımsız olarak istikrarlı bir yorulma davranışı göstermiştir. İlk yükleme, çatlakların ve mikro çatlakların oluştuğu herhangi diğer yük çevrimlerine göre daha fazla enerjinin sönmüldüğü durum olarak ortaya çıkmıştır. Başlangıçta, kirişler, yüzbin çevrime kadar önemli sehim artması göstermiş, daha sonra, bu davranış,

yük sayısına karşılık gelen maksimum değerler için asimtotik olan deformasyonlarla stabilize olmuştur. Maksimum sehimin, tüm kirişler için ilk değerine göre % 40 civarında arttığı gözlenmiştir (Gheorghiu v.d., 2007).

Rabinovitch, çalışmasında, FRP'yi kirişe uygulamakta kullanılan yapıştırıcıyı inelastik ve doğrusal olmayan (nonlinear) davranış karakterinde modelleyerek betonarme kirişlerin eğilme davranışını analitik olarak araştırmıştır. Çalışmada, davranışı nonlinear ve inelastik kabul edilen yapıştırıcı kullanılarak kompozit malzemelerle dıştan güçlendirilen betonarme kirişler analitik olarak araştırılmıştır. Matematiksel model, yüksek dereceli teori ve yapıştırıcı malzemenin nonlinear ve inelastik kayma gerilmesi-kayma açısı davranışının dâhil edilmesiyle belirlenmiştir. Sözkonusu modelde, uygunluk şartları virtüel iş prensibiyle belirlenmiş, yapıştırıcıdaki gerilme ve yer değiştirmeler kapalı çözüm olarak elde edilmiştir. Doğrusal olmayan bünye diferansiyel denklemleri, elastik, nonlinear ve elasto-plastik yapıştırıcı durumunda iteratif olmak üzere nümerik olarak çözülmüştür. Lineer elastik, nonlinear elastik ve elasto plastik yapıştırıcılar kullanılarak FRP ile güçlendirilen iki kirişin nümerik çalışması sunulmuş ve sonlu eleman analiziyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, bu tür yapıştırıcıların kullanılmasının kirişin yük taşıma kapasitesini ve sünekliğini artırdığını ve plastik mafsalsız mekanizması oluşmasını sağladığını göstermiştir. Ayrıca, FRP'nin bitim noktalarına yakın yerlerde kayma gerilmelerinin azaldığı belirlenmiştir (Rabinovitch, 2005).

Masoud ve Soudki, çalışmalarında FRP ile onarılan betonarme kirişlerde korozyon aktivitesini deneysel olarak araştırmışlardır. On adet kiriş örneği deneye tâbi tutulmuştur. Örnek kirişlerden biri, referans olarak alınması için güçlendirilmemiş ve korozyona uğraması engellenmiştir. Altı örnek, korozyona maruz bırakılmış ve FRP levhaları ile onarılmıştır. Ana donatılar paslanarak % 5,5 kütle kaybına uğradıktan sonra, FRP levhaları uygulanmıştır. FRP onarımını tâkiben bazı örnekler onarım sonrası performansı araştırmak için daha fazla korozyona maruz kalmıştır. Korozyon aktivitesi, tahrip edici olmayan ve tahrip edici olan tekniklerin kullanılmasıyla değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlar, korozyonun ilerlemesiyle birlikte, korozyonun potansiyel olarak azaldığını ve FRP onarımının, zamana bağlı olarak korozyon potansiyelinde, FRP olmayan duruma göre, daha yüksek oranda korozyon azalmasına neden olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, korozyon nedeniyle ana donatıdaki kütle kaybının, FRP onarımının yapıldığı duruma göre % 16'ya kadar azaldığını göstermiştir (Masoud ve Soudki, 2006).

Teng ve arkadaşları, çalışmalarında, her iki uçta gerilmeye maruz kalan FRP plaka ile beton arasındaki ayrışma için analitik çözüm gerçekleştirmişlerdir. Farklı yük aşamaları için arayüz kayma gerilmeleri ve yük-yer değiştirme davranışı belirlenmiştir. FRP ile beton ayrışması detaylı olarak irdelenmiştir. Son olarak, analitik çözümden, bağ uzunluğunun etkisi belirlenmiştir. FRP ile beton arasındaki düğüm noktaları, analitik olarak, beton ve plaka arasında benzer düğüm noktalarıyla, aynı şekilde çözümü yapılmıştır. FRP ile beton arasındaki ayrışma analizi üç aşamadan oluşmuştur:

- i) Elastik,
- ii) Yumuşama (veya mikro çatlak),
- iii) Ayrışma.

Üç aşama içinde matematiksel denklemler elde edilmiştir. Daha sonra, yük-yer değiştirme eğrilerini elde etmek için analizler yapılmıştır (Teng v.d., 2006).

Gao ve arkadaşları, çalışmalarında, güçlendirilen betonarme kirişte, paspayı betonunun koptuğu aşamada yük taşıma kapasitesini belirlemek için basit ve kesin tasarım metodolojisi vermişlerdir. FRP şeridinin bittiği noktanın en yakınındaki çekme donatısı etrafındaki betonda, gerilme toplanmalarını hesaba katan analitik bir ifade geliştirilmiştir. Analitik ifadenin elde edilmesi iki ana adımdan oluşmaktadır:

- i) Kompozit hareket durumunda FRP şeritlerindeki çekme gerilmelerinin belirlenmesi,
- ii) Lokal gerilmelerin elde edilmesi ve beton dayanımıyla karşılaştırılmasıdır.

Sunulan analitik model esasına dayanılarak elde edilen sonuçlar, literatürdeki ellisekiz deneysel veriyle karşılaştırılmış ve değerlerin, FRP ile güçlendirilen kirişlerin tasarımında potansiyel bir uygulamaya sahip olduğu belirlenmiştir. Mevcut modellerle karşılaştırıldığında, sunulan modelin, güçlendirilmiş betonarme kirişlerin deneysel yük taşıma kapasitesini belirlemede daha kesin olduğu ve öngörülen/ölçülen yük oranlarının daha yakın olduğu görülmüştür (Gao v.d., 2005).

Jianzhuang ve arkadaşları, beton ve FRP arasındaki bağ davranışını deneysel olarak çalışmışlardır. Çalışmada, FRP ve beton arasındaki bağ davranışını araştırmak için iki çeşit deney tasarlanmıştır. Kayma dayanımını ölçmek için deney düzeneği kurularak, FRP tabakasındaki deformasyon gelişmesi ve dağılımı gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda, kayma gerilmelerinin dağılımı verilmiş ve efektif bağ uzunluğu belirlenmiştir (Jianzhuang v.d., 2004).

Lee ve Hausmann, hasarlı betonarme kirişlerin püskürtmeli FRP ile yapısal onarımı ve güçlendirilmesi konusunda çalışma yapmışlardır. Çalışmada, SFRP (püskürtme FRP) ile güçlendirilen betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesi, sünekliği ve enerji sönümlenme oranları araştırılmıştır. Aynı zamanda, hasarlı betonarme kirişlerin onarım ve güçlendirilmesinde SFRP kullanımının uygunluğu da değerlendirilmiştir. Betonarme kirişlerde SFRP'nin etkisini ortaya koymak adına, hasarlı ve hasarsız kirişe SFRP uygulaması yapılmıştır. Deneylemlerden, yük taşıma kapasitesi ve enerji sönümlenmesindeki artışı veren yük-sehim eğrileri elde edilmiştir. Sonuçlar, SFRP'nin, yük taşıma kapasitesini, sünekliği ve enerji sönümlenme kapasitesini önemli ölçüde artırdığını ve betonarme kirişlerin güçlendirmesi ve onarımında etkili olduğunu göstermiştir (Lee ve Hausmann, 2003).

