



**Makale  
(Article)**

## **Fiber Takviyeli Polimer (FRP) Uygulanan Betonarme Kirişlerde Moment-Eğrilik İlişkisi**

**Barış SAYIN\***, **Barış YILDIZLAR\*\***, **Cemil ÖZYAZGAN\*\*\*\***

\*Dr. İnş. Yük. Müh., İstanbul Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı, İstanbul/TÜRKİYE

\*\*Dr. İnş. Yük. Müh., İstanbul Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı, İstanbul/TÜRKİYE

\*\*\*İnş. Yük. Müh., İstanbul Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı, İstanbul/TÜRKİYE  
\*\*\*\*barsayin@istanbul.edu.tr

### **Özet**

Bu çalışmada, alt yüzeyine FRP (lif takviyeli polimer) uygulanan betonarme kirişlerin moment-eğrilik ilişkileri, mevcut deneysel bir çalışmadaki betonarme kiriş modellerinin kullanılması suretiyle, analitik olarak araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, deneysel çalışmadaki farklı yapıştırıcı kalınlıklarına sahip dört adet FRP'li betonarme kiriş ile referans betonarme kiriş modeli, analitik olarak irdelenmiştir. Analitik çalışmada, betonarme kesitlerin moment-eğrilik ilişkisini belirlemek için geliştirilmiş mevcut bir yazılıma, FRP ve yapıştırıcı modülleri eklenerek, gerilme-şekil değiştirme ve moment-eğrilik ilişkileri belirlenmiş, böylece mukayese imkânı sağlanmıştır. Bu kapsamda, FRP'nin, kompozit eleman davranışındaki etkisi araştırılmış, ayrıca, yapıştırıcı kalınlıklarındaki farklılığın eğilme rijitliğinde (moment-eğrilik) ve taşıma gücündeki rolü ortaya konulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Lif takviyeli polimer, Moment-eğrilik ilişkisi, Betonarme kiriş, Yapıştırıcı.

## **The Moment-Curvature Relationship on RC Beams with Fibre Reinforced Polymer (FRP)**

### **Abstract**

In this study, it has been analyzed that moment-curvature relationship of FRP (fibre reinforced polymer) strengthened RC beams using reinforced concrete beam models in an experimental study in literature, analytically. Four different adhesive thickness of four reinforced concrete beams with FRP and reference RC beam model in the experimental study have been examined as analytical. FRP and adhesive codes has added the existing program which have been developed determining moment-curvature relationship of reinforced concrete sections, and thus, it has been obtained stress-strain and moment-curvature relationship, after, compared with each other. In this scope, the effect behavior of composite element of FRP has been investigated, also, the role of variations different adhesive thicknesses in flexural rigidity was revealed.

**Keywords :** Fibre Reinforced Polymer, Moment-Curvature Relationship, RC Beam, Adhesive.

*Bu makaleye atf yapmak için*

*Sayın B., Yıldızlar B., Özyazgan C., "Fiber Takviyeli Polimer (FRP) Uygulanan Betonarme Kirişlerin Moment-Eğrilik İlişkisi" Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi 2010, 6(2) 42-56*

*How to cite this article*

*Sayın B., Yıldızlar B., Özyazgan C., "The Moment-Curvature Relationship of RC Beams with Fibre Reinforced Polymer (FRP)" Electronic Journal of Construction Technologies, 2010, 6 (2) 42-56*

## 1. KONU

Betonarme kirişlerin, dıştan FRP (lif takviyeli polimer) şeritlerle güçlendirilmesi, betonarme yapıları güçlendirmek/onarmak için kullanılmakta ve uzun süredir yapı endüstrisinde etkin bir yöntem olarak kabul edilmektedir [1]. FRP kompozitlerinin yaygın kullanılmasında, yüksek dayanım-ağırlık oranı, iyi korozyon direnci, farklı kesit şekilleri ve köşelere uygulanabilirlik avantajları gibi özellikleri önemli rol oynamaktadır.

FRP uygulanan betonarme kirişler konusunda, literatürde deneysel, analitik ve nümerik çalışmalar mevcuttur. Konuyla ilgili olarak, Gheorghiu ve arkadaşlarının (2007) gerçekleştirdikleri çalışmada, küçük ölçekli kirişler, çeşitli sayıda yorulma yüklemesi çevrimlerine ve yük şartlarına maruz bırakılmış, daha sonra monotonik yükleme sonucu göçme durumu deneysel olarak belirlenmiştir. FRP-beton birleşme noktaları, kirişlerin nihâi kapasitesini etkilemeden, yorulma yüklemesi değiştirilerek belirlenmiştir. Yük-deformasyon eğrileri ve deformasyon davranışları, çeşitli yük şartlarına mâruz kalan ve FRP ile güçlendirilen kirişlerin performansını belirlemek için ortaya konulmuştur. Çalışma sonucunda, kirişler, yorulma çevrimlerinin sayısından bağımsız olarak istikrarlı bir yorulma davranışı sergilemiştir. Kirişler, yüz bin çevrime kadar önemli sehim artması göstermiş, daha sonra, bu davranış, yük sayısına karşılık gelen maksimum değerler için asimtotik karaktere sahip deformasyonlarla stabilize olmuştur. Tüm kirişlerdeki maksimum sehimin, ilk değerine göre % 40 civarında arttığı gözlenmiştir [2].

Diğer bir çalışmada, Lee ve Hausmann (2004), hasarlı betonarme kirişlerin püskürtme FRP ile yapısal onarımı ve güçlendirilmesi konusunda çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, SFRP (püskürtme FRP) ile güçlendirilen betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesi, sünekliği ve enerji sönümlenme oranları araştırılmış, aynı zamanda, hasarlı betonarme kirişlerin onarım ve güçlendirilmesinde SFRP kullanımının uygunluğu da değerlendirilmiştir. Deneylerden, yük kapasitesindeki artışı veren yük-deformasyon eğrileri ve enerji sönümlenmesindeki değişim elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmadan, SFRP'nin, yük taşıma kapasitesini, sünekliği ve enerji sönümlenme kapasitesini önemli ölçüde artırdığını ve betonarme kirişlerin güçlendirmesi ve onarımında etkili olduğunu göstermiştir [3].

