

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FRP SARGILI DİKDÖRTGEN KESİTLİ BETONARME
KOLONLARIN YÜK TAŞIMA KAPASİTELERİNİN
FARKLI DAVRANIŞ MODELLERİNE GÖRE
İRDELENMESİ**

İnşaat Müh. Erhan BULUT

FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Bilge DORAN

İSTANBUL,2006

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. YAPI MALZEMESİ OLARAK LİFLERLE KUVVETLENDİRİLMİŞ POLİMER	3
2.1 Lifle Kuvvetlendirilmiş Polimerlerin Çeliğe Göre Avantajları ve Dezavantajları	4
2.2 Fiziksel Özellikler	4
2.2.1 Yoğunluk	4
2.2.2 Isıl Genleşme Katsayısı	4
2.2.3 Yüksek Sıcaklık Etkisi	5
2.2.4 Kimyasal Direnç	6
2.2.5 Elektrik İletkenliği	6
2.3 Mekanik Özellikler	6
2.3.1 Çekme Dayanımı	6
2.3.2 Basınç Dayanımı	8
2.3.3 Kesme Dayanımı	8
2.3.4 Aderans	8
3. ÇELİK VE/VEYA LİF TAKVİYELİ POLİMERLER YARDIMIYLA SAĞLANAN YANAL KUŞATMA	9
3.1 Mevcut Malzeme Modelleri	9
3.1.1 Samaan, Mirmiran ve Shahawy Tarafından Önerilen Model	9
3.1.2 Karbhari ve Gao Tarafından Önerilen Model	11
3.1.3 Toutanji Tarafından Önerilen Model	11
3.1.4 Saafi vd. Tarafından Önerilen Model	13
3.1.5 Spoelstra ve Monti Tarafından Önerilen Model	13
3.1.6 Razvi ve Saatçioğlu Tarafından Önerilen Model	14
3.1.7 İlki vd. Tarafından Önerilen Model	14
3.1.8 Theriault ve Neale Tarafından Önerilen Model	15
3.2 Malzeme Modellerinin Karşılaştırılması	16
3.2.1 Etriye Katkısının Hesaplanması	22
3.2.2 FRP Katkısının Hesaplanması	24
4. EKSENEL YÜK TAŞIMA KAPASİTESİ	32

4.1	Önerilen Bağıntılar.....	32
4.1.1	Theriault ve Neale Tarafından Önerilen Bağıntı	32
4.1.2	M. Maalej, S. Tanwongsyal ve P. Paramasivam Tarafından Önerilen Bağıntı	33
4.1.2.1	Betonun ve Donatının Katkısı.....	33
4.1.2.2	FRP levhanın katkısı.....	37
4.2	Bağıntıların İrdelenmesi.....	40
4.3	Yapay Sinir Ağları İle Modelleme	60
4.3.1	YSA ile FRP uygulaması.....	62
4.3.1.1	Azaltılmış Parametreler İle Çözüm.....	77
5.	SONUÇ.....	79
	KAYNAKLAR.....	81
	EKLER.....	83
	EK 1 YSA Modeli CD'si.....	84
	ÖZGEÇMİŞ.....	85

SİMGE LİSTESİ

A_g	Kesit alanı.
A_{st}	Toplam boyuna donatı alanı (Theriault ve Neale (2000) modeli).
A_{st}	Enine donatının kesit alanı (M.Maalej, S.Tanwongswal, P.Paramasivam (2002)).
A, B, C	Toutanji (1999) Modeli, gerilme-birim deformasyon eğrisi parametreleri.
A	Çekirdek betonunun eksenel yük kapasitesine katkısı.
A_c	Kolonun kesit alanı.
$A_{\text{çekirdek}}$	Çekirdek beton alanı.
A_{sl}	Boyuna donatı alanı.
b	Kesit genişliği.
b_c	Kuşatma basıncının meydana geldiği kesit derinliği.
b_{cx}	Kesit x eksen boyutu.
b_{cy}	Kesit y eksen boyutu.
B	Örtü betonunun eksenel yük kapasitesine katkısı.
C	Boyuna donatının eksenel yük kapasitesine katkısı.
d	Paspayı.
d_b	Boyuna donatı çapı.
D	Samaan, Mirmiran ve Shahawy (1999) Modeli, kolon çapı.
D	FRP'nin taşıma kapasitesine katkısı.
D_g	Dairesel kesit çapı.
E_1, E_2	Samaan, Mirmiran ve Shahawy (1999) Modeli gerilme-eksenel birim deformasyon eğrisi parametreleri.
E_f, E_{frp}	FRP elastisite modülü.
E_c, E_{c0}	Betonun elastisite modülü.
E_{a-0}	FRP levhanın boyuna (0°) yöndeki elastisite modülü.
E_{a-90}	FRP levhanın enine (90°) yöndeki elastisite modülü.
E_{st}	Enine donatı çekme elastisite modülü.
$E_{FRP-\zeta}$	FRP çekme elastisite modülü.
E_{FRP-b}	FRP basınç elastisite modülü.
f'_{cc}	Kuşatılmış beton dayanımı.
f'_{c0}	Kuşatılmamış beton dayanımı.
f_l	Maksimum kuşatma basıncı.
f_0	Samaan, Mirmiran ve Shahawy (1999) Modeli E_2 eğimindeki ikinci eğrinin gerilme eksenini kestiği plastik gerilme referans noktası.
f_{frp}	Karbhari ve Gao (1997) Modeli, FRP çekme gerilmesi dayanımı.
f_{fu}	Toutanji (1999) Modeli, FRP dayanımı.
f_{frpu}	FRP'nin çekme dayanımı.
f_{lfrp}	FRP kuşatmasından kaynaklanan kuşatma basıncı.
$f'_{cc\text{deney}}$	Deneyel olarak bulunmuş kuşatılmış beton dayanımı.

$f'_{cc_{teorik}}$	Teorik olarak bulunmuş kuşatılmış beton dayanımı.
f_y	Donatı akma dayanımı.
f_{yt}	Enine donatının akma dayanımı.
f_{le}	Yanal kuşatma basıncı.
f_{lex}	x eksenli boyunca etkiyen kuşatma basıncı.
f_{ley}	y eksenli boyunca etkiyen kuşatma basıncı.
f_{sl}	Boyuna donatıdaki basınç gerilmesi.
f_{sh}	Boyuna donatı pekleşme gerilmesi.
f_u	Boyuna donatı maksimum gerilmesi.
$f_{S/DU}$	Boyuna donatı limit gerilmesi.
f_{la}	Yanal kuşatma basıncı.
$f_{l_{TOPLAM}}$	Kuşatılmış kolon toplam basınç dayanımı.
f_{y-b}	Boyuna donatı akma mukavemeti.
f_{y-e}	Enine donatı akma mukavemeti.
h	Kesit derinliği.
k_1	Kuşatma etkeni.
k_3	Küçültme katsayısı.
l	Kesit yüksekliği.
n^*	Samaan, Mirmiran ve Shahawy (1999) Modeli, eğrilik parametresi.
n, N_b, n_{FRP}	FRP katman sayısı.
N	Eksenel yük taşıma kapasitesi.
N_{la-0}	Boyuna yöndeki FRP levha sayısı.
N_{la-90}	Enine yöndeki FRP levha sayısı.
n_b	Boyuna donatı adedi.
P	Toutanji (1999) Modeli, kuşatma basıncı.
P_{rc}	Eksenel Yük Taşıma Kapasitesi
P	Kolon kesidi çevre uzunluğu.
r	Köşe yarıçapı.
R	Etriyenin kapladığı alanın çapı.
R_a	Eşdeğer dairesel kesit yarıçapı.
s	Etriyeler arası mesafe.
s_l	Boyuna donatılar arasındaki boşluk miktarı.
t, t_a, t_{FRP}	FRP katman kalınlığı.
T_g	Geçiş sıcaklığı.
w_x	Kolon kesiti uzun boyu.
w_y	Kolon kesiti kısa boyu.
α_{pc}	Performans katsayısı.
ϵ_c	Eksenel birim deformasyon
ϵ_{cc}	Maksimum birim deformasyon
ϵ_l	Toutanji (1999) Modeli, yanal birim deformasyon.
ϵ_{c0}	Sargısız betonun maksimum birim deformasyonu.