Chen ve Teng, FRP ayrışmasıyla nihâi kapasitesine ulaşan, FRP ile güçlendirilmiş kirişlerin kayma kapasitesi için basit, kesin, rasyonel tasarım önerisi geliştirmeye çalışmışlardır. Mevcut dayanım önerileri gözden geçirilmiş ve eksiklikleri belirtilmiştir. Bu kapsamda yeni bir dayanım modeli geliştirilmiştir. Ortaya konulan model, mevcut literatürden elde edilmiş deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır. Son olarak, yeni bir tasarım önerisi verilmiştir (Chen ve Teng, 2003).

Pesic ve Pilakoutas, FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin, levha bitimi göçmesi ve paspayı betonunun ayrışması problemi üzerinde durmuşlardır. Bu tip göçme için, analitik modeller ve sonlu eleman yöntemlerinin doğruluğu, yayınlanmış olan deneysel verilerle belirlenmeye çalışılmıştır. İlk önce, betonarme kirişlerin kayma kapasitesi ve maksimum beton çekme dayanımı esas alınarak iki tasarım yaklaşımı incelenmiş ve lineer elastik analizlerin levha bitimi âni beton göçmesini doğru olarak belirleyemediği saptanmıştır. Aynı zamanda, dayanım büyüklüğünün, betonarme kirişlerin kayma kapasiteleriyle sınırlı olduğu sonucuna varılmıştır. Sonlu elemanlar analizi, kritik bölgelerde, çekme donatısının asal çekme gerilmelerinin büyüklüğüne olan etkilerini incelemek için yapılmıştır. Son olarak, ayırık çatlak yaklaşımı (discrete crack approach) kullanılmasıyla plaka ucu ve kesme çatlakları süresizliği modellenerek, kesme etkisi ve paspayı betonunun kopması nedeniyle oluşan karışık göçme modu (mixed mode of failure) belirlenmiştir (Pesic ve Pilakoutas, 2003).

Ferreira ve arkadaşları, FRP donatılarla ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin sonlu eleman analizini gerçekleştirmiştir. Sonlu eleman gibi nümerik bir yöntemin kullanılmasındaki amaç ise, doğrusal olmayan geometrik ve malzeme modeline

duyulan ihtiyaçtan doğmuştur. Çelik donatılardaki korozyonun, betondaki porozitenin (gözenekli yapı), inşaat sektöründe genel bir problem olduğundan hareketle, çelik donatıların yerine FRP donatılarının kullanılmasıyla, birçok yapı alanındaki uygulamalarda korozyona karşı daha dayanıklı betonarme elde edilmesi amaçlanmıştır. Beton, elasto-plastik-gevrek kabul edilirken, donatı malzemesi, lineer elastik/ gevrek kabul edilmiştir. Kompozit donatılarla güçlendirilmiş basit mesnetli beton kiriş analiz edilmiştir. Güçlendirmenin etkileri ve betondaki kompozit ve çelik donatıların karşılaştırması yapılmıştır. Nümerik analizler ve deneysel çalışmalar, güçlendirilmiş betonarme kiriş için yapılmış ve sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür (Ferreira v.d., 2001).

Khalifa ve Nanni, çalışmalarında, T-kesitli betonarme kirişin kesme etkisine karşı performansını araştırmıştır. Farklı yapılandırmaya sahip CFRP ile örnek kirişlerin kesme etkisine karşı güçlendirilmesi hedeflenmiştir. Deneysel çalışma, altı tam boyutlu basit mesnetli kirişle yürütülmüştür. Bir kiriş, referans kirişi olarak alınmış, diğer beş kiriş CFRP'nin farklı uygulanmasıyla kullanılmıştır. Deneysel çalışma, CFRP'nin, kirişin kesme kapasitesini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Buna ek olarak, (U) şeklinde uygulanan CFRP'nin en etkili konfigürasyon olduğu görülmüştür. Tasarım algoritmalarında, ACI (American Concrete Institute) ve Eurocode Şartnameleri referans alınmıştır. Sonuçlar, önerilen tasarım yaklaşımının ölçülü ve kabul edilebilir olduğunu göstermiştir (Khalifa ve Nanni, 2000).

Alsayed, çelik ve cam lifle güçlendirilen oniki adet beton kirişin yük-şekil değiştirme sonuçlarını elde etmiş ve karşılaştırmalarını yapmıştır. Çalışmanın nümerik aşamasında, bilgisayar modeli, ACI yük-şekil değiştirme modeli ve literatürde, FRP donatılarla güçlendirilen modifiye edilmiş yük-şekil değiştirme modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Deneysel kirişlerinin tasarımında, şekil değiştirme limiti ve betonun nihâi dayanımı, kontrol parametreleri olarak alınmıştır. Bilgisayar modeli, ölçülen servis ve tam yük-şekil değiştirme eğrilerinden kesin öngörünün elde edilmesini sağlamıştır. Servis yük şekil değiştirmesi ve nihâi eğilme dayanımındaki hatalar sırasıyla % 10 ve % 1'den az çıkmıştır. Cam lifle güçlendirilen kirişte, ACI modeliyle belirlenen servis yük şekil değiştirmesi, % 70 hatayla elde edilirken, değişiklik yapılmış modelde bu hata % 15'ten daha az gerçekleşmiştir (Alsayed, 1998).

Çetinkaya ve arkadaşları, çalışmalarında, FRP ile betonarme kirişlerin onarım ve güçlendirilmesi (O/G) konusunu deneysel olarak araştırmışlardır. Deneysel kirişleri için yük-yer değiştirme eğrileri elde edilerek elemanların statik yük altında O/G'den

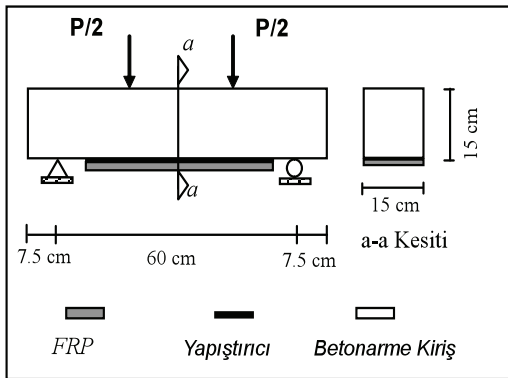
önceki ve sonraki davranışı karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda FRP malzemelerle yapılan O/G'nin betonarme kirişlerin taşıma gücünü çok büyük ölçüde arttırdığı görülmüştür. Ayrıca, kirişin, eğilme etkisi altında taşıma gücünü arttırmak için alt yüzüne yapıştırılan FRP şeridin açıklığının tamamına yapıştırılması daha uygun olduğu belirtilmiştir (Çetinkaya v.d., 2004).

Özcan, çalışmasında, eğilme etkileri altındaki dikdörtgen kesitli betonarme kiriş elemanlarının FRP ile güçlendirilmesi uygulaması ve üç noktalı eğilme deneylerinden, yük-şekil değiştirme ve yük-yer değiştirme durumlarını araştırmıştır. FRP ile güçlendirilen bütün kirişlerde kırılma yükünde orta noktada ölçülen düşey yerdeştirmeler, kontrol kirişinde ölçülen yerdeştirmelerden küçük kalmıştır. FRP miktarının artmasının, donatı akma sınırını artırdığı görülmüştür. FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin kırılma şekilleri ise kiriş alt yüzündeki FRP liflerin kopması ile ve/veya kirişin üst bölgesindeki betonun ezilmesiyle ortaya çıktığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, betonarme kirişin çekme bölgesinde, dış yüzeyine uygun şartlarda ve şekilde yapıştırılan FRP lifleri ile kirişin eğilme dayanımını, diğer bir ifade ile moment kapasitesini önemli bir şekilde artırmanın mümkün olduğu sonucuna varılmıştır (Özcan, 2005).

