

FRP Kompozit Malzemeler Yapıştırılarak Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerde FRP Sıyırılma Problemlerinin Kırılma Mekanığı Modeli

Oğuz Güneş^a, Oral Büyüköztürk^b, Erdem Karaca^c

^aAtılım Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İncek, 06836, Ankara
ogunes@atilim.edu.tr

^bMassachusetts Teknoloji Enstitüsü, İnşaat ve Çevre Mühendisliği Bölümü
77 Massachusetts Ave, Room 1-281, Cambridge, MA 02139 USA
obuyuk@mit.edu

^cSwiss Reinsurance America Co., 175 King St., Armonk, NY 10583 ABD
erdem_karaca@swissre.com

Özet

Betonarme yapı elemanlarının fiber katkılı polimer (FRP) kompozit malzemeler kullanılarak güçlendirilmesi ülkemizde ve daha büyük boyutlarda dünyanın gelişmiş ülkelerinde artan sıklıkta rastlanan bir uygulamadır. Bu makalede, FRP kompozit malzemelerle güçlendirilen betonarme kirişlerde görülen sıyırılma sorunlarının anlaşılıp modellenmesi amacıyla yapılan deneysel ve çözümlemeli bir çalışma sunulmuştur. Deneysel araştırmalarla kesme ve/veya eğilme dayanımları artırılmış kirişlerde tekdüze artan yükler etkisinde meydana gelen sıyırılmalar biçim ve mekanizma olarak incelenmiştir. Yeni geliştirilen bir kırılma mekanığı modeli ile sistemin genel enerji dengesi dikkate alınarak sıyırılma sırasındaki baskın enerji tüketim mekanizmalarının karakterize edilmesi yoluyla FRP sıyırılma yükü tahmin edilmiştir. Geliştirilen modelin geçerliliği bağımsız çalışmalardan elde edilen deneysel veriler kullanılarak ispat edilmiştir.

Abstract

This paper presents an experimental and analytical research study aimed at understanding and modeling of debonding failures in fiber reinforced polymer (FRP) strengthened reinforced concrete beams. The experimental program investigated debonding modes and mechanisms in beams strengthened in shear and/or flexure and tested under monotonic loading. A newly developed fracture mechanics based model considers the global energy balance of the system and predicts the FRP debonding failure load by characterizing the dominant mechanisms of energy dissipation during debonding. Validation of the model is performed using experimental data from several independent research studies.

1. Giriş

Betonarme yapı elemanlarının güçlendirmesinde Fiber katkılı polimer (Fiber reinforced polymer - FRP) kompozit malzemelerin kullanılması 1980'lerin sonlarında başlayıp hızla artarak günümüzde özellikle gelişmiş ülkelerde sıkça rastlanan bir uygulama halini almıştır. Tasarım amaçlarına bağlı olarak, FRP kompozit malzemeler yapı elemanlarının yük kapasitesi, süneklik, dayanıklılık gibi özelliklerinden bir veya birkaçının iyileştirilmesi için kullanılabilir. Bu malzemelerin yapı elemanları olarak veya yapı elemanlarının güçlendirilmesinde kullanımını ile ilgili tasarım kuralları, uygulama esasları, bakım ve gözetim gerekleri ile onarım yöntemlerini belirten standartların geliştirilmesi amacıyla uluslararası bir çaba gösterilmektedir. FRP kompozit malzeme kullanımını içeren güçlendirme tasarımları genel olarak alışlagelmiş tasarım kurallarının kompozit malzemeyi farklı malzeme davranışına sahip ek bir donatı olarak dikkate alacak şekilde geliştirilmesi yoluyla yapılmaktadır. Alışlagelmiş tasarım prensipleriyle aşılamayacak özel tasarım problemleri, ilgili probleme yönelik özel tasarım yöntemlerinin geliştirilmesini gerektirmektedir. Bu tür tasarım problemlerinden bir tanesi kompozit malzemelerin dıştan yapıştırılması yöntemiyle güçlendirilen betonarme eğilme elemanlarında karşılaşılan sıyrılma problemleridir. Kompozitlerle güçlendirme yönteminin gelişiminin erken aşamalarından bu yana yoğun araştırma çalışmalarına konu olan sıyrılma problemleri, eğilme elemanlarında neden oldukları erken, ani ve kırılğan çökmeler nedeniyle önemli bir tasarım problemidir. Tasarımda gereği gibi dikkate alınmadığı taktirde sıyrılma problemleri yapılan güçlendirmenin etkisiz kalmasından öte güçlendirilen elemanın sünekliğini azaltarak güvenliğini azaltıcı rol oynayabilmektedir [1-3].