ε_{frp}	FRP birim deformasyonu.
ε_{max}	Maksimum birim deformasyon.
ε_{ch}	60 mm ölçüm boyundaki enine şekil değiştirme.
$\varepsilon_{h,rup}$	Beton elemanlara sarılmış FRP tabakasının en büyük çekme dayanımı.
$\varepsilon_{ccdeney}$	Deneyssel olarak bulunmuş kuşatılmış kesit birim deformasyonu.
$\varepsilon_{ccteorik}$	Teorik olarak bulunmuş kuşatılmış kesit birim deformasyonu.
ε_y	Boyuna donatı birim deformasyonu.
ε_{sh}	Boyuna donatı pekleşme anındaki birim deformasyonu.
ε_u	Boyuna donatı maksimum birim deformasyonu.
$\varepsilon_{S/DU}$	Boyuna donatı limit birim deformasyonu.
ε_a	FRP levhanın çekme birim deformasyonu.
κ_a	Kesit şekline bağlı etki faktörü.
ρ_f	FRP tabakasıyla oluşturulan sargı kesit alanının beton kesit alanına oranı.
σ_{max}	Maksimum basınç gerilmesi.
ν_c	Betonun Poisson oranı.
ϕ_c	Beton için direnç faktörü.
ϕ_s	Çelik için direnç faktörü.
ϕ_{frp}	FRP için direnç katsayısı.
ϕ_b	Boyuna donatı çapı.
ϕ_e	Enine donatı çapı.
ω_w	FRP kuşatmasından kaynaklanan kuşatma gerilmesi oranı.

KISALTMA LİSTESİ

AFRP	Aramid Lifleriyle Kuvvetlendirilmiş Polimer.
CFRP	Karbon Lifleriyle Kuvvetlendirilmiş Polimer.
D.A.	Dayanım Artışı.
ETR	Etriye.
FRP	Lifle Kuvvetlendirilmiş Polimer (Fiber Reinforcement Polymer).
GFRP	Cam Lifleriyle Kuvvetlendirilmiş Polimer.
LSR	Düşük Dayanımlı Betonarme Kesit (Low Strength Reinforced).
Ş.A.	Şekil Değiştirme Kapasitesi Artışı.
YSA	Yapay Sinir Ağları.

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Gerilme-birim deformasyon eğrileri (Taerwe, L. R., 1993).....	7
Şekil 3.1 Model parametreleri	10
Şekil 4.1 Basınç altındaki donatı çeliğinin gerilme-birim deformasyon ilişkisi	36
Şekil 4.2 Kolon kesitinin dönüştürülmesi.....	38
Şekil 4.3 Etkin kuşatılmış beton alanı	39
Şekil 4.4 Kolon kesidi	41
Şekil 4.5 Tipik yapay sinir ağları modeli	61
Şekil 4.6 Eksenel yük değerlerinin karşılaştırılması	67
Şekil 4.7 Parametrelerin hassasiyetleri	69
Şekil 4.8 Paspayı (d)-eksenel yük ilişkisi.....	70
Şekil 4.9 Köşe yarıçapı (r)-eksenel yük ilişkisi.....	70
Şekil 4.10 Boyuna donatı çapı (ϕ_b) -eksenel yük ilişkisi.....	71
Şekil 4.11 Boyuna donatı adedi (n_b) -eksenel yük ilişkisi.....	71
Şekil 4.12 Boyuna donatı akma dayanımı (f_{y-b}) -eksenel yük ilişkisi	72
Şekil 4.13 Enine donatı çapı (ϕ_e) -eksenel yük ilişkisi.....	72
Şekil 4.14 Enine donatı akma dayanımı (f_{y-e}) – eksenel yük ilişkisi.....	73
Şekil 4.15 Enine donatı aralığı (s) – eksenel yük ilişkisi.....	73
Şekil 4.16 Beton dayanımı (f_{c0}) -eksenel yük ilişkisi	74
Şekil 4.17 FRP birim deformasyonu (ϵ_{frp}) - eksenel yük ilişkisi.....	74
Şekil 4.18 FRP çekme elastisite modülü (e_{frp-c})-eksenel yük ilişkisi.....	75
Şekil 4.19 FRP basınç elastisite modülü (e_{frp-b})-eksenel yük ilişkisi.....	75
Şekil 4.20 FRP katman sayısı (n_{frp}) –eksenel yük ilişkisi.....	76
Şekil 4.21 FRP kalınlığı (t_{frp}) – eksenel yük ilişkisi.....	76
Şekil 4.22 Eksenel yük değerlerinin karşılaştırılması (azaltılmış veri ile).....	77

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Polimerik reçine (matris) türleri (kachlakev, d.,green,b.k. ve barnes, w., 2000)	3
Çizelge 2.2 Yoğunluk (acı 440, 2000).....	4
Çizelge 2.3 Isıl genleşme katsayısı (acı 440, 2000)	5
Çizelge 2.4 Mekanik özellikler (acı 440, 2000)	7
Çizelge 3.1 Çalışma kapsamında uygulanan güçlendirme şekilleri (peker, ö. , 2005).....	17
Çizelge 3.2 Seçilen numunelerin genel özellikleri	18
Çizelge 3.3 LSR-R-1-1-40a ve LSR-R-1-1-40b deney sonrası bilgileri (Peker, Ö. , 2005).....	19
Çizelge 3.4 Deney sonuçları	20
Çizelge 3.5 Etriye katkısı.....	23
Çizelge 3.6 f_t değerleri.....	25
Çizelge 3.7 FRP'den kaynaklanan f_{cc}/f_{c0} değerleri	26
Çizelge 3.8 FRP'den kaynaklanan $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{c0}$ değerleri	27
Çizelge 3.9 f_{cc} değerlerinin karşılaştırılması	28
Çizelge 3.10 ε_{cc} değerlerinin karşılaştırılması	29
Çizelge 3.11 $f_{cc-deney}/f_{c0-teorik}$ değerleri.....	30
Çizelge 3.12 $\varepsilon_{cc-deney}/\varepsilon_{c0}$ değerleri	31
Çizelge 4.1 Kullanılan FRP'nin özellikleri	41
Çizelge 4.2 Sonuçların karşılaştırılması	46
Çizelge 4.3 Sonuçların karşılaştırılması	59
Çizelge 4.4 Tasarım parametreleri.....	64
Çizelge 4.5 Kullanılan veri setleri	65
Çizelge 4.6 Eksenel yük değerlerinin karşılaştırılması	68
Çizelge 4.7 Eksenel yük değerlerinin karşılaştırılması (azaltılmış parametre ile)	78

ÖNSÖZ

Ülkemiz için yeni sayılabilecek bir güçlendirme tekniği olan FRP uygulamasını incelemek üzere başladığım bu tezde, ilk etapta hedef olarak belirlenmiş konular, tezin gelişim sürecinde Yapay Sinir Ağları'na kadar ilerledi. Özellikle son kısımda, bu modelleme yöntemini kullanarak, FRP ile yapılacak güçlendirmelerde hangi parametrelerin taşıma kapasitesine daha çok etkisi olduğunun belirlenmesi üzerine çalıştım.

Çeşitli şanssızlıklar sebebiyle uzun bir süreye yayılmış yüksek lisans eğitimimin bu son aşamasında, taşıdığı onca yüke rağmen yanımda olan, ilgisini eksik etmeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Bilge DORAN'a, tezin oluşması sırasında kıymetli bilgilerini benimle paylaşmış Önder ÖNDEMİR'e ve Duygu DÖLEK'e, öğrenim hayatım boyunca desteğini hep hissettiğim aileme sonsuz teşekkürler. Bu tez bitmişse, onların sayesinde.

ÖZET

Bu çalışmada lifle kuvvetlendirilmiş polimerlerle kuşatılmış dikdörtgen kesitli betonarme kolonların eksenel yük taşıma kapasitelerinin bulunması konu edilmiştir. İkinci bölümde ülkemiz için yeni sayılabilecek bir malzeme olan FRP'nin temel özellikleri anlatılmış, bu özellikler fiziksel ve mekanik özellikler olarak iki kısımda incelenmiştir. Üçüncü bölümde FRP ile kuşatılmış betonarme kesitlerdeki kuşatılmış kolon basınç dayanımının bulunmasını sağlayan matematiksel modellerin anlatılmasının ardından literatürde yer alan deneysel çalışmalar üzerinde bu modellerin önerdiği bağıntılar uygulanmış, sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olup olmadığı incelenmiş, ve deneysel sonuçlara en yakın sonuçları veren matematiksel model belirlenmeye çalışılmıştır.