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMA VE NÜMERİK ANALİZ

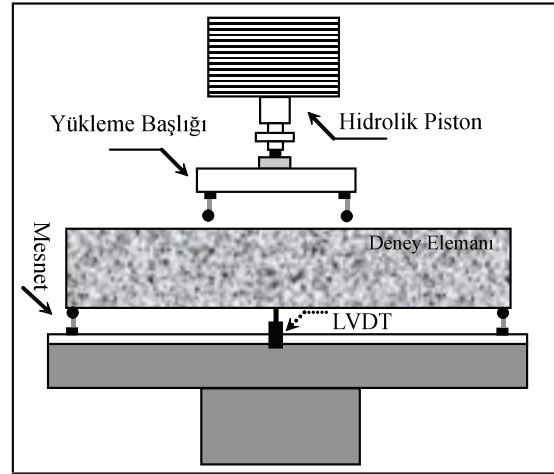
#### 3.1. Deneysel Çalışma

Kiriş deneyleri, İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı-Malzeme Laboratuvarı'nda yer alan eğilme çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, lif takviyeli polimerle takviye edilmiş kare kesitli basit mesnetli betonarme kiriş seçilmiştir. Deney elemanına monotonik yükleme, dört nokta yüklemesi olarak otomatik kontrollü bir hidrolik kriko ile uygulanmış ve yük hücresi (load cell) ile ölçülmüştür. Deneysel çalışmada bir adedi yalın kiriş (referans kiriş) olmak üzere onbeş adet betonarme kiriş test edilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Betonarme kiriş elemanının geometrisi ve yükleme durumu.

Yükleme sisteminden anlaşılacağı gibi, kesme kuvvetinin olmadığı basit eğilme etkisindeki bölge, iki tekil yükün uygulandığı kesitler arasındadır. Yalnızca eğilme etkisinin ele alındığı kesit düzeyindeki bu çalışmada yük-yerdeğiştirme ilişkilerinin belirlenebilmesi için tüm ölçümler iki tekil yükün uygulandığı kesitler arasında yapılmıştır. İncelenen kesitte çökmenin bulunabilmesi için, kiriş ortasına yerleştirilen lvd't (yerdeğiştirme ölçer) kullanılmıştır. Mesnetteki olası çökme durumu ihmal edilmiştir. Deney ve ölçüm düzeneği Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Deney ve ölçüm düzeneği.

Numunelerin 3., 7. ve 28. gün küp dayanım değerleri Tablo 1'de, slump değerleri ve belirlenen beton dayanım sınıfları ise Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Kiriş numunelerinin 3., 7. ve 28. gün kırım değerleri.

Numune No	Kiriş No	3.Gün		7.Gün		28.Gün	
		Kırım Tarihi ve Değeri		Kırım Tarihi ve Değeri		Kırım Tarihi ve Değeri	
1	B01	20.10.2008		24.10.2008		14.11.2008	
	B02	35	---	38	36	---	39
2	B03	21.10.2008		25.10.2008		15.11.2008	
	B04	34	---	38	---	44	41
3	B05	22.10.2008		26.10.2008		16.11.2008	
	B06	29	---	36	---	41	43
4	B07	26.10.2008		30.10.2008		20.11.2008	
	B08	39	---	44	---	50	48
5	B09	29.10.2008		02.11.2008		23.11.2008	
	B10	30	---	37	---	43	42
6	B11	01.11.2008		05.11.2008		26.11.2008	
	B12	---	---	26	26	32	31
7	B13	02.11.2008		06.11.2008		27.11.2008	
	B14	---	---	39	41	45	48
8	B15	12.11.2008		16.11.2008		07.12.2008	
	---	---	---	38	38	34	36



**Tablo 2. Kiriş numunelerinden elde edilen beton dayanım sınıfları.**

Numune No	Numunenin Alındığı Kiriş No	Öngörülen beton sınıfı	Numune Adedi	Belirlenen Beton Dayanım Sınıfı
		Slump (cm)		
1	B01	C30/37	4	C30/37
	B02	14		
2	B03	C30/37	4	C30/37
	B04	14		
3	B05	C30/37	4	C30/37
	B06	16		
4	B07	C30/37	4	C30/37
	B08	10		
5	B09	C30/37	4	C30/37
	B10	15		
6	B11	C30/37	4	C30/37
	B12	19		
7	B13	C30/37	4	C30/37
	B14	11		
8	B15	C30/37	4	C30/37
	---	18		

Üretilen onbeş adet betonarme kirişin her biri, 75 cm uzunluğunda ve 15x15 cm kare kesite sahiptir. Paspayı 25 mm olup, donatı özellikleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

**Tablo 3. Betonarme kiriş elemanı için donatı malzeme özellikleri.**

Boyuna Donatı çapı ve adedi	Donatı Sınıfı	Etriye çapı ve aralığı
4φ10	S420	φ8/10

Deneyde kullanılan yapıştırıcı kalınlığı, FRP tipi ve uygulanan beton yüzey özellikleri Tablo 4'te, yapıştırıcıların malzeme özellikleri Tablo 5'te görülmektedir.

**Tablo 4. FRP tipi, uygulama yüzeyi ve yapıştırıcı kalınlıkları.**

Deney Elemanı	Yapıştırıcı Türü	Uygulanan Beton Yüzeyi	Yapıştırıcı Kalınlığı t <sub>a</sub> (mm)
B01	Sikadur 30	Kuru	< 1
B02	Sikadur 30	Kuru	1
B03	Sikadur 30	Kuru	2
B04	Sikadur 52	Kuru	1
B05	Sikadur 52	Kuru	2
B06	*Sikadur 52	Kuru	4
B07	**Sikadur 30	Kuru	4
B08	Sikadur 52	Kuru	4
B09	Sikadur 30	Kuru	4
B10	Sikadur 30	Nemli	4
B11	**Sikadur30	Nemli	4
B12	Sikadur 30	Nemli	2
B13	Sikadur 30	Nemli	1
B14	Sikadur 30	Nemli	< 1
B15	Kontrol Numunesi (Betonarme Kiriş)		
FRP tipi:SikaCarboDur1012 / FRP uzunluğu:550 mm			
*Kullanılan yapıştırıcı kum oranı : 0,4 ** agregali			

**Tablo 5. FRP uygulamasında kullanılan yapıştırıcıların mekanik ve fiziksel özellikleri.**

Yapıştırıcı Türü	Sikadur 30	Sikadur 52
Kimyasal Yapısı	Epoksi Reçinesi	Enjeksiyon Reçinesi
Yoğunluk (kg/l)	1.65 +/- 0.1	1.085
Basınç Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	70-80 (7 gün)	53 (10 gün)
Elastisite Modülü (N/mm <sup>2</sup> )	9600 / 11200	-
Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	24-27 (7 gün)	25 (10 gün)
Yapışma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	>4 (7 gün)	>4 (7 gün)

FRP'nin mekanik özellikleri ise, Tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 6. FRP'nin boyutları ve malzeme özellikleri.**

FRP tipi	SikaCarbodur 1012
Birim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	1.60
Genişlik (mm)	100
Kalınlık (mm)	1.2
Kopma Uzaması (% min)	>1.70
Nihai Çekme Dayanımı, f <sub>tu</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	35
Elastisite Modülü, E <sub>f</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	165000

### 3. 2. Deney Sonuçları

Deneye tâbi tutulan modellerin, deney sonucunda elde edilen taşıma gücü ve maksimum sehim değerleri Tablo 7'de verilmiştir.

Laboratuar ortamında gerçekleştirilen deneyler sonucunda örnek gösterim olarak B09 kirişinde oluşan etkiler Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir. Test edilen kirişlerde, yüklemenin başlangıcında yerdeğistirmeler çok küçük değerlerde seyretmiş, çekme bölgesinde ilk çatlak oluşuktan itibaren yerdeğistirme değerlerinin artmaya başladığı görülmüştür. Kirişlerin deney sonrasındaki görünüşlerine bakıldığında, kirişin çekme tarafında beklendiği üzere eğilme ve kesme çatlaklarının oluştuğu gözlenmiştir.