2. Amaç, Kapsam ve Yöntem

Bu çalışmanın amacı FRP kompozit malzemeler yapıştırılarak güçlendirilen betonarme kirişlerde görülen ani ve kırılğan sıyrılma mekanizmalarının deneysel araştırmalarla tesbiti ve kırılma mekaniği yaklaşımıyla modellenmesidir. Geliştirilen model sıyrılma problemlerinin engellenmesi için gerekli tasarım kurallarının geliştirilmesine dayanak teşkil edecektir.

FRP kompozitlerle güçlendirilmiş kirişlerde temel olarak iki tür sıyrılma mekanizması görülmektedir: (1) Beton örtü sıyrılması (Bkz. Şekil 1a); (2) FRP sıyrılması (Bkz. Şekil 1b,c). Burada sunulan kırılma mekaniği modeli çalışması sadece FRP sıyrılmalarını kapsamaktadır. Beton örtü sıyrılmaları için mukavemet modeli yaklaşımları daha uygun görülmektedir.

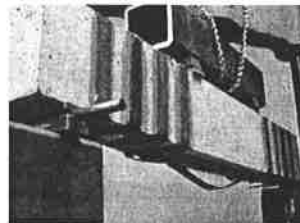
Araştırma yöntemi olarak deneysel çalışma kapsamında laboratuarda üretilen kiriş elemanları aşamalı olarak FRP kompozitlerle kesme ve/veya eğilme kapasitelerinin artırılması



(a) beton örtü sıyrılması

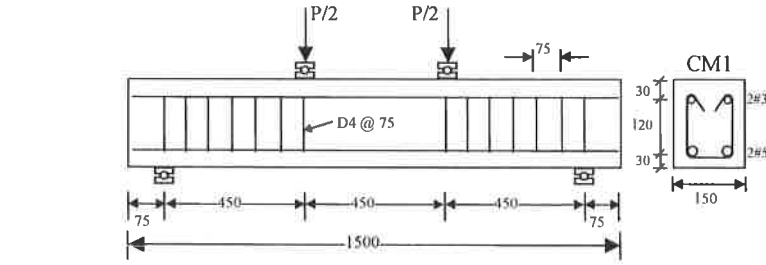


(b) FRP sıyrılması

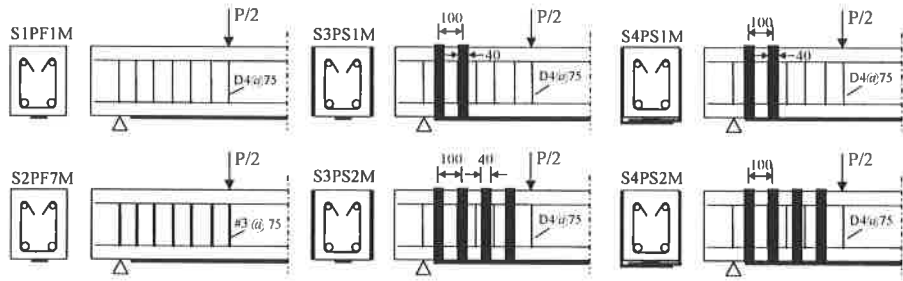


(c) FRP sıyrılması (ankrajlı)

Şekil 1: FRP kompozitlerle güçlendirilmiş kirişlerde görülen sıyrılma biçimleri



(a) kontrol kirişi (mm)