FRP'li betonarme kirişlerde, farklı durumları araştırmak adına gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda belirtildiği gibi gruplanabilmektedir:

- FRP-beton ayrışması, eğri kiriş davranışı, plaka uç gerilmeleri, plaka uç ayrışması, sünme-büzülme etkileri, farklı yük aşamalarında yük-yerdeğiştirme eğrileri gibi durumları irdelemek adına FRP-beton arasındaki arayüz gerilme dağılımlarının belirlenmesi [1-4-5-6-7-8-9-10-11],
- Cam ve karbon lifler kullanılarak, eğilme etkisinde, köprü kirişlerinin yorulma ve FRP-beton ayrışma davranışının belirlenmesi [12-13],
- FRP'yi betona uygulamakta kullanılan yapıştırıcı karakterinin inelastik ve doğrusal olmayan davranışının analitik çalışma kapsamında dikkate alınması [14],
- Korozyona maruz kalmış ve bu halde FRP uygulanan kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışı [15],
- FRP-beton arasındaki ayrışma için farklı yaklaşımların (ayrık çatlak yaklaşımı, karışık göçme biçimi, ayrışma göçme biçimleri) sunulduğu çalışmalar [16-17-18],
- FRP'li betonarme kirişlerin, paspayının koptuğu aşamada ve kirişin çatladığı durumdaki yük taşıma kapasitesinin saptanması [19-20],
- T-kesitli betonarme kirişlerin FRP uygulandığında kesme kuvveti kapasitesinin belirlenmesi [21],

- Çelik ve cam lif donatuların kullanılarak yük-sehim eğrilerinin karşılaştırılması [22]

Betondan FRP'ye gerilme transferleri, güçlendirilen betonarme elemanların davranışında temel etken olarak bilinmektedir. Çünkü gerilmelerdeki değişim, beklenmeyen erken ve ani göçmelere neden olacak kadar hassas bir yapıya sahiptir. FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerde, farklı göçme biçimleri gözlenmekte [12] ve genel olarak, 6 farklı göçme biçimi ortaya çıkmaktadır (Şekil 1) :

(i) Donatının akmasından önce basınç göçmesi: Donatı çeliği akmasından ve FRP yarılmasından önce basınç etkisi altında beton ezilmesi (beton birim kısalması nihai değeri aşınca; Eurocode 2 için 0.0035, TS500 için 0.003),

(ii) Donatının akmasından sonra basınç göçmesi: Eğilme etkisi nedeniyle çekme donatısında akma durumu. Donatıdaki akmayı, çekme bölgesindeki FRP kopmasından önce, basınç bölgesindeki beton ezilmesinin takip etmesi,

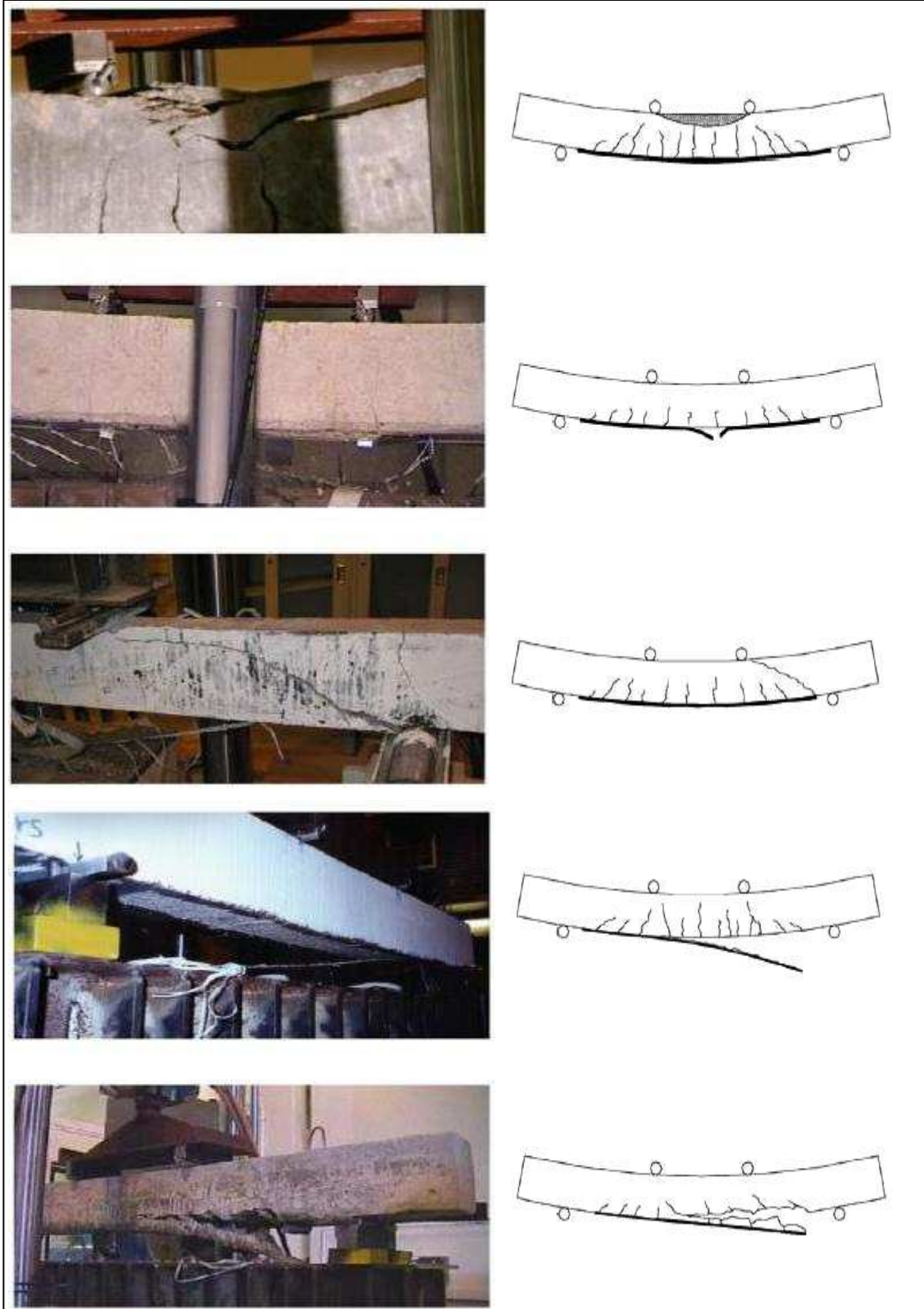
(iii) FRP şeritlerin kopması: Çekme bölgesindeki donatının akmasını takiben FRP'nin nihai şekil değiştirme değerine ulaşması sonrasında, FRP şeritlerde kopmanın gerçekleşmesi,