**Tablo 7. Deneysel çalışma sonucu taşıma gücü, maksimum sehim ve göçme biçimi.**

Deney Elemanı	Yük kapasitesi (kN)	Maksimum Sehim, δ (mm)	Göçme biçimi
B01	199.7	2.83	FRP ayrışması
B02	197.2	2.77	eğilme
B03	194.4	2.65	eğilme
B04	194.0	2.67	FRP ayrışması
B05	194.4	2.74	eğilme
B06	197.6	2.56	eğilme
B07	211.0	2.38	eğilme
B08	206.9	2.59	eğilme
B09	191.4	2.51	eğilme
B10	199.1	2.71	eğilme
B11	174.0	2.75	eğilme
B12	179.6	2.94	eğilme
B13	203.1	2.39	FRP ayrışması
B14	207.2	2.44	eğilme
B15	62.4	5.16	eğilme

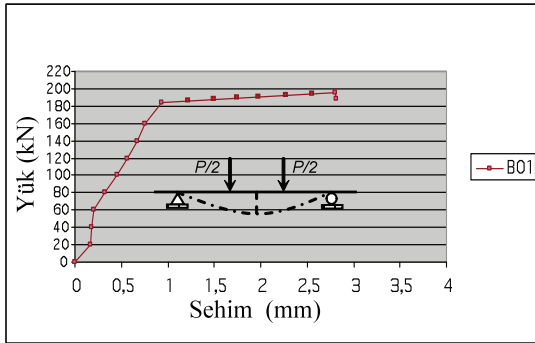


Şekil 3. B09 deney elemanı-kirişte oluşan çatlaklar.



Şekil 4. B09 deney elemanı- FRP uç kısmında ayrışma ve betonda çatlaklar.

Deney elemanlarına ait, yük-sehim karakterini göstermek adına B01 kirişinde elde edilen yük-sehim eğrisi Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. B01 deney elemanının yük-sehim eğrisi  
( $t_a < 1$  mm, Yapıştırıcı : Sikadur 30,  
Beton Yüzeyi: Kuru, C30/37).

FRP'nin bitim noktası olan levha başlarında, kesme çatlaklarının meydana geldiği ve deney elemanlarının tamamına yakınında karbon fiberin uç kısmından ayrıştığı gözlemlenmiştir. Kirişin levha ile güçlendirilmiş bölgesinde eğilme deformasyonlarının az olması dikkati çekmiştir.

Levha başlarında ve ortasında kopma-yarılma olmamıştır. Yapıştırıcı kalınlığının artmasının,

düşey yerdeğiştirmeleri azalttığı sonucuna varılmıştır. Karbon liflerin, beton yüzeyi nemli iken yapıştırılmasının dayanımda ve sehim büyüklüklerinde önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir.

### 3. 3. Sonlu Elemanlar Analizi

Çalışmada, monotonik yüke maruz bırakılan betonarme kirişlerin analizi, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımı olan ve mekanik problemlerin nümerik çözümünde kullanılan ANSYS WB sonlu elemanlar programı, modelin analizinde kullanılmak üzere seçilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemini esas alan ANSYS programı, 1971 yılından günümüze kadar, kendisine daha büyük uygulama alanı bulacak şekilde geliştirilmiştir (Moaveni, 1999).

#### 3. 3. 1. ANSYS® WB ile Beton ve Betonarme Modeli

Ansys sonlu elemanlar programı beton malzemesinde, çok eksenli gerilme durumu için William-Warnke tarafından geliştirilmiş olan kırılma modelini kullanmaktadır. Bu kriter aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir (William ve Warnke, 1974).

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0 \quad (1)$$

Dnk.1'de, Fasal gerilme durumunun bir fonksiyonunu, S beton gerilme çizelgesindeki beş parametre asal gerilme terimleriyle ifade edilen kırılma yüzeyini ve  $f_c$  ise tek eksenli basınç dayanımını temsil etmektedir. Söz konusu parametreler; tek eksenli çekme dayanımı, tek eksenli basınç dayanımı, iki eksenli basınç dayanımı, açık ve kapalı çatlaklar için kesme transfer katsayısıdır. Eğer Dnk. 1 sağlanamaz ise, ezilme ve çatlama meydana gelmeyecektir. Bunların dışında malzeme ya ezilecektir, ya da çatlayacaktır. Eğer bütün gerilmeler basınç ise ezilme meydana gelir. Ancak asal gerilmelerden herhangi biri çekme ise malzeme çatlayacaktır.

Çelik, betondan daha kolay ve gerçeğe yakın tanımlanabilir homojen ve izotrop bir malzemedir. Özellikleri, beton gibi çevre koşullarına ve zamana bağlı değildir. Donatı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi başlangıçta doğrusal elastiktir. Bu bölgede şekil değiştirmeler yüklemeye kaldırılınca geri döner. Bu elastiklik durumu orantılılık sınırına kadar, doğrusallıkta akma noktasına kadar devam etmektedir. Orantılılık sınırından sonra plastik deformasyonlar oluşmaya başlar. Orantılılık sınırı ile akma noktası arasında fark çok küçüktür. Bu nedenle birleştirilip tek bir nokta olarak ele alınmıştır. Gerçekte akma noktasından sonra bir akma platosu ve onu takip eden bir pekleşme bölgesi bulunurken araştırmacılar modellemelerde çeliğin bu davranışını

idealize ederek kullanırlar. Bu çalışmada akmadan sonraki dayanım artımı ihmal edilmiş, çelik malzemesi Von Mises akma kriterini esas alan elastik-tam plastik (bilinear izotropik pekleşmeli) olarak tanımlanmıştır.

### 3.3.1.1. Von-Mises Kriteri (Eşdeğer Gerilme Kriteri)

Bu teoriyi Von-Mises, Huber ve Hencky geliştirmiştir. Eşdeğer gerilme, Dnk. 2 ile asal gerilmeler cinsinden ifade edilebilir:

$$\sigma_e = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (2)$$

Eşdeğer gerilme (von-mises gerilmesi olarak ta adlandırılır) sık sık tasarımda kullanılır, çünkü, tek bir pozitif gerilme değeri ile herhangi keyfi üç boyutlu gerilme durumu ifade edilebilir. Eşdeğer gerilme, kırılma teorisinin sünek malzemenin akma noktasını öngörmeye kullanıldığı maksimum eşdeğer gerilmenin bir parçasıdır.

Von Mises veya eşdeğer şekil değiştirme ise,

$$\varepsilon_e = \frac{1}{1+\nu} \left( \frac{1}{2} \left[ (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 \right] \right)^{1/2} \quad (3)$$

Burada, efektif poisson oranıdır. Malzeme poisson oranı, elastik şekil değiştirme için hesaplanan değerdir ve plastik deformasyon için 0.5 alınmalıdır.