(b) kesme ve/veya eğilmede güçlendirilmiş kirişler

Şekil 2: Deney kirişlerinin geometri ve güçlendirme biçimleri

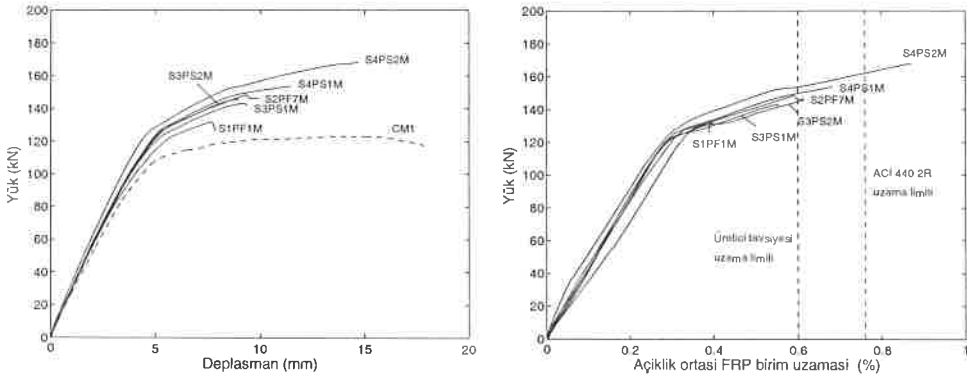
amacıyla güçlendirilmiş, ve dört noktalı eğilme testlerinden elde edilen çökme davranışı ve ilgili yük kapasiteleri verileri kullanılarak bir kırılma mekaniği modeli oluşturulmuştur.

3. Deneyel Program ve Sonuçlar

Bu makalede sunulan deneysel çalışma çok daha geniş kapsamlı bir deneysel programın, geliştirilen modelle ilgili deney ve sonuçlarını kapsamaktadır [4]. Deneylerde kullanılan malzemelerin özellikleri Tablo 1’de, test edilen kirişlerin geometrileri ve güçlendirme biçimleri Şekil 2’de gösterilmiştir. Bütün kirişler güçlendirme öncesi yüklenerek eğilme çatlaklarının oluşması sağlanmıştır. Kirişler güçlendirme sonrasında dört noktalı eğilme biçiminde çökme oluşuncaya kadar yüklenmiş, yük-eğilme ilişkisi ve çeşitli noktadaki uzama kaydedilmiştir.

Tablo 1: Deneylerde kullanılan malzemelerin özellikleri

Malzeme	Basınç dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastic modül (MPa)	Kopma uzaması (%)
Beton	41.4	-	-	25,000	-
#3 ve #5 donatı	-	440	-	200,000	-
D4 donatı	-	620	-	200,000	-
Karbon FRP plaka	-	-	2800.0	165,000	1.69
Epoksi yapıştırıcı	-	-	24.8	4,500	1.00



(a) yük-eğilme eğrileri

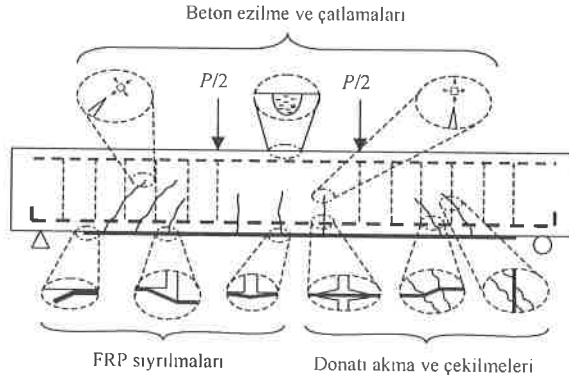
(b) yük-FRP kompozit orta-uzaması eğrileri