(iv) Kesme göçmesi: Kiriş, kesme kapasitesine ulaştığında, mesnet civarından yükleme noktasına kadar kesme çatlaklarının oluşması,

(v) FRP şeritlerin beton yüzeyden ayrışması: Dengesiz bir davranış şekli olarak, FRP'nin, yüzeyinde kalan beton parçalarıyla, uç bölgelerinden itibaren ayrışması durumudur. Bu durumu takiben, FRP şeritlerin ucundan itibaren beton elemanda eğilme veya kesme/eğilme çatlaklarının oluşması,

(vi) Kabuk betonunun sıyrılması: FRP şerit ucunda ilk çatlak oluştuktan sonra, aşamalı olarak, beton parçaları boyuna donatıdan kopmaya başlanması ve FRP ile birlikte betonarme elemandan ayrılması,

FRP ile güçlendirilen kirişler için en genel göçme biçimleri, FRP plakanın ayrışması veya paspayı betonunun ayrılması şeklindedir. Her iki beklenmeyen göçme biçimi, yapıştırıcı tabakadaki arayüz gerilme yoğunluğundan kaynaklanmaktadır.



**Şekil 1.** FRP ile güçlendirilen betonarme kirişlerin göçme biçimleri [12] : (a) basınç göçmesi (b) FRP şeritlerin kopması (c) kesme göçmesi (d) FRP şeritlerin ayrışması (e) paspayı betonunun dökülmesi

Gerçekleştirilecek olan çalışmada, deneysel bir çalışmada [26] kullanılan betonarme kirişler, analitik olarak modellenecektir. Sonrasında, betonarme kesitlerin moment-eğrilik ilişkisini belirlemek için geliştirilen programa [23], FRP ve yapıştırıcı modülleri de eklenerek, FRP'li betonarme kirişlerin gerilme-şekil değiştirme ve moment-eğrilik ilişkilerinin belirlenmesi hedeflenmektedir.

## 2. MALZEME VE YÖNTEM

### 2.1 Betonarme Kesitlerin Moment-Eğrilik İlişkisi

Eğilme momenti veya eğilmeye ilave olarak aksenal kuvvetin etkisindeki betonarme bir kesitin davranışı moment-eğrilik ilişkisinden izlenebilmektedir. Birim boydaki dönme açısı olan eğrilik, kesitteki şekil değiştirmeyi simgeleyen geometrik bir parametre olup, iki kesit arasındaki dönme açısından veya kesitteki birim şekil değiştirmelerden hesaplanabilmektedir.

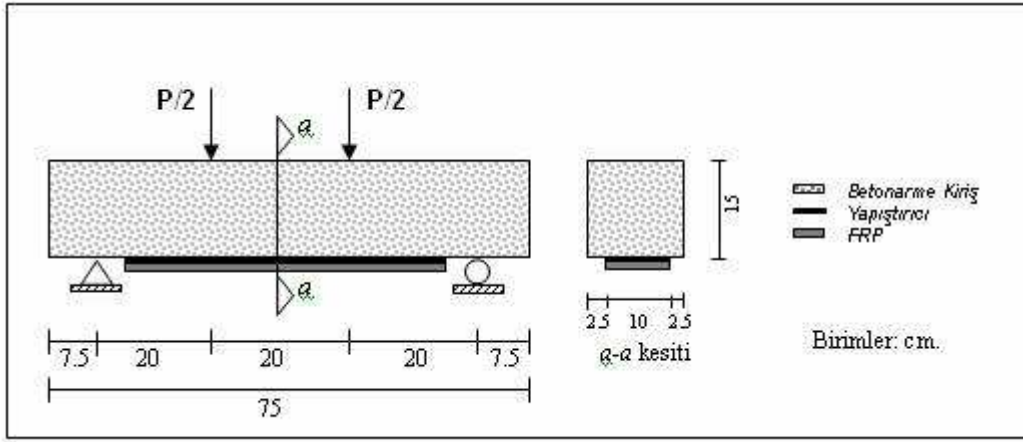
$$K = \frac{d\phi}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{\rho} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{\varepsilon_i}{y_i} \quad (2)$$

Dnk.2'deki bağıntı, şekil değiştirmiş eleman parçasının geometrisinden düzlem kesitlerin eğilmeden sonra da düzlem kalacağı varsayımından elde edilmiştir. Bağıntılarda,  $\rho$  eğrilik yarıçapı,  $K$  eğrilik,  $\varepsilon_i$  birim şekil değiştirme ve  $y_i$  tarafsız eksenden uzaklığı ifade etmektedir. Eğriliğin hesabında genelde Dnk.1 bağıntısından yararlanılır. Moment-eğrilik ilişkisi, elik ve betonun gerilme-şekil değiştirme ( $\sigma_c$ - $\varepsilon_c$ ) eğrileri için uygun modeller seçildikten sonra, yazılacak denge ve yeterli sayıda uygunluk denkleminde hesaplanmaktadır.

Deneylelerden elde edilen verilerden yararlanarak beton ve elik için geliştirilmiş olan basitleştirilmiş  $\sigma$ - $\varepsilon$  eğrileri kullanılarak, moment-eğrilik ilişkisinin analitik olarak elde edilmesi yoluna gidilmiştir. Bu tür bir analitik yaklaşımla elde edilecek moment-eğrilik ilişkisinin doğruluğu, kullanılan malzeme modellerinin ne denli gerçekçi olduğuna bağlı olmaktadır.

Analitik alışma kapsamında kullanılacak FRP'li betonarme kiriş modelinin özellikleri, literatürdeki deneysel çalışmada, eğilme etkisine maruz bırakılan kirişler dikkate alınarak hazırlanmıştır. Kiriş geometrisi ve yükleme durumu şekil 2'de, boyut ve malzeme özellikleri Tablo 1'de görülmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan kirişlerin moment-eğrilik davranışlarını belirlemek için geliştirilen bilgisayar programına, FRP ve yapıştırıcı modülleri eklenerek *moment-eğrilik* ilişkileri belirlenecektir. Analizler, kesitin her iki ekseni için, birbirinden bağımsız olarak yapılmakta ve farklı beton birim kısalma değerleri için hesaplanan tarafsız eksen mesafesine göre eğilme momentleri elde edilmektedir. Moment-eğrilik analizlerinde, dokuz noktada ele alınan beton birim kısalmasından elde edilen eğilme momentlerine karşılık gelen sekiz aralıkta, eğride meydana gelen eğim değişimleri incelenebilmektedir [23-24-25-26].