Dördüncü bölümde literatürde yer alan ve eksenel yük taşıma kapasitesini veren iki analitik bağıntı irdelenmiştir. Bu bağıntılardaki kuşatma basıncının hesabı için bir önceki bölümde deneysel sonuçlara en yakın sonuçları veren matematiksel model kullanılmıştır. Örnekler üzerinde deneysel sonuçlarla analitik sonuçlar karşılaştırılmış ve kuşatma basıncını tarif eden iki bağıntıdan deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar veren bağıntı belirlenmiştir. Ardından Yapay Sinir Ağları genel hatlarıyla anlatılmış, 14 adet parametre yardımıyla bulunan FRP ile kuşatılmış kesitlerin eksenel yük taşıma kapasitesini veren bağıntının (Maalej, M., Tanwongswal S., Paramasivam P., 2002) daha az parametre ile belirlenebilmesi için hassasiyet değeri en yüksek olan parametreler; etkin parametreler araştırılmıştır. Üretilen 50 veri seti yardımıyla Yapay Sinir Ağları modellenmiş, eğitilmiş ve test edilmiştir.

Üretilmiş model kullanılarak elde edilmiş hassasiyet analizleriyle 8 adet parametre belirlenmiş ve bu parametrelerin eksenel yük taşıma kapasitesinin bulunması için yeterli olup olmadıkları incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lifle Kuvvetlendirilmiş Polimerler, Eksenel Yük Taşıma Kapasitesi, Yapay Sinir Ağları.

ABSTRACT

The aim of this work is to predict the axial load carrying capacity of rectangular reinforced concrete columns confined with fiber reinforcement polymer. In chapter two, basic characteristics of FRP, which is a new technology for our country, are described in two parts; physical characteristics and mechanical characteristics. After describing the mathematical models which obtain the compressive strength of FRP confined concrete columns, these models are applied on published experimental studies in chapter three. Then results of mathematical models are compared with experimental results.

In chapter four, two analytical equations in literature , which extend the axial load carrying capacity, are examined. The compressive strength in these equations are calculated with the sensitive mathematical model which was determined in the previous chapter. Experimental results and analytical results are compared to these two analytical equations, and the analytical equations which give the similar results to the experimental results are determined. Besides, Neural Networks are basically described. Then the equation of FRP confined section's axial load carrying capacity with 14 parameters (Maalej, M., Tanwongsva S., Paramasivam P., 2002) is examined by Neural Networks. Effective parameters are investigated by sensitivity analyses. With the help of generated 50 data set , a Neural Network is modeled, trained and tested.

With sensitivity analyses of generated Neural Network system, 8 parameters are determined and analyzed if they are enough to define the axial load carrying capacity.

Keywords: Fiber Reinforcement Polymer, Axial Load Carrying Capacity, Neural Networks.

1. GİRİŞ

Yapıların deprem kuvveti karşısında gösterdiği kötü davranışın birçok sebebi olmakla birlikte bunlardan ikisi çok daha ön plandadır. Bunlar düşük beton dayanımı ve yetersiz sünekliktir. Depreme dayanıklı yapı tasarımında uygulanması benimsenmiş temel esas, yapının küçük şiddetli depremleri hasarsız bir şekilde , yani elastik sınırlar içerisinde; orta şiddetteki depremleri elastik sınırların ötesinde, fakat kolayca tamir edilebilecek hasarlarla; yüksek şiddetli depremleri ise sistem göçmeden, can kaybı meydana gelmeden karşılayabilmesidir. Bu esasın uygulanabilmesi için, deprem kuvvetleri karşısında yapının sünek davranış gösterebilmesi ve enerji yutması büyük önem taşımaktadır. Ülkemizdeki mevcut yapılarda bu sünekliğin sağlanması için kullanılması gereken enine donatılardaki yetersizlik dikkat çekmektedir. Ayrıca düşük beton dayanımı da, sünekliği azaltan ikinci bir faktördür. Bu nedenlerden dolayı, yeni yapılacak yapıların yönetmeliklere göre uygun beton ve donatı kombinasyonu ile tasarlanması beklenmektedir, mevcut yapılar için ise çözüm güçlendirmedir.

Yapıların güçlendirilmesi için pek çok teknik uygulanmaktadır. Yapının içinde bulunduğu koşullara göre en uygun olan teknik seçilerek uygulanmalıdır. Zaman ve maliyet gibi çeşitli kriterlere göre yapılacak bu güçlendirme tekniklerinden bir tanesi de, lifle kuvvetlendirilmiş polimer kompozit malzemeler yani literatürde kullanılan ismi ile FRP'ler (fiber reinforcement polymer) ile güçlendirmedir. Karbon, cam ve aramid gibi malzemelerden üretilen bu lifler, yüksek elastisite modülüne ve dayanıma sahip, hafif, kolay ve çabuk uygulanabilir, çevre koşullarına dayanıklı malzemelerdir.

Lifle kuvvetlendirilmiş polimer kompozitler ile güçlendirme, yeni bir teknik olmasına rağmen, bugüne kadar yapılmış çalışmalar bir hayli fazladır. Özellikle beton elemanlar üzerinde, birçok değişkene bağlı olarak FRP ile güçlendirmenin etkileri incelenmiştir. Ancak bu çalışmalar genelde dairesel kesitli kolonlarda yoğunlaşmıştır. Yapılan bu çalışmaların çoğunda kullanılan kesite, betona ve FRP'ye ait özelliklerin tümü verilmemektedir. Böyle bir durumda, yapılmış deneysel çalışma üzerinde başka araştırmalar yapmak mümkün olamamaktadır. Bu çalışmada, FRP ile güçlendirilmiş dikdörtgen kesitli betonarme kolonların eksenel yük taşıma kapasitelerinin bulunma yöntemleri incelenmiştir. Kuşatılmış kolonlarda kullanılan bazı matematiksel modeller ile birlikte çalışan bu yöntemlerden uygun bulunan biri ile literatürde yer alan bazı deneyler üzerine çalışılmış ve Yapay Sinir Ağları kullanılarak eksenel yük taşıma kapasitesinin bulunmasına etki eden en önemli parametrelerin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Bu hedefin gerçekleşmesi ile, yapılan deneysel çalışmalarda, dikkatle takip edilmesi gereken parametrelerin hangileri olduğu ortaya çıkartılmış olmaktadır.

2. YAPI MALZEMESİ OLARAK LİFLERLE KUVVETLENDİRİLMİŞ POLİMER

Liflerle Kuvvetlendirilmiş Polimer, literatürde bilinen ismiyle FRP, bir polimer reçinesinin içine yerleştirilmiş yüksek mukavemetli liflerden oluşan kompozit bir elemandır. Göçmeye ulaşınca kadar doğrusal bir gerilme-deformasyon ilişkisi gösteren rijitlik ve mukavemet özelliğine sahiptir. FRP kompozitlerin içerisinde bulunan lifler, asıl yük taşıyıcı elemanlardır. Reçineler ise, lifleri bir arada tutmak, hasardan korumak ve yükün aralarında dağılımını sağlamak gibi görevleri yerine getirir. Polimerik reçine türlerinden epoksi, polyester ve vinilester yaygın olarak kullanılmaktadır. Çizelge 2.1’de yaygın kullanılan polimerik reçine (matris) türlerinin temel fiziksel özellikleri gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 Polimerik reçine (matris) türleri (Kachlakev, D., Green, B.K. ve Barnes, W., 2000)

	Polyester	Fenolik	Vinilester	Epoksi
Yoğunluk(g/cm ³)	1.20	1.20	1.15	1.10-1.40
Çekme Mukavemeti (MPa)	50-60	50-40	70-80	50-90
Elastisite Modülü (GPa)	3.0	3.0	3.5	3.0
Kopmadaki Uzama (%)	2.0-3.0	1.0-2.0	4.0-6.0	2.0-8.0

Güçlendirme uygulamalarında kullanılan en uygun lifler ise karbon, aramid ve camdır. İçerdiği life göre FRP malzeme CFRP (karbon lifli), GFRP (cam lifli) ve AFRP (aramid lifli) şeklinde gösterilir.

GFRP, diğerlerine göre daha ucuzdur, ancak en çok kullanılan CFRP’dir. Bunun nedeni diğerlerine oranla yüksek mukavemet ve yüksek rijitlik sağlamasıdır. CFRP ve AFRP, birçok kimyasal etkiye karşı direnç gösterirken, GFRP, bazik ortamda mukavemet kaybeder. Ultraviyole ışınım etkisi ise AFRP’yi renk değişimi ve mukavemet azalmasına maruz bırakır.

Her üç tip de, çevresel kirlilik açısından tehlikeli sayılmayacak malzemelerdir. İnsan sağlığı açısından ise küçük riskler taşırlar; kompozitlerin kesimi ve işlenmesi sırasında liflerin ince parçacıkları cilde ve gözlere zarar verebilmesi gibi.