Şekil 3: Kiriş deney sonuçları

Kiriş deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 3'te ve Tablo 2'de gösterilmiştir. Şekil 3(a) deney sırasında kaydedilen yük-eğilme eğrilerini, Şekil 3(b) ise güçlendirilmiş kirişler için buna karşılık gelen yük-FRP kompozit orta uzaması eğrilerini göstermektedir. Test edilen güçlendirilmiş kirişlerden sadece S1PF1M'de beton örtüsü sıyrılması görülmüş, diğer bütün kirişlerde FRP sıyrılması görülmüştür. Aralarında kesme donatısı kalınlığından başka fark bulunmayan S1PF1M ve S2PF7M arasında hem sıyrılma mekanizması, hem de yük kapasitesi açısından fark görülmesi, güçlendirilmiş kirişlerin kesme dayanımlarının sıyrılma mekanizmaları üzerindeki etkisini açık olarak göstermektedir. Kesme açıklığının yarısında güçlendirme yapılan S2PF7M ve tamamında güçlendirme yapılan S2PF2M'in esas olarak S1PF1M ile aynı performansı göstermesi, kesme güçlendirmesinin kiriş uç bölgelerinde, yani boyuna FRP donatısının son bulunduğu bölgede kritik önemi olduğu görülmektedir. Boyuna FRP donatısına dik yönde yapıştırılan L-şekilli FRP plakalarla ankrajının yapıldığı S4PS1M ve S4PS2M kirişlerinin, ankraj miktarına paralel olarak diğer kirişlere oranla oldukça artan bir performans göstermesi, kırılma yüzeyindeki artışın performans üzerindeki etkisini göstermektedir.

Table 2: Deney sonuçları

Kiriş	P_y (kN)	δ_y (cm)	$\epsilon_{fm, y}$ (%)	P_u (kN)	δ_u (cm)	$\epsilon_{fm, u}$ (%)	Çökme biçimi
CM1	110.0	5.2	-	117.4	17.9	-	-
S1PF1M	123.0	5.8	0.31	131.9	7.7	0.40	Beton sıyrılması +kesme
S2PF7M	127.5	5.5	0.32	148.3	9.3	0.59	FRP sıyrılması
S3PS1M	124.0	5.4	0.31	143.1	9.2	0.55	FRP sıyrılması
S3PS2M	129.1	5.6	0.36	145.6	9.0	0.61	FRP sıyrılması
S4PS1M	128.2	5.4	0.33	153.8	11.5	0.68	FRP sıyrılması
S4PS2M	127.9	4.9	0.31	168.2	14.7	0.87	FRP sıyrılması



Şekil 4: FRP ile güçlendirilmiş kirişlerde enerji tüketim mekanizmaları

Deneylerden elde edilen önemli bir diğer sonuç, FRP kompozitlerle güçlendirilmiş eğilme elemanlarında sıyrılma problemlerinin önlenmesi amacıyla ACI Komite-440 [5, 6] tarafından belirlenen FRP kompozit uzama limitinin test edilen çoğu kiriş için güvensiz tarafta kalmasıdır (Bkz. Şekil 3b). Kompozit malzemesi üreticisi tarafından özel deneysel çalışmalar sonucu belirlenen uzama limiti göreceli olarak güvenli tarafta kalmakta, ancak bu limit de ankraj içeren güçlendirme uygulamaları için fazlaca güvenli tarafta kalarak ekonomik kaygılara sebep olmaktadır. Dolayısıyla, güçlendirilmiş kirişlerde meydana gelebilecek FRP sıyrılma problemlerini doğru olarak tahmin edebilecek bir modele gereksinim vardır [3, 7].

4. Kırılma Mekaniği Modeli

Güçlendirilmiş kirişte meydana gelen sıyrılmalar kirişin genelinde enerji dönüşümlerine sebep olan kırılma süreçleri ile ilgilidir. Yükleme ilk aşamalarında, bu kırılma süreçleri yavaş ve kararlı olurken, kritik bir enerji durumuna erişildiğinde ani ve kırılğan bir çökmenin meydana gelmesi mümkündür. Sıyrılma için sistemde harcanan toplam enerji, dışarıdan sağlanan iş miktarı, $\mathcal{W}_{ext}$, ve sistem içinde depolanan serbest enerji miktarı, W , cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$d\mathcal{D} = d\mathcal{W}_{ext} - dW \geq 0 \quad (1)$$