Şekil 2. Betonarme kiriş elemanının geometrisi ve yükleme durumu [26]

Tablo 1. Betonarme kiriş elemanının boyutları ve malzeme özellikleri [26]

Deneysel Eleman	Beton Sınıfı	Kesit (mm <sup>2</sup> )	Kiriş Uzunluğu L (mm)	Boyuna Donatı çapı ve adedi	Donatı Sınıfı	Etriye çapı ve aralığı	Paspayı (mm)
Betonarme Kiriş	C30	150x150	750	4φ10	S420	φ8/10	25

Deneysel çalışmada betonarme kirişe uygulanan FRP ve yapıştırıcı özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Deneyde kullanılan FRP / yapıştırıcı özellikleri ve uygulama koşulları [26]

Deneysel Eleman	FRP Tipi	Yapıştırıcı Türü	FRP Uzunluğu (mm)	Uygulanan Beton Yüzeyi	Yapıştırıcı Kalınlığı t <sub>a</sub> (mm)
B01	SikaCarboDur1012	Sikadur 30	550	Kuru	< 1
B02	SikaCarboDur1012	Sikadur 30	550	Kuru	1
B03	SikaCarboDur1012	Sikadur 30	550	Kuru	2
B09	SikaCarboDur1012	Sikadur 30	550	Kuru	4
B15	Kontrol Numunesi ( Betonarme Kiriş, FRP’siz Durum)				

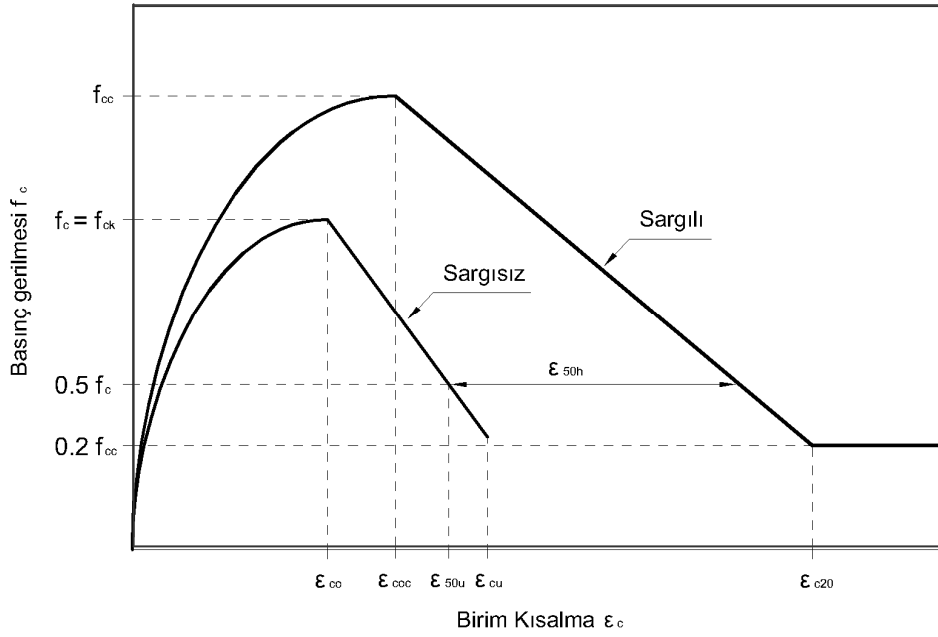
### 2.1.1 Mevcut Geliştirilen Programda Yapılan Varsayımlar

- Eğrilik yalnız eğilme momentinin fonksiyonu olduğu dur.
- Yöntem kuvvet esaslı olup, kesite etkiyen aksel kuvvet altında, uç momentleri beton birim kısılması  $\varepsilon_c=0.00025$  için elde edilen eğilme momenti değerine kadar brüt kesitin (çatlamamış) eğilme rijitliğine sahiptir. Bu değer aşıldıktan sonra eğilme rijitlikleri kademeli olarak azalmaya başlamaktadır.
- Moment-eğrilik analizlerinde azami taşıma gücü moment-eğrilik grafiklerinin tepe noktası olarak alınmış ve bu noktadan sonra taşıma gücündeki azalmalar ve dolayısıyla eğilme rijitliğindeki ters eğim göz önüne alınmamıştır. Betonarme kesitlerin asgari eğilme rijitliği olarak tepe noktasına bağlanan doğrunun eğimi alınmıştır.
- Aksel rijitlikteki ( $EA$ ) değişim ihmal edilerek aksel rijitlik sabit alınmıştır.

Analitik çalışmada, sargılı kesitler için Kent ve Park tarafından geliştirilen beton modeli esas alınmıştır. [23].

### 2.1.2 Geliştirilmiş Kent ve Park Sargılı Beton Modeli

Bu model, Roy ve Sözen (1964) tarafından sargılı beton için önerilen  $\sigma$ - $\epsilon$  ilişkisinden esinlenerek geliştirilmiştir. Şekil 3'te gösterildiği gibi, sargılı ve sargısız beton için iki ayrı  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisi önerilmektedir. Sargı nedeni ile beton dayanımının  $f_c$ 'den başlayarak  $f_{cc}$ 'ye, maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalmanın ise  $\epsilon_{co}$ 'dan  $\epsilon_{coc}$ 'ye yükseldiği varsayılmaktadır. Gerek sargılı, gerekse sargısız beton için önerilen eğrilerin ilk bölümleri, Hognestad modelindeki gibi ikinci derece parabol varsayılmıştır. Eğrilerin gerilme azalmasını gösteren ikinci bölümleri ise eğimi eksi olan düz çizgilerle gösterilmiştir. Sargılı betonun eğimi, sargısız betona oranla daha küçüktür. Sargısız betonda maksimum birim kısalma  $\epsilon_{cu}$  iken, sargılı betonda böyle bir sınır yoktur. Sargısız beton için  $\epsilon_{cu} = \epsilon_{50u}$  veya daha basit olarak  $\epsilon_{cu} = 0.004$  alınabilir. Kent ve Park, çekirdeğin boyutlarını, etriye dışından etriye dışına ölçülen uzunluklarla tanımlamaktadır [24].