2.1 Lifle Kuvvetlendirilmiş Polimerlerin Çeliğe Göre Avantajları ve Dezavantajları

Lifle Kuvvetlendirilmiş Polimerler çeliğe göre yaklaşık 1/5 oranında hafiftir. Bununla birlikte dayanım/ağırlık oranı yüksektir. Korozyona, asidik ve bazik ortama karşı da çelikten daha dirençlidir. Cam ve Aramid Liflerin elektrik ve ısı iletkenliği düşüktür. Lifle Kuvvetlendirilmiş Polimerlerin elektromanyetik özelliği yoktur, ayrıca çeliğe göre çabuk ve kolay uygulanır.

Bu avantajların yanında; Karbon Lifli Polimerler hariç, elastisite modülleri çelikten düşüktür. Yatay yöndeki dayanımı, yatay yönde örülmüş liflere bağlı olarak genellikle düşüktür. Kesme dayanımı, çekme dayanımının 1/5 i kadardır. Bir diğer dezavantaj olarak da gevrek kırılma öncesi akmanın gerçekleşmemesi gösterilebilir.

Lifle Kuvvetlendirilmiş Polimerler henüz çelik kadar yaygın kullanılmadığı için uygulamada yaşanmakta olan tecrübe eksikliği de çelik ile kıyaslandığında önemli bir handikaptır.

2.2 Fiziksel Özellikler

2.2.1 Yoğunluk

Lifle Kuvvetlendirilmiş Polimerlerin yoğunluğu $1.5\sim 2.1 \text{ g/cm}^3$ arasında değişir. Bu yoğunluk, çelik yoğunluğunun 1/4 ü ile 1/6 sı arasındadır. Çizelge 2.2 de değişik lif tipleri için FRP ve çelik yoğunlukları verilmiştir.

Çizelge 2.2 Yoğunluk (ACI 440, 2000)

Çelik	GFRP	CFRP	AFRP
7.9 g/cm^3	$1.25\text{-}2.1 \text{ g/cm}^3$	$1.5\text{-}1.6 \text{ g/cm}^3$	$1.25\text{-}1.4 \text{ g/cm}^3$

2.2.2 Isıl Genleşme Katsayısı

FRP malzemenin ısı genleşme katsayısı, liflerin tipine, reçinenin tipine ve liflerin hacim oranına bağlı olarak boyuna ve enine yönde farklılık gösterir. Boyuna yöndeki genleşme katsayısı liflerin, enine yöndeki genleşme katsayısı ise reçinenin özelliklerine göre değişir. Çizelge 2.3 de tipik FRP ve çelik için boyuna ve enine yönde genleşme katsayıları verilmiştir. Eksi değerdeki genleşme katsayısı; yükselen sıcaklıkta kısalan, düşen sıcaklıkta uzayan malzemeyi ifade eder.

Karşılaştırmak için belirtmek gerekirse, betonun genleşme katsayısı $7.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ile $10.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ arasında değişir. Beton izotropik kabul edilir.

Çizelge 2.3 Isıl genleşme katsayısı (ACI 440, 2000)

Yön	Genleşme Katsayısı , $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$			
	Çelik	GFRP	CFRP	AFRP
Boyuna α_L	11.7	6 ~ 10	-2 ~ 0	-6 ~ -2
Enine α_T	11.7	21 ~ 23	23 ~ 32	60 ~ 80

2.2.3 Yüksek Sıcaklık Etkisi

Lifle Kuvvetlendirilmiş Polimerler ile güçlendirme yöntemi, yangın ile göçme riski taşıyan binalar için önerilmemektedir. FRP betona sarıldığından, beton oksijensiz kalır ve yanmaz ancak bununla birlikte polimerler yüksek sıcaklığa dayanamayıp yumuşar. Polimerlerin yumuşamaya başladığı sıcaklık, geçiş sıcaklığıdır , T_g . Geçiş sıcaklığından sonra, polimerlerin elastisite modülü , moleküler yapıdaki değişiklikten dolayı önemli derecede azalır. T_g değeri, reçine tipine bağlıdır , normalde 65 ile 120 $^{\circ}\text{C}$ arasındadır. Kompozit malzemede, sıcaklık artışına karşı reçineden daha dayanıklı olan lifler, boyuna yönde yük taşımaya devam edebilirler. Bununla birlikte, malzemenin bütününe gerilme özellikleri, liflerle reçine arasındaki yük transferindeki azalmaya bağlı olarak azalır.

FRP ile güçlendirilmiş betonlarda, beton yüzeyindeki polimerlerin özellikleri beton ile FRP arasındaki bağda ana unsurdur. Geçiş sıcaklığına yaklaşıldıkça, polimerin mekanik özellikleri önemli derecede azalır ve polimer betondan liflere gerilme aktaramaz olur. 60 ile 124 $^{\circ}\text{C}$ arasında geçiş sıcaklığı olan malzemeler ile yapılmış bir çalışmada, 100 $^{\circ}\text{C}$ 'de aderans kuvvetinin %20-40 civarında olduğu; ve yaklaşık 200 $^{\circ}\text{C}$ 'de %80-90 arasında bir azalmanın yaşandığı sonucu alınmıştır. AFRP tendonlar kullanılarak kısmi öngerilmeye maruz bırakılmış, AFRP veya CFRP ile güçlendirilmiş kirişlerin eğilme davranışı ile ilgili bir çalışmada kirişler sürekli yük altında kademe kademe artırılan sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Kirişteki kırılma, Karbon ve Aramid malzemedeki sıcaklık 200 ila 300 $^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaştığında meydana gelmiştir (Okamoto,1993). FRP ile güçlendirilmiş kirişler ile ilgili bir başka çalışmada, 250-350 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta kırılma meydana geldiği belirlenmiştir (Sakashita, 1997).

Polimerin yumuşaması veya liflerin eşik sıcaklığından yüksek bir sıcaklığın meydana gelmesine bağlı olarak tüm emniyetin yitirilmesi halinde yapısal göçme meydana gelebilir. Cam lifleri, erime noktasına kadar (1000 °C üzerinde) dayanım gösterirlerken karbon lifleri 650 °C üzerindeki bir ortamda okside olurlar. Aramid lifleri ise genellikle 200 °C üzerindeki değerlerde kullanılmazlar. Bu üç liften hiçbirini yanmayı, tutuşmayı desteklemez.

2.2.4 Kimyasal Direnç

Lifle Kuvvetlendirilmiş Polimerler, zararlı ortamda gösterdiği iyi kimyasal direnç sebebiyle caziptir. Çelik dayanımında düşük pH değerlerinde bir azalma meydana gelirken, FRP için bu durum tam tersidir. Özellikle GFRP malzeme bazik ortamda mukavemet kaybeder. CFRP; nemde, asidik ve bazik ortamda çok iyi dayanım performansı gösterir. Bununla birlikte, alüminyum ve titanyum ile galvanik reaksiyona girme tehlikesi bulunduğundan, uygulama aşamasında CFRP bunlardan uzak tutulmalıdır. AFRP de CFRP gibi, kimyasal etkinin bir çok şekline karşı direnç gösterir. Ancak AFRP, cam ve karbon liflerine nazaran daha çok su absorbe eder. Bu durum, reçine/lif arayüzünde problemlere neden olur.

2.2.5 Elektrik İletkenliği

AFRP ve GFRP, iletken değildir. Bu yüzden enerji hatlarının ve demiryollarının yakınında, iletişim araçlarında kullanımı uygundur. CFRP, elektriği iletir, elektrikli ekipmanların yakınında kesimi ya da işlenmesi risklidir.