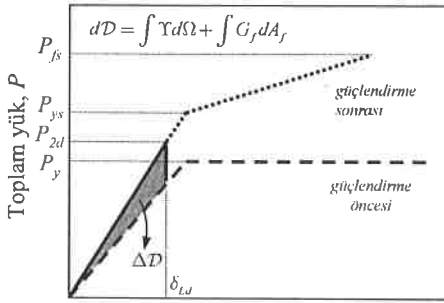
Sistemin potansiyel enerjisi (Π), yüzeye etkiyen kuvvetler tarafından yapılan iş (Φ) ve sistemde depolanan serbest enerji (W) cinsinden

$$\Pi = W - \Phi \quad (2)$$

olarak yazılırsa, (1)'de verilen sıyrılma enerjisi aşağıdaki gibi yazılabilir:

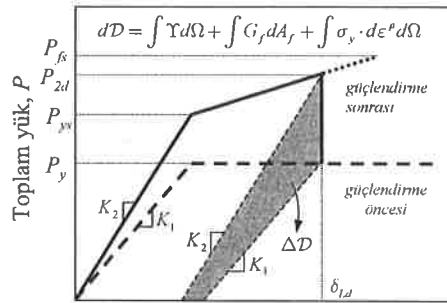
$$d\mathcal{D} = -d\Pi \geq 0 \quad (3)$$

FRP kompozitlerle güçlendirilmiş kirişlerde yük altında enerji kaybına sebep olan mekanizmalar Şekil 4'te görüldüğü gibi betonda çatlama ve ezilmeler, donatı akma ve kaymaları, ve FRP sıyrılmaları olarak gruplandırılabilir. FRP sıyrılmasının, çelik donatının akmasından önce veya sonra meydana gelmesi durumlarında sistemin potansiyel enerjisindeki değişiklik Şekil 5'te taralı alanlarla gösterilmiştir. Şekil 5(a) ve (b) arasındaki fark, çelik donatı akmasından sonra meydana gelen sıyrılma sonucu sistemin potansiyel enerjisindeki



Yüklemelerdeki eğilme, δ_L

(a) çelik donatı akmadan önce



Yüklemelerdeki eğilme, δ_L

(b) çelik donatı aktıktan sonra

Şekil 5: Sıyırılma sırasında harcanan enerji

değişiminin tamamı sıyırılma için harcanan enerji olmayıp, bir kısmının sıyırılma sırasında çelik donatıda oluşan plastik deformasyonlar için harcanmış olmasıdır. Şekil 4'te yapılan gruplandırma dikkate alınarak sıyırılma sırasında sistemin potansiyel enerjisinde meydana gelen değişim aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\Delta D \approx dD = \int \Upsilon d\Omega + \int \sigma \cdot d\epsilon^p d\Omega + \int G_f dA_f \geq 0 ; \quad \epsilon^p = \epsilon_s - \epsilon_y \geq 0 \quad (4)$$

Burada $\int \sigma \cdot d\epsilon^p d\Omega$ sıyırılma sırasında çeliğin akmasıyla harcanan enerjidir ve eğer sıyırılma çeliğin akmasından önce gerçekleşmişse sıfıra eşittir; $\int G_f dA_f$ sıyırılma sırasında FRP ile beton arasındaki arayüzde harcanan kırılma enerjisidir; $\int \Upsilon d\Omega$ ise sıyırılma sırasında meydana gelen diğer çatlamlar için harcanan toplam enerjiyi hacimsel olarak ifade etmektedir. Kırılma mekanizması yaklaşımıyla bir sıyırılma modeli geliştirebilmek için, bu üç grup mekanizmadan baskın olanların sayısal olarak ifade edilmesi gerekmektedir. DeneySEL gözlemler sonucu $\int \Upsilon d\Omega$ teriminin diğer terimlere göre etkisinin daha az düzeyde olduğunu görülmektedir. Bunun nedeni güçlendirilmiş kiriş sisteminde meydana gelen çatlamların çoğunun sıyırılma öncesi gerçekleşmesi, ve sıyırılma sırasında kiriş eğilmesinin ve dolayısıyla eğriliğin sabit kalması sonucu sınırlı bir çatlama meydana gelmesidir. Bir ilk yaklaşım olarak hacimsel çatlak oluşumları için harcanan enerjinin toplam harcanan enerjiye oranla ihmal edilebilir düzeyde olduğu varsayılırsa, sıyırılma sırasında harcanan toplam enerji aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\Delta D \approx \int \sigma \cdot d\epsilon^p d\Omega + \int G_f A_f \geq 0 ; \quad \epsilon^p = \epsilon_s - \epsilon_y \geq 0 \quad (5)$$