Şekil 3. Geliştirilmiş Kent ve Park beton modeli [23]

Sargılı betona ait azami basınç gerilmesini ifade eden  $f_{cc}$  ve birim kısalma  $\epsilon_{coc}$ ,

$$\begin{aligned} f_{cc} &= Kf_c \\ \epsilon_{coc} &= K\epsilon_{co} \end{aligned} \quad (3)$$

eşitliğinden bulunmaktadır. Burada  $K$ , sargı donatısının hacimsel oranı ile akma dayanımına ve karakteristik beton basınç dayanımına bağlı bir katsayıdır.  $\epsilon_{co}$ , normal dayanımlı betonlar için yaklaşık 0.002 alınabilir.

$$\begin{aligned} K &= 1 + \frac{\rho_s f_{ywk}}{f_c} \\ \rho_s &= \frac{A_o \cdot l_s}{s \cdot b_k \cdot h_k} \end{aligned} \quad (4)$$

Dnk.4'te verilen eşitlikte,  $\rho_s$ , sargı donatısının hacimsel oranıdır.  $f_{ywk}$  ise sargı donatısının minimum akma dayanımını ifade etmektedir. Betonarme kesitin malzeme özellikleri ve donatı düzenine göre  $f_{cc}$  ve  $\varepsilon_{coc}$  bulunduktan sonra, grafiğin birinci kısmını oluşturan parabolik eğri,

$$\sigma_c = f_{cc} \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{coc}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{coc}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

denklemden elde edilir. Gerilmelerin azaldığı bölümü ifade eden eğrinin ikinci kısmı, doğrusal kısım ise,

$$\sigma_c = f_{cc} [1 - Z_c (\varepsilon_c - \varepsilon_{coc})] \geq 0.2 f_{cc} \quad (6)$$

bağıntısından elde edilir. Burada yer alan  $Z_c$  ifadesi, sargılı betonun  $\sigma$ - $\varepsilon$  eğrisindeki doğrusal bölümün boyutsuz eğimidir (eğim /  $f_{cc}$ ). Birimler,  $\text{kgf/cm}^2$  dir.

$$Z_c = \frac{0.5}{\varepsilon_{50u} + \varepsilon_{50h} - \varepsilon_{coc}}$$

$$\varepsilon_{50u} = \frac{3 + 0.285 f_c}{142 f_c - 1000} \geq \varepsilon_{co} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{50h} = 0.75 \rho_s \left( \frac{b_k}{s} \right)^{1/2}$$

### 2.1.2.1 Kabuller

- i. Sargılı beton modeli tüm kesit için kullanılmıştır. Çekirdek betonu dışında kalan bölgede sargısız beton davranışı ihmal edilmiştir.
- ii. Çelik donatı modelinde pekleşme davranışı göz önüne alınmamıştır.
- iii. Kesit düzlemi şekil değiştirmeden sonra da düzlem kalmaktadır. Böylece, birim kısalma ile birim uzama miktarları arasında doğrusal ilişki vardır ve kesit yüksekliği boyunca değişim doğrusaldır.

Eğilme etkisi altındaki kesitin basınç bölgesinde oluşan gerilme dağılımı basitleştirilerek, eşdeğer dikdörtgen beton basınç bloğu kabulü yapılmış ve basınç bloğu için Hognestad tarafından önerilen değerler kullanılmıştır (Tablo 3). Beton birim kısalması için  $\varepsilon_c$  değeri 0.00025 ila 0.004 aralığında dokuz noktada ele alınmıştır. Her beton birim kısalması için elde edilen moment-eğrilik ilişkisini belirleyen noktalar arasındaki çizgiler doğrusaldır. Daha hassas hesaplama yapmak için seçilen beton birim kısaltmaları ara değerlere bölünerek analiz yapılabilir.

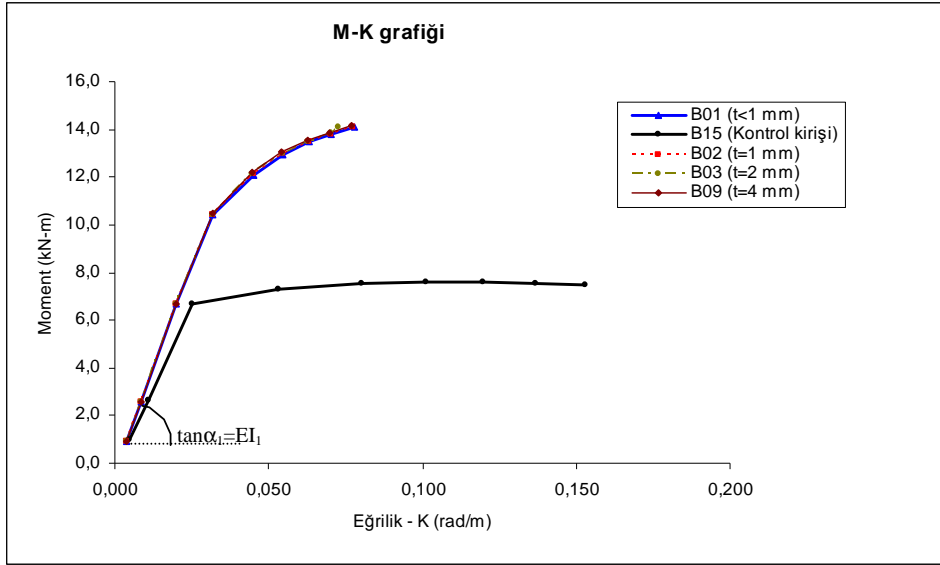
**Tablo 3.** Hognestad eşdeğer dikdörtgen dağılımı katsayıları

$\varepsilon_{ci}$	0.00025	0.0005	0.0010	0.0015	0.0020	0.0025	0.0030	0.0035	0.0040
$\beta$	0.674	0.682	0.700	0.722	0.750	0.781	0.820	0.845	0.874
$\alpha$	0.178	0.336	0.595	0.779	0.889	0.931	0.930	0.920	0.910