2.3 Mekanik Özellikler

2.3.1 Çekme Dayanımı

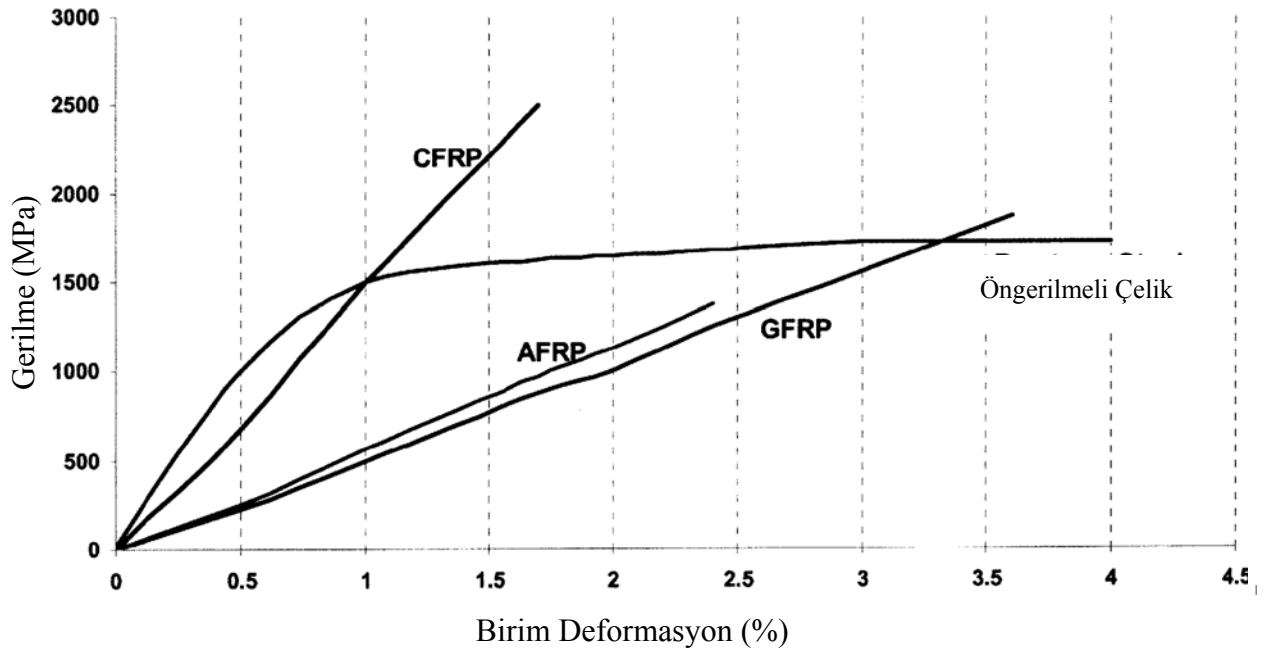
Çekme yükü altında, FRP malzemeler, yırtılmadan önce bir plastik davranış (akma) göstermezler. Bir çeşit liften üretilmiş FRP malzemenin çekme davranışı, göçmeye kadar doğrusal-elastik gerilme-birim deformasyon ilişkisi ile gösterilmektedir. Sık kullanılan FRP türlerinin ve çeliğin çekme özellikleri Çizelge 2.4 te gösterilmiştir.

Çizelge 2.4 Mekanik özellikler (ACI 440, 2000)

	Çelik	GFRP	CFRP	AFRP
Akma gerilmesi, [MPa]	276-517	Yok	Yok	Yok
Çekme dayanımı, [MPa]	483-690	483-1600	600-3690	1720-2540
Elastisite Modülü, [$\times 10^3$ MPa]	200	35-51	120-580	41-125
Akma birim deformasyonu	1.4-2.5	Yok	Yok	Yok
Yırtılma birim deformasyonu	6-12	1.2-3.1	0.5-1.7	1.9-4.4

FRP'nin çekme dayanımı ve rijitliği bir çok etkene bağlıdır. FRP'deki lifler esas yük taşıyıcı elemanlar oldukları için, lif hacminin bütün FRP hacmine oranı çekme dayanımını önemli ölçüde etkiler. Aynı özelliklere sahip elemanlarda bile, liflerin hacim oranı değiştikçe dayanım ve rijitlik değişmektedir. Üretim yöntemi, üretim esnasında uygulanan kalite kontrolü de mekanik özellikleri etkiler.

Üç değişik FRP türü ve öngerilmeli çeliğe ait gerilme-birim deformasyon eğrileri Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Gerilme-birim deformasyon eğrileri (Taerwe, L. R., 1993)

2.3.2 Basınç Dayanımı

Genelde çekme dayanımı yüksek FRP malzemenin basınç dayanımı da yüksektir. AFRP liflerinin basınç altındaki düşük gerilme düzeyinde doğrusal olmayan davranış gösterdiği durumlar bunun dışındadır. Basınç dayanımı, çekme dayanımının yaklaşık olarak, GFRP için %55, CFRP için %78 ve AFRP için de %20'si kadardır (ACI 440, 2000).

2.3.3 Kesme Dayanımı

Çoğu FRP malzeme, lif katmanları arasında güçlendirilmemiş reçine bulunması durumunda kesmeye karşı dayanıksızdır. Çünkü genellikle tabakalar arasında güçlendirme yapılmamıştır, kesme kuvvetini nispeten zayıf olan polimer matris karşılar. Eksenlerden farklı yönlerde yerleştirilmiş lifler, kesme dayanımını artırır. Bu lifler, örgü şeklinde yerleştirilebileceği gibi, esas liflere enine sarılabilir. Kesme dayanımı, toplam çekme dayanımının 1/5'i civarındadır (Barbieri, E. , 2002).

2.3.4 Aderans

Lifle Kuvvetlendirilmiş Polimer elemanın aderans performansı; tasarımına, üretim metoduna, mekanik özelliklerine ve çevresel koşullara bağlıdır. Kimyasal aderans olarak da bilinen yüzeyel arası yapışma dayanımının aktarabileceği aderans kuvveti, sürtünme dayanımı ve yüzey uyumsuzlukları sebebiyle meydana gelen mekanik takılmalar ile de iletilebilir.

FRP malzemede, aderans kuvvetinin reçineden güçlendirilmiş liflere aktarılması istenir. Aderansı yetersiz bir elemana çekme kuvveti uygulandığında, FRP ile çevrelediği beton arasındaki bağ kopar ve FRP yüzeyinde oluşan deformasyonlar FRP ile beton arasında eğik aktarım kuvvetlerinin doğmasına sebep olur. Güç bileşenlerinden kaynaklanan FRP yüzeyindeki gerilme, FRP ile beton arasındaki aderans gerilmesi olarak gösterilebilir.

3. ÇELİK VE/VEYA LİF TAKVİYELİ POLİMERLER YARDIMIYLA SAĞLANAN YANAL KUŞATMA

3.1 Mevcut Malzeme Modelleri

Lif Takviyeli Polimerler yardımıyla sağlanan yanal kuşatmanın belirlenebilmesi için yapılan deneysel çalışmalarda genellikle uygulamada kolaylık olması açısından dairesel kesitli kolonlar kullanılmıştır. Ancak kuşatılmış beton basınç dayanımını ifade eden analitik bağıntıları dikdörtgen kesitli kolonlara da uygulamak mümkün olmaktadır.

Bir çok model için kuşatılmış beton basınç dayanımı 3.1 bağıntısında gösterilen formdadır:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 1 + k_1 \frac{f_l}{f'_{c0}} \quad (3.1)$$

Bu bağıntıda k_1 ile gösterilen kuşatma etkeninin bulunuşu modelden modele değişmektedir. f_l maksimum kuşatma basıncı olarak bilinir. Kuşatma basıncı, FRP malzemenin özelliklerine ve kesit boyutlarına bağlıdır. f'_{cc} ve f'_{c0} sırasıyla kuşatılmış ve kuşatılmamış beton dayanımını göstermektedir.

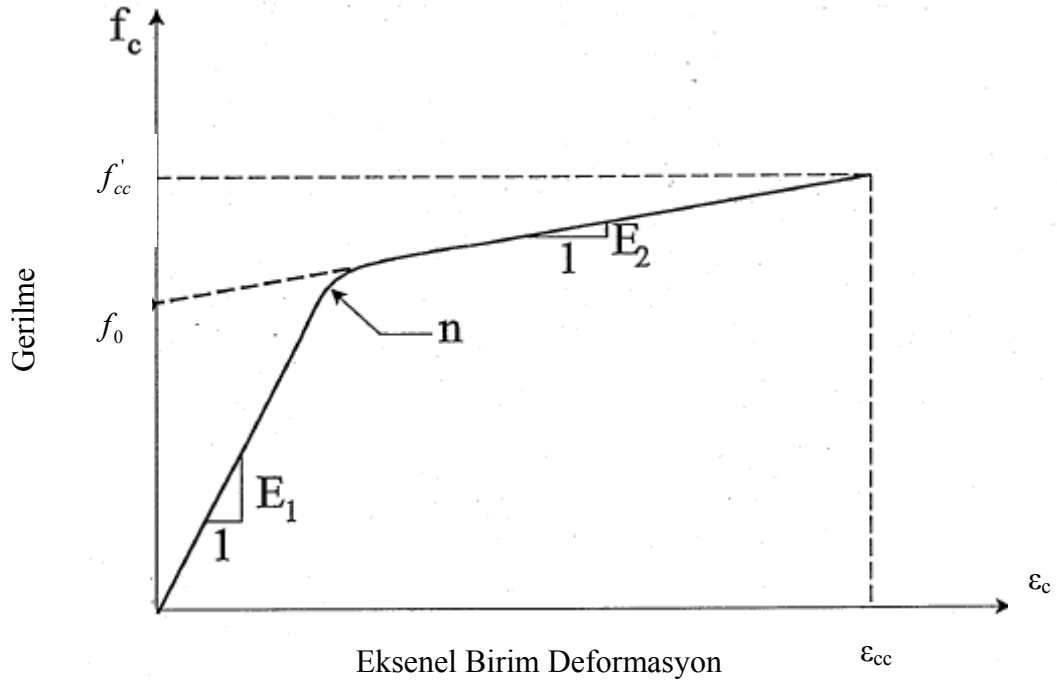
3.1.1 Samaan, Mirmiran ve Shahawy Tarafından Önerilen Model