Bu durumda denklemde belirtilen iki mekanizmanın hesaplanması sıyırılma kriteri geliştirmek için yeterlidir.

Deplasman kontrollü deneylerde sıyırılma öncesi ve sonrası eğriliğin sabit kaldığını dikkate alınırsa, sıyırılma sonucu kaybedilen FRP donatının kiriş içinde yeni bir gerilme dağılımına sebep olacağı açıktır. Bu yeniden dağılım çelik donatıda uzamaya sebep olacak ve

eğer donatı halihazırda akmışsa artan plastik deformasyon enerji kaybına neden olacaktır. Bu enerji analitik olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$W_s^p = \int \sigma \cdot d\epsilon^p d\Omega = \sigma_s \Delta \epsilon_s A_s l_s = f_y \epsilon_c (1 - \frac{c'}{c}) A_s l_c \quad (6)$$

Burada A_s donatı alanı, f_y donatı akma gerilmesi, ve l_c sabit moment bölgesinin uzunluğudur.

Sıyırılma sırasında FRP ile beton arasındaki arayüzde harcanan enerji yeni yüzeylerin oluşması için gerekli kırılma enerjisidir. Arayüzü oluşturan malzemelerin kırılma özelliklerine ve yüklemeye bağlı olarak kırılma malzemeler içinde veya aralarında minimum enerji gerektirecek yolu seçerek ilerler. Deneysel gözlemler, FRP-beton arayüzündeki kırılmanın genellikle beton içinde ve yüzeye milimetre düzeyinde bir uzaklıkta gerçekleştiğini göstermiştir. Kırılma işleminin ve yüklemenin Mod II olduğu varsayıldığında (faz açısı $\theta \approx 90^\circ$), kırılma enerjileri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$G_f = \begin{cases} G_f(\theta) \approx G_{FII} & (\text{FRP-beton arayüzünde}) \\ \Gamma_{F'}(\theta) \approx \Gamma_{FII} & (\text{Ankraj bölgesi FRP-FRP arayüzünde}) \end{cases} \quad (7)$$

Burada $G_f(\theta)$ ve G_{FII} betonun sırasıyla katışık mod ve mod II kırılma enerjileri, $\Gamma_{F'}(\theta)$ ve Γ_{FII} ise ankraj bölgelerindeki FRP-FRP arayüzünün katışık mod ve mod II kırılma enerjileridir. Bu tanımlar kullanılarak sıyırılma sırasında harcanan toplam enerji aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$\int G_f dA_f \approx \int G_{FII} dA_{fb} + \int \Gamma_{FII} dA_{fa} \quad (8)$$

Burada $A_{fb} = l_f b_f$ FRP-beton arayüzünün alanı, $A_{fa} = l_a b_a$ ise boyuna FRP donatısı ile enine yöndeki FRP ankraj (ve kesme) donatısı arasındaki yapışma alanıdır. Elastisite teorisi kullanılarak Şekil 5'te taralı alanla gösterilen potansiyel enerji değişimi aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

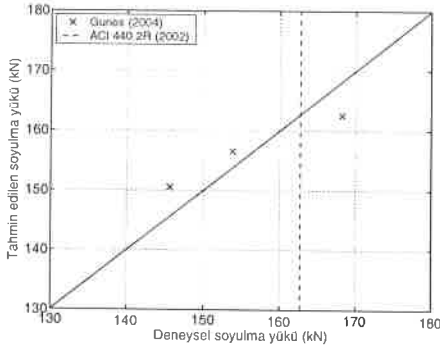
$$\Delta \mathcal{D} = -\Delta \Pi = \frac{P_{2d}^2}{2K_2} - \frac{P_{1d}^2}{2K_1} \quad (9)$$