### 3. BULGULAR

Betonarme kirişler için geliştirilmiş mevcut analitik çalışmaya, FRP ve yapıştırıcı parametrelerinin eklenmesiyle, çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir (Ek-A). Şekil 4'te, referans kiriş ve değişik yapıştırıcı kalınlıklarına sahip FRP'li kirişlerin, verilen malzeme modelleri ile dokuz farklı beton birim kısalması için ele alınarak oluşturulmuş eğilme momenti-eğrilik grafiği görülmektedir. Moment-eğrilik eğrisi altında kalan alan, kesitin enerji tüketebilme kapasitesini gösterir. Alan arttıca tkutilen enerji de artar. Süneklik, bir kesitin taşıma kapasitesinde önemli bir düşme gerçekleşmeden Şekil değiştirme yapabilme özelliği olduğundan, FRP'li betonarme kirişlerin referans kirişe (B15) göre daha az sünek olduğu, başka bir ifadeyle gevrek davranış gösterdiği görülmektedir. Beton birim kısalma değerleri için elde edilen eğilme momenti-eğrilik grafiği sekiz doğru parçasından oluşmakta ve eğriyi ifade eden her bir doğru parçasının eğimi (rn:  $\tan\alpha_1$ ) kesitin maruz kalacağı eğilme momenti aralığındaki eğilme rijitliğini vermektedir. Değişik yapıştırıcı kalınlıklarına sahip B01, B02, B03 ve B09 kirişlerinin taşıma gücü ve eğilme rijitliği açısından değerlendirildiğinde kayda değer bir farklılık görülmemiş, yakın değerler elde edilmiştir. FRP'li betonarme kirişlerin (B01, B02, B03 ve B09) taşıma gücü, referans betonarme kirişe (B15) göre yaklaşık 2.5 kat fazla olduğu analitik olarak saptanmıştır. (Şekil 4).



Şekil 4. FRP'li betonarme kirişlerin moment-eğrilik (M-K) ilişkileri

Referans kiriş, taşıma gücüne eriştikten sonra, her ne kadar eğilme rijitliği sıfıra yakın değerlere düşse de sabit eğilme momenti altında dönmeye devam edebilmektedir. Momentin artması ile birlikte taşıma gücüne erişildike eğilme rijitliğindeki azalmada hızlanmaktadır. FRP kullanımının, eğilme rijitliğini, eğrinin ilk kısmı göz önüne alındığında %25 oranında arttırdığı görülmektedir. Yapıştırıcı kalınlıklarındaki artışın, eğilme rijitliğinde önemli bir etkisi olmamakla birlikte, artışın olduğu grafikten anlaşılmaktadır. Program sonuçlarından, gerilme ve birim Şekil değiştirme değerleri elde edilmiştir. Temsil olması amacıyla, B02 elemanı için kesit elemanlarında oluşan Şekil değiştirme değerleri Tablo 4'te, gerilme değerleri ise, Tablo 5'te verilmiştir.

**Tablo 4.** Kesit elemanlarında oluşan birim şekil değiştirme değerleri (*kısalma (+) alınmıştır.*)

$\epsilon_c$ %(mm/mm)	FRP (mm/mm)	Çekme Donatısı (mm/mm)	Basınç Donatısı (mm/mm)	Tarafsız Eksen Mesafesi (mm) <i>Altan</i>
0.025	-0.000321	-0.000202	0.000137	83.7
0.050	-0.000824	-0.000548	0.000238	92.7
0.100	-0.002032	-0.001400	0.000400	100.0
0.150	-0.003345	-0.002335	0.000541	103.1
0.200	-0.004820	-0.003399	0.000650	105.5
0.250	-0.005797	-0.004067	0.000858	104.3
0.300	-0.006562	-0.004569	0.001108	102.4
0.350	-0.007173	-0.004948	0.001388	100.3
0.400	-0.007752	-0.005302	0.001674	98.4

**Tablo 5.** Kesit elemanlarında oluşan gerilme değerleri (*basınç (+) alınmıştır.*)

$\epsilon_c$ %(mm/mm)	FRP (N/mm <sup>2</sup> )	Çekme Donatısı (N/mm <sup>2</sup> )	Basınç Donatısı (N/mm <sup>2</sup> )	Beton (N/mm <sup>2</sup> )	Tarafsız Eksen Mesafesi (mm) <i>Altan</i>
0.025	-53.0	-40.5	27.4	7.1	83.7
0.050	-135.9	-109.6	47.6	13.2	92.7
0.100	-335.2	-280	80.0	22.9	100.0
0.150	-551.9	-420	108.3	29.1	103.1
0.200	-795.4	-420	130.1	31.7	105.5
0.250	-956.4	-420	171.6	30.9	104.3
0.300	-1082.8	-420	221.5	29.6	102.4
0.350	-1183.5	-420	277.6	28.4	100.3
0.400	-1279.0	-420	334.9	27.1	98.4

Tablo 4'ten, elemanın yüke maruz kalması sonucu FRP'de oluşan maksimum şekil değiştirmenin, FRP'nin % 1.7 olan kopma uzamasının (0.017) altında, 0.007752 değerinde kaldığı ve dolayısıyla kirişin FRP kopması sonucu göçmediği anlaşılmaktadır. Tablo 5'te, FRP'de oluşan maksimum gerilmelere bakıldığında, FRP'nin maksimum çekme gerilmesine (3100 MPa) erişmediği ve çekme donatısının akma sınırına ulaştığı görülmektedir.

#### 4. SONUÇLAR

Gerçekleştirilen çalışmada, alt yüzeyine FRP yapıştırılan betonarme kirişler modelleri göz önüne alınarak, FRP'nin kompozit eleman davranışındaki (moment-eğrilik ve gerilme-şekil değiştirme) etkisi analitik olarak araştırılmıştır. Ayrıca, yapıştırıcı kalınlıklarındaki değişimin, taşıma gücü ve eğilme rijitliğindeki etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

Çalışma kapsamında, dört adet değişik yapıştırıcı kalınlıklarına sahip FRP'li betonarme kiriş ve mukayese amacıyla referans betonarme kiriş modeli kullanılmıştır.

Betonarme kirişlerde FRP kullanılmasının eğilme rijitliğini artırdığı, moment eğrilik (M-K) ilişkilerinden saptanmıştır. Söz konusu artışın, tanjant elastisite modülünde (EI, moment-eğrilik grafiğinin ilk kısmı) % 25 olduğu belirlenmiştir.