Samaan, Mirmiran ve Shahawy (1999), Richard ve Abbott'un (1975) kullandığı 4 parametrelili gerilme-birim deformasyon ilişkisini FRP ile kuşatılmış beton davranışı için düzenlemiştir. Bu ilişkiye göre betonun gerilmesi f_c ,

$$f_c = \frac{(E_1 - E_2)\varepsilon_c}{\left[1 + \left(\frac{(E_1 - E_2)\varepsilon_c}{f_0}\right)^{n^*}\right]^{1/n^*}} + E_2\varepsilon_c \quad (3.2)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Burada E_1 ve E_2 gerilme-eksenel birim deformasyon eğrisinin ilk ve ikinci eğimdir. f_0 , E_2 eğimindeki ikinci eğrinin gerilme eksenini kestiği plastik gerilme referans noktasıdır. n^* , eğrilikle ilgili bir parametredir ve genellikle 1.5 alınır. ε_c eksenel birim deformasyondur (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Model parametreleri

E_1 ve E_2

$$E_1 = 3950 \sqrt{f'_{c0}} \quad (3.3)$$

$$E_2 = 245.61 f'_{c0}{}^{0.2} + 1.3456 \frac{E_f n t}{D} \quad (3.4)$$

olarak bulunabilir.

Bağıntılarda geçen f'_{c0} , kuşatılmamış beton basınç dayanımı; E_f , FRP'nin elastisite modülü; n , FRP tabaka sayısı; t , FRP tabaka kalınlığı ve D kolon çapıdır.

Sonuç itibariyle f'_{cc} kuşatılmış beton basınç dayanımı ve ϵ_{cc} maksimum birim deformasyon aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 1 + 6 \frac{f_l^{0.7}}{f'_{c0}} \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_{cc} = \frac{f'_{cc} - f_0}{E_2} \quad (3.6)$$

Şekil 3.1’de görülebilecek, kesişim gerilmesi f_0 ,

$$f_0 = 0.872f'_{c0} + 0.371f_l + 6.258 \quad (3.7)$$

olarak bulunur. f_l , kuşatma basıncının bulunuşu ileriki bölümlerde anlatılacaktır.

3.1.2 Karbhari ve Gao Tarafından Önerilen Model

Karbhari ve Gao (1997) maksimum gerilme dayanımını veren iki model geliştirmiştir. Bu modellerden birisi deneysel olarak türetilmiştir. Diğeri ise malzeme özelliklerine bağlı olarak ortaya çıkartılmış analitik bir modeldir. Deneysel olarak türetilmiş model Model I , analitik olarak türetilmiş model ise Model II olarak gösterilmektedir.

Model I’e göre f'_{cc} şu şekilde yazılmaktadır:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 1 + 2.1 \left(\frac{f_l}{f'_{c0}} \right)^{0.87} \quad (3.8)$$

Model II’ye göre bulunuşu biraz daha karmaşıktır:

$$f'_{cc} = f'_{c0} + 3.1f'_{c0}v_c \left(\frac{2tE_f}{DE_c} \right) + \left(\frac{2f_{frp}t}{D} \right) \quad (3.9)$$

Bu bağıntıda v_c betonun Poisson oranıdır ve genellikle 0.2 alınır. E_f , FRP’nin elastisite modülü; E_c , betonun elastisite modülü; f_{frp} , FRP çekme gerilmesi dayanımı; t , FRP tabaka kalınlığı ve D kuşatılmış kolon çapıdır.

3.1.3 Toutanji Tarafından Önerilen Model

Toutanji modeli (1999) iki farklı bölge ile karakterize edilmiş bir gerilme-birim deformasyon eğrisi ortaya koymaktadır.

İlk bölgede, kuşatılmış betonun davranışı, kuşatılmamış betonun davranışıyla hissedilecek şekilde farklı değildir. Bu bölge için aşağıdaki bağıntı önerilmiştir:

$$f_c = \frac{A.\varepsilon_c}{1 + B.\varepsilon_c + C.\varepsilon_c^2} \quad (3.10)$$

Bu bağıntıda A , B ve C sırasıyla ilk bölgenin eğimi, iki bölgenin kesişim noktasındaki ikinci bölgenin eğimi ve yine iki bölgenin kesişim noktasındaki gerilme ve birim deformasyonla ilgili parametrelerdir. Bu kesişim noktası yanal birim deformasyonun 0.002 olduğu noktaya tekabül etmektedir.

FRP'nin kuşatma etkisini meydana ifade eden ikinci bölgede gerilme-birim deformasyon davranışı,

$$f_c(\varepsilon_l) = f_{c0}' \left(1 + 3.5 \left(\frac{p(\varepsilon_l)}{f_{c0}'} \right)^{0.85} \right) \quad (3.11)$$

şeklinde formüle edilmiştir.

Burada gerilme, ε_l yanal birim deformasyonun bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. P ise kuşatma basıncıdır.

ε_l yanal birim deformasyonuna bağlı değişen bir fonksiyon olarak eksenel birim deformasyon ε_c ,

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{c0} \left[1 + (310.57 \cdot \varepsilon_l + 1.90) \left(\frac{f_c(\varepsilon_l)}{f_{c0}'} - 1 \right) \right] \quad (3.12)$$

şeklindedir.

Burada da eksenel birim deformasyon, ε_l yanal birim deformasyonun bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir.

Bu bağıntılardan gerilme- birim deformasyon eğrisi kolaylıkla belirlenebilir. Bu eğride yanal birim deformasyon ε_l , 0.002 ile malzemenin maksimum deformasyonuna kadar artış gösterir. Bu bağıntılardaki katsayılar deneysel olarak tespit edilmiştir. Yanal birim deformasyonun maksimum deformasyona eşitlenerek ulaşılabilecek maksimum gerilme dayanımı ve birim deformasyon bağıntıları ise,

$$\frac{f_{cc}'}{f_{c0}'} = 1 + 3.5 \left(\frac{f_l}{f_{c0}'} \right)^{0.85} \quad (3.13)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = 1 + \left(310.57 \cdot \frac{f_{fu}}{E_f} + 1.90 \right) \left(\frac{f_{cc}'}{f_{c0}'} - 1 \right) \quad (3.14)$$

şeklindedir. Bu bağıntılarda geçen f_{fu} , FRP dayanımı; ε_{c0} sargısız betonun maksimum birim deformasyonu; E_f ise FRP elastisite modülüdür.

3.1.4 Saafi vd. Tarafından Önerilen Model

Saafi vd.(1999) çelikle kuşatılmış betonun, FRP ile kuşatılmış betondan neden farklı davranmakta olduğu üzerine araştırmalar yapmış ve bu konuya çeşitli açıklamalar getirmiştir. Bu açıklamaların temelinde çelik ve FRP'nin malzeme özelliklerindeki farklılıklar yer almaktadır.

Maksimum gerilme dayanımı ve birim deformasyon için önerilen model ise küçük farklar dışında Toutanji (1999) modeli ile aynıdır.

Saafi tarafından önerilen maksimum gerilme ve birim deformasyon bağıntıları aşağıdaki gibidir:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 1 + 2.2 \left(\frac{f_l}{f'_{c0}} \right)^{0.84} \quad (3.15)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = 1 + \left(537 \cdot \frac{f_{fu}}{E_f} + 2.6 \right) \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} - 1 \right) \quad (3.16)$$

Saafi vd.,(1999) ve Toutanji (1999) tarafından önerilen bu iki model için önerilen maksimum gerilme ve birim deformasyon değerleri, deneysel verilere tam bir uyum sağlayacak şekilde oluşturulmamıştır. Bu değerler, gerilme-birim deformasyon bağıntılarından en elverişsiz durum için sonuçlar elde edilerek oluşturulmuştur.