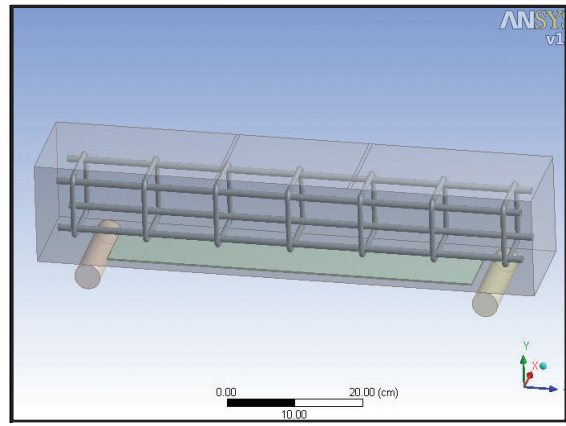
### 3.3.1.2. Newton – Raphson Yöntemi

ANSYS sonlu elemanlar programı, lineer olmayan davranış için Newton-Raphson metodunu kullanmaktadır. Lineer olmayan bir denklemin çözümü için iki ana yaklaşım söz konusudur; kapalı yöntemler ve açık yöntemler. Kapalı yöntemlere örnek olarak; ikiye bölme, yer değiştirme, artırmalı aramalar gibi yöntemler sayılabilir. Bu yöntemlerde, kökü içeren veya diğer noktalardan ayıran bir aralığın tahmin edilmesi ile çözüme başlanır ve bu aralık sistematik olarak küçültülür. Kapalı yöntemler, fonksiyonların kökleri civarında fonksiyonun işaret değiştirmeleri gerçeğini çözüm için bir kural olarak kullanırlar. Kökün ilk tahmini için iki adet değere ihtiyaç duyulur. İlk tahmin değerleri kökü kısıpca almalı ve aranılan kökün farklı taraflarında bulunmalıdır ki, iterasyon ilerledikçe köke yaklaşılsın. Açık yöntemler ise, sistematik deneme yanılma iterasyonlarını içerir, ancak ilk tahmin edilen değerin kökü içeren bir aralıkta olması gerekmez. Bu yöntemler genellikle hesaplama açısından kapalı yöntemlere göre daha etkilidir ancak her zaman yakınsamazlar. Newton-Raphson Metodu bu yaklaşıma örnek olarak verilebilir.

Program kullanılarak monotonik yükleme etkisi altındaki FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin analizine yönelik bir örneklemeye yapılması

amaçlanmıştır. Betonarme kiriş modeli Şekil 6'da verilmektedir. Boyuna ve enine donatılar Solidworks katı modelleme programında hazırlanmış ve Ansys WB'e aktarılmıştır. Ansys ile gerçekleştirilen analizlerde, arayüz gerilme dağılımlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yük etkisi altındaki betonarme kirişte, çekme kuvvetleri öncelikli karbon fiberde oluşacak ve arayüz gerilmeleri yoluyla kirişe aktarılacaktır. Kompozit malzeme özellikleri Şekil 7'de verilmiştir.

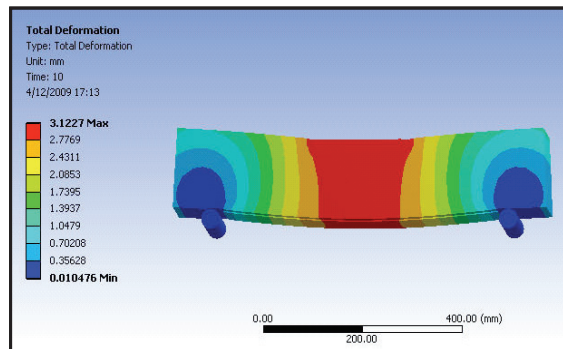
C30/37 beton sınıfına ait deney elemanının Ansys'te modellenerek yük uygulanma sonucu kirişin deforme olmuş hali incelendiğinde, maksimum yerdeğiştirmenin beklendiği üzere kirişin ortasında oluştuğu görülmektedir (Şekil 8).



Şekil 6. Ansys WB'de oluşturulmuş kiriş modeli.

Concrete		Structural Steel	
<b>Structural</b>	Add/Remove Properties	<b>Structural</b>	Add/Remove Properties
Young's Modulus	32000 MPa	Young's Modulus	2.e+005 MPa
Poisson's Ratio	0,2	Poisson's Ratio	0,3
Density	2,4e-006 kg/mm <sup>3</sup>	Density	7,85e-006 kg/mm <sup>3</sup>
Tensile Ultimate Strength	2,9 MPa	Thermal Expansion	1,2e-005 1/°C
Compressive Ultimate Strength	30, MPa	Tensile Yield Strength	420, MPa
Multilinear Isotropic Hardening		Tensile Ultimate Strength	500, MPa
<b>FRP_SikaCarbodor1012</b>		<b>Adhesive</b>	
<b>Structural</b>	Add/Remove Properties	<b>Structural</b>	Add/Remove Properties
Young's Modulus	1,65e+005 MPa	Young's Modulus	11200 MPa
Poisson's Ratio	0,2	Poisson's Ratio	0,22
Density	1,6e-006 kg/mm <sup>3</sup>	Density	1,65e-006 kg/mm <sup>3</sup>
Compressive Yield Strength	75, MPa	Tensile Ultimate Strength	25, MPa
Tensile Ultimate Strength	35, MPa	Compressive Ultimate Strength	75, MPa

Şekil 7. Kompozit model malzeme özellikleri.

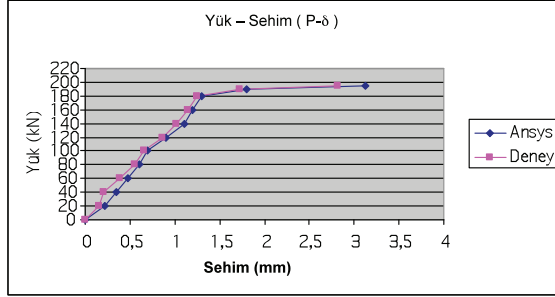


Şekil 8. Modelin deforme olmuş hali.



### 3. 4. Deneysel Çalışma ve Ansys Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

C30/37 beton sınıfına göre, deneysel çalışma ve Ansys'te oluşturulan modelin yük-sehim eğrisi incelendiğinde, davranış açısından birbirine oldukça benzediği görülmektedir (Şekil 9). Deneysel çalışma ve Ansys analizi sonucu kirişte oluşan yerdeğiştirmeler Tablo 8'de görülmektedir.



Şekil 9. Deneysel ve Ansys'ten elde edilmiş P-δ eğrisi.

Tablo 8. Deneysel çalışma ve Ansys'te elde edilen sehim değerleri.

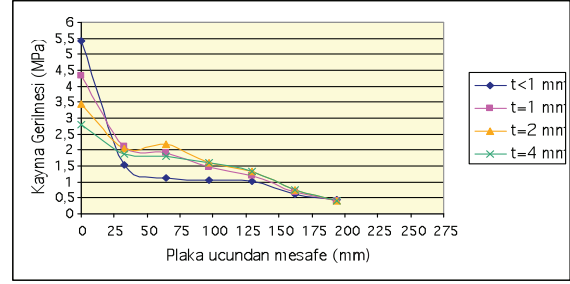
Maksimum Sehime (mm)	
Deneysel	2.88
ANSYS WB	3.12

### 3. 5. ANSYS WB'de Arayüz Gerilme Değerlerinin Belirlenmesi

Deneysel çalışmada kullanılan betonarme kirişlerin Ansys WB'de modellenmesi ve analizi sonucu yapıştırıcı-beton ve yapıştırıcı-FRP ara yüzünde kayma gerilmeleri ve normal gerilmeler elde edilmiştir. Grafikler, yapıştırıcı türü, yapıştırıcı kalınlığı ve beton yüzeyinin nemli/kuru olduğu durumlarına göre karşılaştırmaya imkân verecek şekilde oluşturulmuştur. Yapıştırıcı türü olarak Sikadur 30 ve Sikadur 52, yapıştırıcı kalınlığı olarak <1 mm, 1 mm, 2 mm ve 4 mm alınırken, FRP uygulanmadan önce beton yüzeyi ıslatılarak yüzeyin neme doygun olması sağlanmış ve FRP bu şekilde uygulanmıştır.