FRP'li kirişlerin M-K ilişkileri irdelendiğinde, FRP'nin, kompozit eleman davranışını gevrek davranış göstermesine sebep olduğu ve dolayısıyla ani göçmelere neden olacağı bulunmuştur. Bu durumda, kullanılacak FRP miktarının tasarım aşamasında göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Yapıştırıcı kalınlıklarındaki artışın, gerek eğilme rijitliğinde gerekse taşıma gücünde önemli bir etkisinin olmadığı, çalışma sonucunda elde edilmiştir.

Betonarme kirişlere FRP uygulandığı durumdaki taşıma gücünün, referans betonarme kirişe göre yaklaşık 2.5 kat fazla olduğu saptanmıştır. Bu durum, FRP'nin eğilme etkisine karşı, betonarme kirişin taşıma gücünü artırmak için uygun bir güçlendirme yöntemi olduğu belirlenmiştir.

FRP'de oluşan maksimum gerilmeler incelendiğinde, FRP'nin, maksimum çekme gerilmesine ulaşmadığı, buna karşın, çekme donatısının akma sınırına ulaştığı görülmektedir. Bu durumda, göçme biçimi olarak, FRP-beton arayüz ayrışmasının gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

## 5. KAYNAKLAR

1. 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.
2. 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.
3. Lee H.K., Hausmann L.R., 2004, "Structural Repair and Strengthening of Damaged RC Beams with Sprayed FRP", *Composite Structures*, 63, 201-9.
4. 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", p.175-82.
5. De Lorenzis L., Teng J.G., Zhang L., 2006, "Interfacial Stresses in Curved Members Bonded with a Thin Plate", *International Journal of Solids and Structures*, 43, 7501-17.
6. Teng J.G., Yuan H., Chen J.F, 2005, "FRP-to-Concrete Interfaces between two Adjacent Cracks : Theoretical Model for Debonding Failure", *International Journal of Solids and Structures*, 43,5750-78.
7. Wang J., 2006, "Debonding of FRP-Plated Reinforced Concrete Beam, A Bond-Slip Analysis I : Theoretical Formulation", *International Journal of Solids and Structures*, 43, 6649-64.
8. Smith S.T.,Teng J.G., 2001,"Interfacial Stresses in Plated Beams", *Engineering Structures*, 23,857-71.
9. Tounsi A., Benyoucef S., 2007, "Interfacial Stresses in Externally FRP-Plated Concrete Beams", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 27, 207-15.
10. Tounsi A., Daouadji T.H., Benyoucef S., Adda bedia E.A., 2009, "Interfacial Stresses in FRP-Plated RC Beams : Effect of Adherend Shear Deformations", *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 29, 343-351.
11. Benyoucef S., Tounsi A., Adda bedia E.A., Meftah S.A., 2007, " Creep and Shrinkage Effect on Adhesive Stresses in RC Beams Strengthened with Composite Laminates", *Composites Science and Technology*, 67, 933-942.

12. Wang Y.C., Lee M.G., Chen B.C, 2007, “Experimental Study of FRP Strengthened RC Bridge Girders Subjected to Fatigue Loading”, *Composite Structures*, 81, 491-98.
13. Casas J.R., Pascual J., 2007, “Debonding of FRP in Bending : Simplified Model and Experimental Validation”, *Construction and Building Materials*, 21, 1940-49.
14. Rabinovitch, O., 2005, “Bending Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Composite Materials using Inelastic and Nonlinear Adhesives”, *ASCE, Journal of Structural Engineering*, 131, 1580-92.
15. Masoud S., Soudki K., 2006, “Evaluation of Corrosion Activity in FRP Repaired RC Beams”, *Cement & Concrete Composites*, 28, 969-77.
16. Chen J.F., Teng J.G., 2003, “Shear Capacity of FRP-Strengthened RC Beams: FRP Debonding”, *Construction and Building Materials*, 17, 27-41.
17. Pesic N., Pilakoutas K., 2003, “Concrete Beams with Externally Bonded Flexural FRP-Reinforcement: Analytical Investigation of Debonding Failure”, *Composites: Part B* 34, 327-38.
18. Smith S.T., Teng J.G., 2002, “FRP-Strengthened RC Beams. I: Review of Debonding Strength Models”, *Engineering Structures*, 24, 385-95.
19. Gao B., Leung C.K.Y., Kim J.K., 2005, “Prediction of Concrete Cover Separation Failure for RC Beams Strengthened with CFRP Strips”, *Engineering Structures*, 27, 177-89.
20. Wu Z.J., Davies J.M., 2003, “Mechanical Analysis of a Cracked Beam Reinforced with an External FRP Plate”, *Composite Structures*, 62, 139-43.
21. Khalifa A., Nanni A., 2000, “Improving Shear Capacity of Existing RC T-Section Beams using CFRP Composites”, *Cement & Concrete Composites*, 22, 165-74.
22. Alsayed S.H., 1998, “Flexural Behaviour of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars”, *Cement & Concrete Composites*, 20, 1-11.
23. Damcı E., 2008, “Yapıların Doğrusal Olmayan Çözümlemesi ve Deprem Performansları”, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
24. Ersoy U., Özcebe G., 2001, “Betonarme: Temel İlkeler, TS500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap”, Evrim Yayınevi.
25. Ersoy U., Özcebe G., 1998, “Sarılmış Betonarme Kesitlerde Moment-Eğrilik İlişkisi : Analitik Bir İrdeleme”, *Teknik Dergi*, 9 (4), 1799-1827.
26. Sayın B., 2009, “Lif Takviyeli Plastik Levhalar ile Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Yük Taşıma Kapasitesinin Belirlenmesi”, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

**EK - A****A.1 MALZEME DEĞERLERİNİN VE GEOMETRİK BİLGİLERİN GİRİLMESİ**

KESİT adlı dosyada malzeme değerleri ve gerekli bilgiler girilir:

30.0 0.002 30000 :fck, EPSco, Elatisite modülü (BETON)  
 420. 0.0021 200000. :fstđ, EPSy, Elatisite modülü (CELİK)  
 0.0 0.0 0.0 :N başlangıç, N bitiş, dN artış (basınç +)  
 150. 150. :b/h  
 25 :pp  
 75. 75. :xg, yg  
 2 :donatı sıra adedi  
 157. 30. :donatı alanı, ordinatı (donatı sıra adedi kadar girilecek)  
 157. 120.  
 232. 232. 464 :sırasıyla kısa ve uzun etriye kolları merkezler arası boyları ve toplam boy  
 50. 100. 420.0 :etriye kesit alanı, donatı aralığı, akma mukavemeti  
 165000 100 1.2 4 :CFRP elemanın elatisite modülü, genişliği, yüksekliği, yapıştırma harcı kalınlığı

**A.2 ANALİZ SONUÇLARININ EKRANDA GÖRÜNTÜLENMESİ**

Uygulama dosyası çalıştırıldıktan sonra, analiz gerçekteşirilir ve sonuçlar ekranda görüntülenir :  
 Tarih: 08-Sep-09 Saat: 11:51:24

~~~~~  
 ~ FRP İLE ÇEKME BÖLGESİ TAKVİYE EDİLMİŐ BETONARME KESİTİN ~  
 ~ GELİŞTİRİLMİŞ KENT-PARK BETON MODELİ ~  
 ~ VE HOGNESTAD GERİLME DAĞILIMI İLE ~  
 ~ MOMENT-EĞRİLİK ANALİZİ ~  
 ~ VER. 2.0 ~  
 ~ 20.02.2009 ~

**a. Malzeme ve kesit bilgileri**

=====  
 =====  
 Beton basınç dayanımı fck= 30.0 Mpa  
 Azami beton gerilmesi için birim kısalma Eco= .0020 mm/mm  
 Elatisite modülü Ec= 32000.0 N/mm2  
 Çelik akma dayanımı fsyk= 420.0 Mpa  
 Akma gerilmesi için birim sekil değiştirme Ey= .0021 mm/mm  
 Elatisite modülü Es= 200000.0 N/mm2  
 Eksenel kuvvet hesap aralığı, basınç(+) Pi= .00 N  
 Pf= .00 N  
 Eksenel kuvvet artım değeri dP= .00 N  
 Kesit genişliği b= 150.0 mm  
 Kesit yüksekliği h= 150.0 mm  
 Pas payı pp= 25.0 mm  
 Atalet momenti I= 241418581.3 mm4  
 Brüt kesitin eğilme rijitliği EI= 7725394602666.7 N-mm2  
 =====

=====

## b. Boyuna donatı bilgileri

=====

=====

Toplam donatı sayısı = 2

1. sıra: 157.0 mm<sup>2</sup>, yg = 30.0 mm2. sıra: 157.0 mm<sup>2</sup>, yg = 120.0 mm

=====

=====

## c. Enine donatı bilgileri

=====

=====

|                                |                          |
|--------------------------------|--------------------------|
| Etriye kısa kolu -dıştan dışa- | bk= 232.0 mm             |
| Etriye uzun kolu -dıştan dışa- | hk= 232.0 mm             |
| Etriye toplam boyu             | ls= 464.0 mm             |
| Donatı kesit alanı             | A0= 50.0 mm <sup>2</sup> |
| Donatı aralığı                 | s= 100.0 mm              |
| Çelik akma dayanımı            | fywk= 420.0 Mpa          |

=====

=====

## d. Geliştirilmiş Kent-Park beton modeline ait parametreler

=====

=====

|                                   |                   |
|-----------------------------------|-------------------|
| Etriye donatısının hacimsel oranı | ROs= 4.310E-03    |
|                                   | K= 1.060E+00      |
| Sargılı beton dayanımı            | fcc= 3.181E+01Mpa |
| Birim kısalma değerleri           | Eco= 2.000E-03    |
|                                   | Ecoc= 2.121E-03   |
|                                   | E50u= 3.543E-03   |
|                                   | E50h= 4.924E-03   |
|                                   | Ec20= 1.227E-02   |
|                                   | Eğim Zu= 3240.6   |
|                                   | Eğim Zc= 787.9    |

=====

=====

## e. FRP elemanına ait parametreler

=====

=====

|                            |                               |
|----------------------------|-------------------------------|
| Elastisite modülü          | E= 165000.0 N/mm <sup>2</sup> |
| Genişliği                  | b= 100.0 mm                   |
| Kalınlığı                  | t= 1.2 mm                     |
| Yapıştırma harcı kalınlığı | th= .6 mm                     |
| Ordinatı                   | yg= -1.2 mm                   |
| Kesit alanı                | A= 120.0 mm <sup>2</sup>      |

=====

=====

## f. Sonular

=====

Sonuların tekâbül ettiği beton birim kısalmaları:

1 --> Ec= 0.00025 4 --> Ec= 0.0015 7 --> Ec= 0.0030  
 2 --> Ec= 0.0005 5 --> Ec= 0.0020 8 --> Ec= 0.0035  
 3 --> Ec= 0.0010 6 --> Ec= 0.0025 9 --> Ec= 0.0040

N M1 M2 M3 M4 M5  
 M6 M7 M8 M9 EI1 EI2  
 EI3 EI4 EI5 EI6 EI7 EI8  
 K1 K2 K3 K4 K5 K6  
 K7 K8 K9 C1 C2 C3  
 C4 C5 C6 C7 C8 C9

.00 9.2301940679840E+05 2.5552669971322E+06 6.6612287452349E+06  
 1.0412413854924E+07 1.2100342464604E+07 1.2958905163601E+07  
 1.3462001759587E+07 1.3793201208911E+07 1.4072993723936E+07  
 3.2868454703745E+11 3.6420373274393E+11 3.1315518979899E+11  
 1.2935111316517E+11 8.8048206166987E+10 6.0168040310344E+10  
 4.5132814696590E+10 3.9255927596483E+10 3.7719594181122E-06  
 8.7379598128549E-06 2.0011764496756E-05 3.1990442263831E-05  
 4.5039642756787E-05 5.4790695462724E-05 6.3152220840492E-05  
 7.0490549981969E-05 7.7617945311927E-05 8.3721447088239E+01  
 9.2778402000299E+01 1.0002939157816E+02 1.0311099481940E+02  
 1.0559467232467E+02 1.0437181581640E+02 1.0249573196081E+02  
 1.0034795289683E+02 9.8465523353977E+01

Tarih: 08-Sep-09 Saat: 11:51:39  
 Program has been running for .951 seconds.  
 This includes: .591 seconds of user time and  
 .361 seconds of system time.