Burada $P_{2d} = P(\delta_L = \delta_{Ld})$ ve $P_{1d} = P(\delta_L = \delta_{Ld})$ sıyırılma anının öncesi ve sonrası toplam yük değerleridir. Bu denklemdeki K_2 ve K_1 rijitlik değerleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

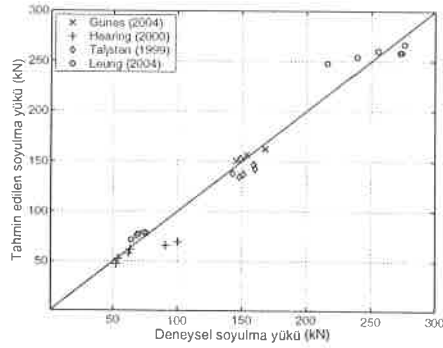
$$K_2 = 2EI_2 \left/ \left[\frac{l_s^2 L}{2} - \frac{2l_s^3}{3} \right] \right., \quad K_1 = 2EI_1 \left/ \left[\frac{l_s^2 L}{2} - \frac{2l_s^3}{3} \right] \right. \quad (10)$$

Bu eşitliklerdeki I_1 ve I_2 sırasıyla FRP donatısız ve donatılı kiriş kesitinin dönüştürülmüş atalet momentleridir. Elde edilen potansiyel enerji değişimi sayesinde genel bir sıyırılma kriteri aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\Delta \mathcal{D} = \frac{P_{2d}^2}{2K_2} - \frac{P_{1d}^2}{2K_1} = (G_{FII} l_f b_f + \Gamma_{FII} l_a b_a) + W_s^p \geq 0 \quad (11)$$



(a) Deneyel sonuçlar ve model tahminleri



(b) Modelin derlenen deneyel verilerle teyidi

Şekil 6: Modelin bu ve diğer bağımsız deneyel çalışmalardan elde edilen verilerle teyidi

Eğer sıyrılma donatı akmasından sonra gerçekleşirse, yukarıdaki bağıntı $P_{ld} \approx P_y$ (Bkz. Şekil 5) varsayımıyla basitleştirilerek belirtik hale getirilebilir:

$$\Delta D = \frac{P_{2d}^2}{2K_2} - \frac{P_y^2}{2K_1} = (G_{FII} l_f b_f + \Gamma_{FII} l_a b_a) + W_s^p \geq 0 \quad (P_{2d} > P_y) \quad (12)$$

Bu denklemde önemli rol oynayan G_{FII} ve Γ_{FII} kırılma enerjileri ile ilgili literatürde yeterli araştırma ve bilgi bulunmamaktadır. G_{FII} için Neubauer ve Rostasy [8] tarafından geliştirilmiş bir model bu çalışmaya uyarlanmıştır [7]:

$$G_{FII} = 0.122 k_b^2 \sqrt{f'_c} \quad (SI) \quad (13)$$

Burada f'_c betonun basınç dayanımı ve k_b FRP plaka genişlik etkisini hesaba katan ve aşağıdaki bağıntıyla ifade edilen bir geometrik bir faktördür:

$$k_b = \sqrt{1.125 \frac{2 - b_p / b_c}{1 + b_p / 400}} \quad (SI) \quad (14)$$

Bu denklemde b_p ve b_c sırasıyla FRP plaka ve betonarme kirişin genişlikleridir.

Ankraj bölgelerindeki FRP-FRP bağının kırılma enerjisi hakkında bir model veya değer bulunmaması nedeniyle, konu odaklı çalışmalar daha güvenilir değerler üretene değin bu çalışmadaki deneyel gözlemlere dayanarak FRP-FRP kırılma enerjisi beton-FRP kırılma enerjisinin yaklaşık iki katı varsayılmıştır.