#### 3. 5. 1. Arayüz Gerilmelerinde Yapıştırıcı Kalınlığının Etkisi

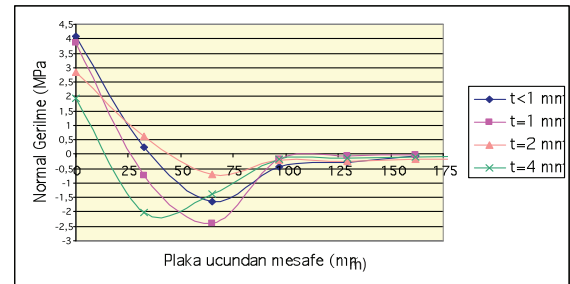
Kullanılan beton ve donatı sınıfıyla, yapıştırıcı türü aynı olan, kuru beton yüzeye FRP'nin uygulandığı betonarme kirişlerde, değişik yapıştırıcı kalınlıklarına sahip FRP'li betonarme kirişlere yük uygulanması sonucu elde edilen kayma gerilmeleri ve normal gerilmelerin değişimi, B01, B02, B03 ve B09 deney elemanları için Ansys'te elde edilmiştir. B01'de <1 mm, B02'de 1 mm, B03'te 2 mm, B09'da 4 mm yapıştırıcı kalınlığı uygulanmıştır. Gerilme değerleri, FRP'nin uzunluğu boyunca kenar kısımdan alınan değerlerdir. Şekil 10'da, kayma gerilmeleri (yapıştırıcı-FRP arası), Şekil 11'de ise normal gerilmeler gösterilmektedir.



Şekil 10. Arayüz kayma gerilmelerinde yapıştırıcı kalınlığının etkisi.

Şekil 10'dan görüleceği üzere, yapıştırıcı kalınlığının en büyük olduğu B09 elemanında, kayma gerilme değerleri daha küçük elde edilmiştir. 1 mm'den küçük yapıştırıcı kalınlığına sahip B01 elemanında ise, diğer elemanlara göre daha büyük gerilme değerleri elde edilmiştir. Arayüz kayma gerilmesi yoğunluğu ve seviyesinin, yapıştırıcı kalınlığından kayda değer ölçüde etkilendiği anlaşılmaktadır. Genel olarak mühendislik uygulamalarında, uygulanan yapıştırıcı kalınlığı küçük değerlere karşılık gelmekte ve yapıştırıcı tabaka kalınlığının etkisinin dikkate alınması gerektiği açık olarak görülmektedir. Bu itibarla, yapıştırıcı kalınlığının artırılması, özellikle FRP'nin kenar bölgelerinde önerilmektedir.

Yapıştırıcı kalınlıklarının normal gerilme değerlerine etkisi Şekil 11'de görülmektedir. Sayısal olarak bir karşılaştırma yapılacak olursa, yapıştırıcı kalınlığının en büyük olduğu B09 elemanında, normal gerilme değerleri en küçük değerlere sahiptir. 1 mm'den küçük yapıştırıcı kalınlığına sahip B01 elemanında ise, diğer elemanlara göre daha büyük gerilme değerleri elde edilmiştir. Yapıştırıcı kalınlığının artmasının, kayma gerilmelerinde olduğu gibi, normal gerilme seviyelerine bakıldığında da azalmaya yol açtığı anlaşılmaktadır. Grafikten, FRP bitim yerlerine yakın noktalarda normal gerilmelerin ekstrem değerlere ulaştığı da görülmektedir.



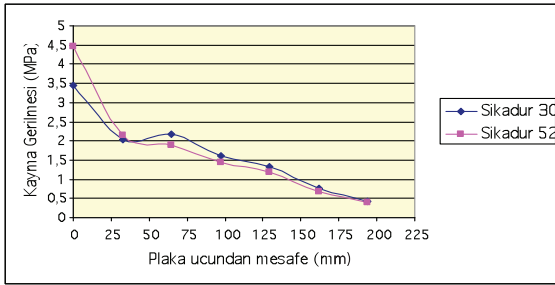
Şekil 11. Arayüz normal gerilmelerinde yapıştırıcı kalınlığının etkisi.

#### 3. 5. 1. Arayüz Gerilmelerinde Yapıştırıcı Türünün Etkisi

Kullanılan beton ve donatı sınıfıyla, yapıştırıcı kalınlığı aynı olan, kuru beton yüzeye FRP'nin uygulandığı betonarme kirişlerde, Sikadur 30 ve Sikadur 52 yapıştırıcılarının kullanıldığı FRP'li

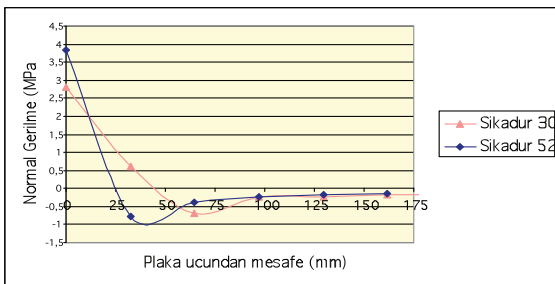
betonarme kirişlere yük uygulanması sonucu elde edilen kayma gerilmelerinin değişimi, B03 ve B05 deney elemanları için Ansys'te elde edilmiştir. Şekil 12'deki kayma gerilmeleri, yapıştırıcı-FRP arasındaki gerilmeleri göstermektedir. Şekil 13'te ise, normal gerilme değerleri verilmiştir. B03 elemanında Sikadur 30 ve B05 elemanında Sikadur 52 yapıştırıcıları kullanılmıştır. Gerilme değerleri, FRP'nin uzunluğu boyunca kenar kısımdan alınan değerlerdir.

Şekil 12'den görüleceği üzere, yapıştırıcı türünün değişmesinin gerilmelere önemli oranda bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Ayrıca, deneysel çalışma sonucunda gerek maksimum sehim, gerekse yük taşıma kapasitesi açısından da önemli derecede fark olmadığı görülmüştü. Yine de, Sikadur-30 yapıştırıcısının uygulama kolaylığı bir avantaj olarak belirtilebilir. Diğer yandan, plaka ucundan uzaklaştıkça kayma gerilmelerinin azaldığı, FRP bitim noktalarına yakın yerlerde kayma gerilmelerinin maksimum seviyeye ulaştığı görülmektedir.



Şekil 12. Arayüz kayma gerilmelerinde yapıştırıcı türünün etkisi.

Yapıştırıcı türünün değişmesinin, FRP uç bölgesinde etkisi olduğu görülmektedir. Her iki yapıştırıcı için de, plaka ucundan itibaren normal gerilmelerin azaldığı anlaşılmaktadır (Şekil 13).



Şekil 13. Arayüz normal gerilmelerde yapıştırıcı türünün etkisi.

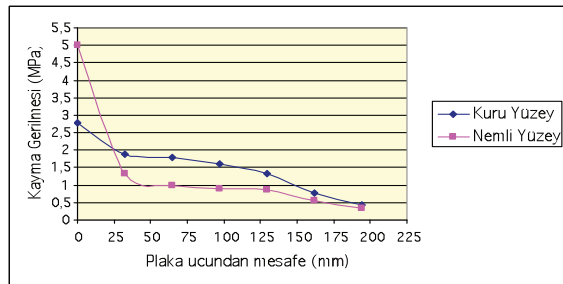
### 3. 5. 3. Arayüz Gerilmelerinde Beton Yüzeyinin Etkisi

FRP, betonarme kirişin alt yüzüne uygulanırken beton yüzeyinin nemli ve kuru olduğu duruma göre, Ansys'te analizler yapılmış ve yapıştırıcı tabakadaki kayma gerilmesi ve normal gerilme değerleri elde edilmiştir. Betonarme kirişler 24 saat kür havuzunda

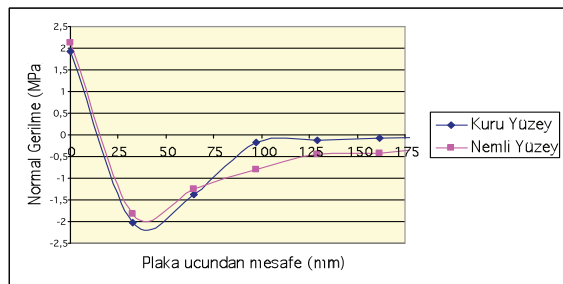
bekletilmiş ve çıkarıldıktan sonra laboratuvar ortamında 24 saat bekletildikten sonra yapıştırıcı uygulaması gerçekleştirilmiştir. Yapıştırıcı elastisite modülü % 10 azaltılarak, beton yüzeyindeki nemin etkisi analizlere yansıtılmıştır (Aiello v.d., 2006). Deney elemanlarından, B09 ve B10'un programda malzeme özellikleri girilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. B09 elemanında, beton yüzeyi kuru iken FRP uygulanmış, B10 elemanında ise, beton yüzeyi nemli iken uygulama yapılmıştır. Şekil 14'te kayma gerilmeleri, Şekil 15'te ise normal gerilme değerleri karşılaştırma için verilmiştir.