3.1.5 Spoelstra ve Monti Tarafından Önerilen Model

Mander'in kuşatma modelinden (Mander vd. , 1988) yola çıkılarak 1999 yılında öne sürülen bu modelde maksimum gerilme ve birim deformasyon bağıntıları aşağıdaki gibidir:

$$\frac{f_{cc}}{f'_{c0}} = 0.2 + 3 \sqrt{\frac{f_l}{f'_{c0}}} \quad (3.17)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = 2 + 1.25 \frac{E_{c0}}{f'_{c0}} \varepsilon_{fu} \sqrt{\frac{f_l}{f'_{c0}}} \quad (3.18)$$

Bu bağıntılarda ε_{c0} sargısız betonun maksimum birim deformasyonu, ε_{fu} FRP malzemenin

maksimum birim deformasyonu, E_{c0} , betonun elastisite modülüdür.

3.1.6 Razvi ve Saatçioğlu Tarafından Önerilen Model

Razvi ve Saatçioğlu (1992) ; Richart vd. ,(1928) ve Hognestad'ın (1951) vermiş oldukları bağıntıları geliştirerek, kuşatılmış beton için gerilme-birim deformasyon ilişkisini veren bir model öne sürmüşlerdir.

Razvi ve Saatçioğlu (1992), kuşatma etkisini, ideal elastik malzeme davranışını dikkate alarak teorik olarak incelemişlerdir. Yüksek yanal basınç altında kuşatma etkisinin azaldığını gösterip, maksimum gerilme dayanımı için aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir:

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 1 + 6.7 \frac{f_l^{0.83}}{f'_{c0}} \quad (3.19)$$

Bu bağıntının yanı sıra gerilme-birim deformasyon ilişkisi için daha önce Mander vd.,(1988) ve ondan da önce Balmer (1949) tarafından önerilen bağıntı

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0}(1 + 5K) \quad (3.20)$$

şeklindedir. Bu bağıntıdaki ε_{c0} sargısız betonun maksimum birim deformasyonudur; K ise

$$K = \frac{k_1 f_l}{f'_{c0}} \quad (3.21)$$

bağıntısı ile belirlenebilecektir. Maksimum gerilme dayanımını veren bağıntının içinde de yer alan k_1 kuşatma etki katsayısı,

$$k_1 = 6.7(f_l)^{-0.17} \quad (3.22)$$

şeklinde dikkate alınabilir.

3.1.7 İlki vd. Tarafından Önerilen Model

İlki vd. , (2004) kare, dikdörtgen ve dairesel enkesitli kolonların CRFP ile sarılarak güçlendirilmiş beton numuneler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda yeni bir model geliştirmişlerdir. Modelde kuşatılmış beton basınç dayanımı ve birim deformasyonu ifade eden bağıntılar,

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 1 + 2.4 \left(\frac{f_l}{f'_{c0}} \right)^{1.2} \quad (3.23)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = 1 + 20 \left(\frac{h}{b} \right) \left(\frac{f_l}{f'_{c0}} \right)^{0.5} \quad (3.24)$$

şeklindedir. Bu bağıntılardaki f'_{cc} ve ε_{cc} sırasıyla kuşatılmış beton basınç dayanımını ve eksenel birim deformasyonunu; f'_{c0} ve ε_{c0} kuşatılmamış betonun basınç dayanımını ve birim deformasyonunu; f_l en büyük efektif yanal gerilme değerini; b ve h sırasıyla kesit genişliği ve derinliğini ifade etmektedir.

3.1.8 Theriault ve Neale Tarafından Önerilen Model

Daha önce anlatılmış modellerden farklı olarak, Theriault ve Neale (2000) tarafından önerilen bu modelde eksenel yük taşıma kapasitesini veren bir bağıntı da önerilmiştir. Geliştirilen bağıntı aşağıdaki gibidir:

$$P_{rc} = \phi_c \alpha_1 f'_{cc} (A_g - A_{st}) + \phi_s f_y A_{st} \quad (3.25)$$

Bu bağıntıdaki P_{rc} , eksenel yük taşıma kapasitesi; ϕ_c ve ϕ_s sırasıyla beton ve çelik için direnç faktörleridir. Bu iki faktörün laboratuvar şartlarında 1 alınması önerilir.

$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015 f'_{c0}$ 'a eşittir. A_g kesit alanı, A_{st} toplam boyuna donatı alanı, f_y ise donatının akma dayanımıdır. Kuşatılmış kolon dayanımı f'_{cc} ise:

$$f'_{cc} = f'_{c0} (1 + \alpha_{pc} \omega_w) \quad (3.26)$$

olarak yazılabilir. Bu bağıntıdaki α_{pc} performans katsayısıdır ve laboratuvar koşullarında 1 alınır. f'_{c0} kuşatılmamış kolon dayanımı, ω_w ise FRP kuşatmasından kaynaklanan kuşatma gerilmesi oranıdır. Bu oran dairesel ve dikdörtgen enkesitli kolonlar için farklı şekilde bulunur:

$$\omega_w = 2. f_{lfrp} / \phi_c f'_{c0} \quad (\text{Dairesel kolonlar}) \quad (3.27)$$

$$\omega_w = f_{lfrp} / \phi_c f'_{c0} \quad (\text{Dikdörtgen kolonlar}) \quad (3.28)$$

f_{lfrp} , FRP kuşatmasından kaynaklanan kuşatma basıncıdır. Kuşatma gerilmesi oranındaki

gibi, dairesel ve dikdörtgen enkesitli kolonlar için farklı şekilde bulunur:

$$f_{lf_{frp}} = 2.N_b \phi_{frp} f_{frpu} t_{frp} / D_g \quad (\text{Dairesel kolonlar}) \quad (3.29)$$

$$f_{lf_{frp}} = 2.N_b \phi_{frp} E_{frp} \varepsilon_{frp} t_{frp} (b + h) / (bh) \quad (\text{Dikdörtgen kolonlar}) \quad (3.30)$$

ϕ_{frp} , FRP için direnç katsayısıdır ve laboratuvar koşullarında 1 alınır. N_b , FRP katman sayısı; f_{frpu} , E_{frp} , ε_{frp} sırasıyla FRP'nin çekme dayanımı, elastisite modülü ve birim deformasyonudur. t_{frp} FRP kalınlığı; b ve h dikdörtgen kesit boyutlarıdır. D_g ise dairesel kesit çapıdır.

3.2 Malzeme Modellerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde , Bölüm 3.1'de ayrıntılı olarak verilmiş olan ve araştırmacılar tarafından önerilmiş malzeme modellerinin literatürde kabul görmüş bir deneysel çalışmanın (Peker, Ö., 2005) verileri dikkate alınarak uygulamaları yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmak amacıyla Çizelge 3.7, Çizelge 3.8, Çizelge 3.9, Çizelge 3.10, Çizelge 3.11 ve Çizelge 3.12 de verilmiştir.

2005 yılının Mayıs ayında Doç. Dr. Alper İLKİ danışmanlığında İnşaat Mühendisi Önder PEKER tarafından tamamlanmış “Düşük Dayanımlı Betonarme Elemanların CFRP İle Güçlendirilmesi” isimli İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Tez Çalışması kapsamında yapılan deneyler sonucunda çeşitli numuneler için elde edilmiş kuşatılmış beton basınç dayanımı değerlerinden faydalanılmıştır.

Anılan çalışmada dairesel, kare ve dikdörtgen kesitli kolonlar kullanılmıştır. Çizelge 3.1'de uygulanan güçlendirme yöntemleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.1 Çalışma kapsamında uygulanan güçlendirme şekilleri (Peker, Ö. , 2005)

Kesit	Numune Sayısı		Güçlendirme
Daire	10	2	Hasar Verilip
		2	Farklı Sargı Şekilleri İle
		6	Doğrudan
Kare	12	2	Farklı Köşe Yarıçapı İle Üretilip
		4	Etkinlik Arttırıcı Detay İle
		6	Doğrudan
Dikdörtgen	12	2	Hasar Verilip
		2	Farklı Sargı Şekilleri İle
		2	Etkinlik Arttırıcı Detay İle
		6	Doğrudan

Peker'in (2005) çalışmasında kullandığı daire, kare ve dikdörtgen kesitli kolonlar arasından seçilen numunelerin özellikleri Çizelge 3.2'de gösterilmiştir. Numuneler isimlendirilirken beton dayanımı, enkesit şekli, kenar uzunlukları oranı, CFRP sargı sayısı, köşe yarıçapı , eğer varsa ek değişken (farklı sargı şekilleri) gibi özelliklerin belirgin olmasına ve numune adından okunabilmesine dikkat edilmiştir. Örneğin; LSR-R-2-3-40a-H numunesinde LSR, düşük beton dayanımını (Low Strength) ve numunenin donatıya sahip olduğunu (Reinforced), R, enkesit şeklini (Rectangular), 2, kenar uzunlukları oranını, 3, CFRP sargı sayısını, 40, köşe yarıçapını, a, iki özdeş numuneden biri olduğunu, H ise etriye tipi (Hoop) sargı yapıldığını göstermektedir. Çizelge 3.2'de f'_c , b, h ve l sırasıyla 180 günlük standart beton basınç dayanımı, kesit eni, kesit boyu ve numunenin yüksekliğidir.