Yukarıda sunulan modelin bu çalışma kapsamındaki deneylere ek olarak 3 ayrı bağımsız deneyel çalışmadan elde edilen verilerle teyidi yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 6'da sunulmuştur. Şekil 6(a)'dan görüldüğü gibi geliştirilen model ACI Komite-440 [5,6] tarafından sıyrılma problemlerinin önlenmesi amacıyla tavsiye edilen bağıntıdan çok daha doğru tahminler vermektedir. Şekil 6(b)'de bağımsız deneyel çalışmalardan derlenen verilerle yapılan karşılaştırma modelin değişik kiriş geometrileri ve güçlendirme biçimleri için geçerliliğini ortaya koymaktadır.

5. Özet ve Sonuçlar

Deneyssel çalışmalarla destekli olarak ve kırılma mekaniği prensipleri kullanılarak FRP kompozitlerle güçlendirilmiş kirişler için FRP sıyrılma yükünü tahmin bir model geliştirilmiştir. Geliştirilen model ilgili bütün kiriş, güçlendirme, ve bağ ankraj parametrelerini hesaba katarak, sistemin genel enerji dengesi ile çelik donatı akması ve FRP sıyrılması sırasında tüketilen enerjinin hesabı yoluyla sıyrılma yükünü tahmin etmektedir. Modelin bu ve diğer bağımsız deneysel çalışmalardan elde edilen verilere uygulanması sonucunda, çeşitli kiriş büyüklüğü, güçlendirme biçimleri ve ankraj durumları için FRP sıyrılma yükünü başarılı olarak tahmin ettiği görülmektedir. FRP sıyrılması sırasındaki enerji tüketim mekanizmalarının daha hassas olarak karakterize edilip hesaba katılmasıyla modelin daha da geliştirilmesi mümkündür.

Geliştirilen model betonarme kirişlerin FRP kompozitler kullanarak güçlendirilmesi tasarımına kolayca entegre edilerek FRP sıyrılma yükünün kiriş eğilme kapasitesinin üzerinde olması için gerekli olabilecek bağ ankrajı miktarının belirlenmesinde kullanılabilir. Ana hatlarıyla bir tasarım yöntemi Gunes ve diğerleri [7] tarafından verilmiştir. Şekil 6'da gösterildiği üzere, geliştirilen model halihazırda ACI Komite-440 tarafından belirlenen sıyrılma problemlerini önleme amaçlı bağıntıdan çok daha üstün performans göstermektedir. Modelin diğer sıyrılma biçimlerini de kapsayacak şekilde geliştirilmesi ve geçerliliğinin daha büyük bir deneysel veri tabanı kullanarak kanıtlanması sonucunda tasarım yönetmeliklerinde yerini alması mümkündür.

KAYNAKLAR

- [1] Meier, U., "Strengthening of Structures using Carbon Fibre/Epoxy Composites", *Construction and Building Materials*, 9(6): 341-351, 1995.
- [2] Buyukozturk, O., and Hearing, B., "Failure Behavior of Precracked Concrete Beams Retrofitted with FRP", *Journal of Composites for Construction*, 2(3): 138-144, 1998.
- [3] Buyukozturk, O., Gunes, O., and Karaca, E., "Progress Review on Understanding Debonding Problems in Reinforced Concrete and Steel Members Strengthened Using FRP Composites", *Construction and Building Materials*, 18: 9-19, 2004.
- [4] Gunes, O., "A Fracture Based Approach to Understanding Debonding in FRP Bonded Structural Members", Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2004.
- [5] ACI 440, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", ACI 440.2R-02, American Concrete Institute, 2002.
- [6] ACI 440, "Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures", ACI 440.R-07, American Concrete Institute, 2007.
- [7] Gunes, O., Buyukozturk, O. and Karaca, E., "A Fracture-Based Model for FRP Debonding in Strengthened Beams", *International Journal of Engineering Fracture Mechanics*, 2009 (in press, doi:10.1016/j.engfracmech.2009.04.011).
- [8] Neubauer U. and Rostasy F. S., "Design Aspects of Concrete Structures Strengthened with Externally Bonded FRP-Plates", *Proceedings of the 7th International Conference on Structural Faults and Repair*, Edinburgh, UK, 2: 109-118, 1997.