Şekil 14'ten görüleceği üzere, beton yüzeyin kuru olduğu durumda uygulamanın yapıldığı B09 elemanında, kayma gerilmesi değerleri daha küçük elde edilmiştir. Nemli yüzeye FRP uygulamasında, yapıştırıcı karakterinin kısmen değiştiği ve buna bağlı olarak gerilme değerlerinin etkilendiği görülmektedir. Deneyde ise, B09 elemanının maksimum sehim miktarı daha az elde edilmiştir. Diğer parametrelere göre karşılaştırmalarda olduğu gibi plaka ucundan itibaren kiriş ortasına doğru kayma gerilmelerinin azaldığı, FRP bitim noktalarına yakın yerlerde kayma gerilmelerinin maksimum seviyeye ulaştığı görülmektedir.

Beton yüzeyin kuru olduğu durumda uygulamanın yapıldığı B09 elemanında, normal gerilme değerleri daha küçük elde edilmiştir. Nemli yüzeye FRP uygulamasında, yapıştırıcı karakterinin kısmen değiştiği ve buna bağlı olarak gerilme değerlerinin arttığı görülmektedir (Şekil 15).



Şekil 14. Uygulamada beton yüzeyinin kayma gerilmelerine etkisi.



Şekil 15. Uygulamada beton yüzeyinin normal gerilmelere etkisi.

### 3. 6. Deneysel Çalışma ve Ansys Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

#### 3. 6. 1. Genel

Bu çalışmada FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerde, belirtilen diğer parametrelere ek olarak FRP'nin betona uygulanması aşamasında, beton yüzeyindeki nemin, yapışma derecesine ve dolayısıyla yük taşıma kapasitesi ile şekil değiştirmeye olan etkisi araştırılmıştır. Nem içeriği, betonarme kirişler ıslatılarak oluşturulmuştur. Yapışma anında beton yüzeyinin neme doygun olduğu bilinmektedir. Ayrıca, yapıştırıcı kalınlığı ve yapıştırıcı türü gibi diğer parametrelerin nem ile birlikte etkisi araştırılmıştır.

Ansys analiz programıyla ile yapılan analizlerde deneysel olarak elde edilen yük taşıma kapasiteleri ve malzeme özellikleri kullanılarak,, kayma gerilmesi ve normal gerilme değerleri teorik olarak hesaplanmış ve kiriş üzerindeki gerilme dağılımları grafiksel olarak gösterilmiştir.

Gerçekleştirilen deneysel çalışma ve Ansys analiz programında gerçekleştirilen analizlerin yük-yer değiştirme ve taşıma gücü yönünden değerlendirilmesi aşağıda verilmiştir.

#### 3. 6. 2. P-δ İlişkilerinin Karşılaştırılması

FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin arayüz gerilmelerinin belirtilen parametrelere bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Literatürdeki modeller sadece FRP ve beton arasındaki şekil değiştirmeleri dikkate alan formüller yardımıyla geliştirilmiştir. Bu modeller, normal kuvvet, moment ve kesme kuvvetlerini dikkate alan bağıntılardan türetilmiştir.

Tablo 7'deki sonuçlara göre, FRP'li betonarme kirişlerin yük taşıma kapasiteleri referans kirişe göre yaklaşık üç kat artmıştır. Bu sonuç daha önce bu konu ile ilgili yapılmış çalışmaların sonuçlarına uymaktadır. Sikadur-30 ile gerçekleştirilen uygulamalarda, yapıştırıcı kalınlığı, yük taşıma kapasitesini önemli seviyelerde değiştirmeden, FRP'li betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin, yapıştırıcı kalınlığından bağımsız olduğu ifade edilebilir. Ancak, şekil değiştirme kapasitesi, yapıştırıcı kalınlığı arttıkça bir miktar artmaktadır. Yapıştırıcı kalınlığının bu etkisi Sikadur-52 ile yapılan uygulamalarda 2 mm'ye kadar belirgin değildir.

Kuru yüzey koşullarında, epoksi formülasyonunda agrega kullanılması şekil değiştirme kapasitesini azaltmıştır. Diğer açıdan, epoksi formülasyonunda agrega kullanımı yük taşıma kapasitesini arttırmıştır. 4 mm yapıştırıcı kalınlığında Sikadur-30 ile betonarme kirişe yapıştırılan FRP'li kirişlerde nemin, yük taşıma kapasitesine olumsuz bir etkisi görülmemiştir. Ancak nemli kirişlere FRP yapıştırırken epoksi formülasyonunda agrega kullanılması yük

taşıma kapasitesini bir miktar azaltmıştır. ANSYS ile gerçekleştirilen analiz sonuçları da, nemli yüzeye FRP uygulamasının arayüz kayma gerilmelerini azalttığını göstermektedir.

1 mm'den küçük ve 1 mm yapıştırıcı kalınlıklarında, nemli beton yüzeye yapıştırılan FRP'li betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesi önemli ölçüde değişmemektedir. Yapıştırıcı kalınlığının bu olumsuz etkisi 2 mm'den sonra ortaya çıkmaktadır. Bu durumun, yüksek yapıştırıcı kalınlıklarında epoksi tarafından emilen su miktarının artarak, yapıştırıcının FRP ve betona yapışma özelliklerini değiştirdiği sonucuna varılabilir. Nemin bu olumsuz etkisi epoksi formülasyonunda agrega kullanılarak giderilebilir. ANSYS programıyla ile yapılan analizlerde de arayüz kayma gerilmelerinin bir miktar arttığı görülmüştür.

Sikadur-30 veya Sikadur-52'nin kullanıldığı durumlarda elde edilen yük taşıma kapasiteleri aynı sonucu vermiştir (B03 ve B05). Bu kapsamda, çalışmada denenen her iki tür yapıştırıcı içinde benzer sonuçlar elde edilmiştir.

### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada, FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin davranışı incelenmiştir. Bu kapsamda, daha önce literatürde yer alan ve ilk defa kullanılan parametreler irdelenerek, kompozit elemanın gerçek davranışının belirlenmesi hedeflenmiştir.

Çalışma, deneysel çalışma ve sonlu eleman analizleri olmak üzere iki kısımdan oluşmuştur. Deneysel çalışmada üretilen onbeş adet betonarme kirişin bir tanesi referans kiriş olarak belirlenmiş, diğer kirişlere ise epoksi esaslı yapıştırıcıyla FRP uygulaması yapılmıştır. Uygulamada, beton yüzeyinin durumu, yapıştırıcı kalınlığı, yapıştırıcı türü parametrelerinin etkisini belirlemek amacıyla laboratuvar ortamında eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Eğilme deneyinde, kiriş alt orta noktasına düşey yer değiştirme ölçer yerleştirilerek, deney süresince, bilgisayar kontrollü olarak, yük-yer değiştirme eğrileri elde edilmiştir. Deneyler, değişik yapıştırıcı kalınlığı, yapıştırıcı türü ve beton yüzeyine sahip kirişler üzerinde uygulanmış ve sonuçta, kirişlerin nihai taşıma kapasiteleri, yük-yer değiştirme eğrileri elde edilmiş, FRP'nin ayrışma noktaları ve eğilme/kesme çatlaklarının yerleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmada, beklendiği üzere, FRP'li betonarme kirişlerin eğilme etkisi altındaki taşıma kapasitesi artmış, sehim değerleri azalmış, çatlak sayısı ve genişlikleri üzerinde müspet bir etkisi olmuştur. İkinci aşama olarak, deneysel çalışmanın anlamlı olabilmesi ve çalışmanın bütünlüğünün sağlanabilmesi açısından sonlu eleman analiz programı kullanılmıştır. Yazılım olarak, katı modellenmenin yapılabildiği, üç boyutlu olarak eleman davranışının

incelenemediği (gerilme, şekil değiştirme vb.) Ansys WB analiz programı seçilmiştir. Programda, FRP'li betonarme kiriş, örnek bir deney elemanı alınarak, malzeme özelliklerinin girilmesiyle modellenmiştir. Literatürde mevcut deneysel çalışmalar göz önüne alındığında, deneysel çalışmada kullanılan kiriş sayısının, bilgisayar modelleri ve analizlerinin gerçeğe uygunluğu hakkında daha kesin bir yargıya varılması için yeterli olduğu düşünülmüştür. Sonlu eleman analizi sonuçlarının, deneysel sonuçlarla uyumluluğunun mukayeseli olarak irdelenmesiyle, kompozit eleman davranışının tüm yönleriyle ele alınması sağlanmıştır.

FRP'nin güçlendirme amaçlı olarak kullanılması yaygın olsa da, çalışma da, arayüz gerilme değişimleri incelenmesi amaçlandığından, beton dayanım sınıflarının yüksek olması ve güçlendirme için göreceli olarak ihtiyaç gerekmediği düşüncesi bir sakınca arz etmemektedir.

Betonarme kirişlerin lif takviyeli plastiklerle yüksüz olarak (münferit) güçlendirilmesini kapsayan çalışma sonucunda elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda belirtilmiştir :

- FRP'li betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin, beklendiği üzere, referans kirişe göre önemli oranda arttığı görülmüştür.
- FRP ile güçlendirilen kirişlerde en kritik bölge, yükleme sürecinde plaka uçları olmaktadır.
- Yapıştırıcı kalınlıklarının artırılması, normal ve kayma gerilmelerinde azalmaya yol açmaktadır.
- Beton ve yapıştırıcı arasındaki gerilmeler, betonun çekme mukavemetini aştığında, plaka uç bölgesinde ayrışmaya neden olmaktadır.
- Nemli beton yüzeye yapıştırılan FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerde 2 mm değerine kadar yapıştırıcı kalınlıklarında, yük taşıma kapasitesinde önemli farklılıklar olmamaktadır. 2 mm ve 4 mm yapıştırıcı kalınlıklarında ise, epoksi tarafından emilen su miktarı arttığı için yapıştırıcının FRP ve betona yapışma özellikleri değişmektedir.
- Yapıştırıcı kalınlığının büyük olması, sehim miktarında azalmaya yol açmakta, fakat kirişlerin âni göçme yapma olasılığına neden olabilmektedir.

Deneysel çalışma ve sonlu eleman analizleri ile elde edilen sonuçlar göz önüne alınarak, araştırma ve uygulama önerileri aşağıda sıralanmıştır:

- Eğilme etkisine karşı güçlendirilmiş betonarme kirişlerin tekrarlı yükler altında davranış ve dayanımları incelenmelidir.
- Yüklü durumda iken FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin davranışları irdelenmelidir.
- FRP şeritler betonarme kirişe yapıştırılırken yüzey özellikleri önem arz etmektedir. Yüzeyler gereğince temiz, pürüzsüz olarak hazırlanmalıdır. Aksi halde, yapışma mukavemeti beklenenden daha düşük çıkacak ve taşıma kapasitesinde beklenmeyen kayıplar olacaktır.
- Eğilme etkisine ilâve olarak, FRP ile güçlendirilmiş kirişlerde, kesme kuvvetlerinin bulunduğu kesitlerde, davranış ve dayanımları araştırılmalıdır.
- Kompozit elemanın şekil değiştirme ifadesine, beton yüzeyinin nemli olduğu durumun etkisi de katılarak geliştirilmeli ve yük taşıma kapasitesini veren bağlantılar yeniden elde edilmelidir.
- Güçlendirilmiş betonarme kirişlerin yüklemeye sonuca, kesme etkisinden dolayı göçmemesi için gerekli hesapların yapılarak, kesme kapasitelerinin yeterli olması sağlanmalıdır.

Kullanılan çözüm yollarının değiştirilmesi suretiyle daha gerçekçi sonuçlara ulaşılması, yapılacak çalışmalar için hedef teşkil etmektedir.

## 5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Birimi'nin (B.A.P) T-2145 numaralı projesi ile desteklenmiştir.



## KAYNAKLAR

- Aiello, M.A, Leone, M., Aniskevich, A.N & Starkova, O.A. 2006. Moisture Effects on Elastic and Viscoelastic Properties of CFRP Rebars and Vinylester Binder. ASCE, Journal of Materials in Civil Engineering. (18), 686-691.
- Alsayed, S.H. 1998. Flexural Behaviour of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars. Cement & Concrete Composites. (20), 1-11.
- Chen, J.F & Teng, J.G. 2003. Shear Capacity of FRP-Strengthened RC Beams: FRP Debonding. Construction and Building Materials. (17), 27-41.
- Çetinkaya, N., Kaplan, H. & Şenel, Ş.M. 2004. Betonarme Kirişlerin Lifli Polimer (FRP) Malzemeler Kullanılarak Onarım ve Güçlendirilmesi. PAU Mühendislik Bilimleri Dergisi. (10), 291-298.
- Ferreira, A.J.M, Camanho, P.P., Marques, A.T & Fernandes, A.A. 2001. Modelling of Concrete Beams Reinforced with FRP Re-bars. Composite Structures. (53), 107-16.
- Gao, B., Leung, K.Y & Kim, J-K. 2005. Prediction of Concrete Cover Separation Failure for RC Beams Strengthened with CFRP Strips. Engineering Structures. (27), 177-89.
- 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.
- Jianzhuang, X., Li, J. & Quanfan, Z. 2004. Experimental Study on Bond Behaviour between FRP and Concrete. Construction and Building Materials. (18), 745-52.
- Lee, H.K & Hausmann, L.R. 2004. Structural Repair and Strengthening of Damaged RC Beams with Sprayed FRP. Composite Structures. (63), 201-9.
- Khalifa, A. & Nanni, A. 2000. Improving Shear Capacity of Existing RC T-Section Beams using CFRP Composites. Cement & Concrete Composites. (22), 165-74.
- Masoud, S. & Soudki, K. 2006. Evaluation of Corrosion Activity in FRP Repaired RC Beams, Cement & Concrete Composites. (28), 969-77.
- Moaveni, S. 1999. Finite Element Analysis, Theory and Applications with ANSYS. Bill Stenquist, Prentice Hall Inc., New Jersey.
- Özcan, Z. 2005. Betonarme Kirişlerin Kompozit Malzemelerle Güçlendirilmesi. Deprem Sempozyumu. Kocaeli, 2005.
- Pesic, N. & Pilakoutas, K. 2003. Concrete Beams with Externally Bonded Flexural FRP-Reinforcement Analytical Investigation of Debonding Failure. Composites: Part B 34. 327-38.
- 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.
- Teng, J.G, Yuan, H. & Chen, J.F. 2006. FRP-to-Concrete Interfaces between two Adjacent Cracks : Theoretical Model for Debonding Failure. International Journal of Solids and Structures. (43), 5750-78.
- William, K.J & Warnke, E.P. 1974. Constitutive Model for the Tri-axial Behaviour of Concrete. IABSE, Report No.19, Bergamo, 1-30.
- Yang, J. & Ye, J. 2005. Closed-form Rigorous Solution for the Interfacial Stresses in Plated Beams using a two-stage Method. In: Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures. 175-82.
- Yang, J., Ye, J. & Niu, Z. 2008. Simplified Solutions for the Stress Transfer in Concrete Beams Bonded with FRP Plates. Engineering Structures. (30), 533-45.