Çizelge 3.2 Seçilen numunelerin genel özellikleri

No	Numune İsmi	f'_c 180 gün (MPa)	Numune b x h x l (mm)	Boyuna Donatı	Enine Donatı	Polimer Lif Sargı Sayısı
1	LSR-R-1-1-40a	15.92	250x250x500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	1
2	LSR-R-1-1-40b	15.92	250x250x500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	1
3	LSR-R-1-3-10a	15.92	250x250x500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	3
4	LSR-R-1-3-10b	15.92	250x250x500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	3
5	LSR-R-1-3-20a	15.92	250x250x500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	3
6	LSR-R-1-3-20b	15.92	250x250x500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	3
7	LSR-R-1-3-40a	15.92	250x250x500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	3
8	LSR-R-1-3-40b	15.92	250x250x500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	3
9	LSR-R-1-5-40a	15.92	250x250x500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	5
10	LSR-R-1-5-40b	15.92	250x250x500	4 ϕ 14	ϕ 8/200	5
11	LSR-R-2-1-40a	15.92	150x300x500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	1
12	LSR-R-2-1-40b	15.92	150x300x500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	1
13	LSR-R-2-3-40a	15.92	150x300x500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	3
14	LSR-R-2-3-40b	15.92	150x300x500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	3
15	LSR-R-2-5-40a	15.92	150x300x500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	5
16	LSR-R-2-5-40b	15.92	150x300x500	4 ϕ 12	ϕ 8/175	5

Çizelge 3.2’de gösterilen numunelerin genel özelliği, Peker’in (2005) çalışmasında Etkinlik Arttırıcı Detay ya da Ön hasar gibi ek değişkenlere tabi tutulmamış olmaları, doğrudan

güçlendirilmiş olmalarıdır. 3,4,5 ve 6 nolu numuneler dışında tüm numunelerin köşe yarıçapı da 40 mm'dir.

Çalışmada deney sonuçları her numune için tek tek incelenmiş ve kısa birer rapor olarak Çizelge 3.3'de gösterildiği şekilde sunulmuştur. Çizelge 3.3'de 1 kat CFRP ile sargılanarak güçlendirilmiş, boyutlarının oranı 1 (kare numune) ve köşe yarıçapı 40 mm olan LSR-R-1-1-40a ve LSR-R-1-1-40b numunelerinin deney sonrası özet bilgileri gösterilmiştir. İki özdeş numuneden Tekrarlı artan yükler altında denenen "b" numunesi, monoton artan yükler altında denenen "a" numunesi ile benzer ancak biraz daha sünek davranış göstermiştir.

Çizelge 3.3 LSR-R-1-1-40a ve LSR-R-1-1-40b deney sonrası bilgileri (Peker, Ö. , 2005)

Numune	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\varepsilon_{\max}$		Düşey Yırtık	Yatay Yırtık
		Boyuna	Enine		
LSR-R-1-1-40a	20.58	0.017	0.011	203 mm tek parça	203 mm genişliğinde tek parça
LSR-R-1-1-40b	20.33	0.025	0.013	225 mm çok parçalı	20-155 mm arası değişen 2-3 parça

Çizelge 3.4’de Peker’in (2005) çalışmasından seçilen numunelerin toplu deney sonuçları listelenmiştir.

Çizelge 3.4 Deney sonuçları

No	Numune İsmi	f'_{c0} (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ε_{cc}	Kare	Dikdörtgen		$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}}$	$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}}$	D.A. (%)	Ş.A. (%)
					ε_{ch}	ε_{ch} kısa	ε_{ch} uzun				
1	LSR-R-1-1-40a	13.53	20.58	0.017	0.011	-	-	1.3	8.5	52	750
2	LSR-R-1-1-40b	13.53	20.33	0.025	0.013	-	-	1.3	12.5	50	1150
3	LSR-R-1-3-10a	13.53	24.74	0.049	0.009	-	-	1.6	24.5	83	2350
4	LSR-R-1-3-10b	13.53	26.32	0.078	0.011	-	-	1.7	39.0	95	3800
5	LSR-R-1-3-20a	13.53	29.25	0.055	0.014	-	-	1.8	27.5	116	1650
6	LSR-R-1-3-20b	13.53	30.83	0.072	0.010	-	-	1.9	36.0	128	3500
7	LSR-R-1-3-40a	13.53	37.36	0.055	0.016	-	-	2.3	27.5	176	2650
8	LSR-R-1-3-40b	13.53	40.92	0.066	0.014	-	-	2.6	33.0	202	3200
9	LSR-R-1-5-40a	13.53	51.65	0.069	0.015	-	-	3.2	34.5	282	3350
10	LSR-R-1-5-40b	13.53	47.77	0.085	0.012	-	-	3.0	42.5	253	4150
11	LSR-R-2-1-40a	13.53	18.38	0.018	-	0.007	-	1.2	9.0	36	800
12	LSR-R-2-1-40b	13.53	11.70	0.017	-	0.009	0.010	0.7	8.5	-14	750
13	LSR-R-2-3-40a	13.53	34.91	0.062	-	0.009	-	2.2	31.0	158	3000
14	LSR-R-2-3-40b	13.53	26.58	0.065	-	0.015	0.014	1.7	32.5	96	3150
15	LSR-R-2-5-40a	13.53	50.81	0.086	-	0.009	0.017	3.2	43.0	276	4200
16	LSR-R-2-5-40b	13.53	35.98	0.100	-	0.011	0.015	2.3	50.0	166	4900

Bu Çizelgede f'_{c0} , f'_{cc} , ε_{cc} ve ε_{ch} sırasıyla numunenin deney günündeki sargısız beton dayanımını ($f'_{c0} = 0.85f'_c$), sargılanmış dayanımı, 500 mm ölçüm boyundaki eksenel şekil değiştirmesini, 60 mm ölçüm boyundaki enine şekil değiştirmesini (dikdörtgen kesitli numuneler için kısa ve uzun kenar) göstermektedir. f'_{cc}/f'_{c0} değeri dayanımdaki artışı, $\varepsilon_{cc}/\varepsilon_{c0}$ ise şekil değiştirme kapasitesindeki artışı göstermektedir. Tüm numuneler için sargılanmış durumdaki eksenel şekil değiştirme değeri ε_{c0} , 0.002 kabul edilmiştir. D.A. Dayanım artışı, Ş.A. Şekil değiştirme kapasitesi artışı anlamındadır.

Peker'in (2005) çalışmasında İlki (2004)'nin önerdiği model kullanılarak dayanımlar önceden tahmin edilmeye çalışılmıştır. Deneysel sonuçlarla analitik sonuçlar karşılaştırılarak daire, kare ve dikdörtgen enkesitli CFRP tabakalarla enine doğrultuda sargılanarak güçlendirilmiş beton numuneler üzerinde yapılan deneyler sonucu üretilmiş İlki (2004) tarafından önerilmiş olan modelin verdiği sonuçlar incelenmiştir.

Karşılaştırmalarda etriyenin kuşatma etkisi için Mander vd. (1988) tarafından önerilen (3.31) ve (3.32) ampirik bağıntıları kullanılmıştır. FRP'nin sağladığı kuşatma etkisi ile etriyenin sağladığı kuşatma etkisi (3.33) ve (3.34) bağıntılarıyla birleştirilerek nihai dayanıma ulaşılmaktadır.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 2,254 \sqrt{1 + 7,94 \frac{f'_1}{f'_{c0}}} - 2 \cdot \frac{f'_1}{f'_{c0}} - 1,254 \quad (3.31)$$

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = 1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} - 1 \right) \quad (3.32)$$

$$\left[\frac{f'_{cc} - f'_{c0}}{f'_{c0}} \right]_{TOPLAM} = \left[\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} - 1 \right]_{FRP} + \left[\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} - 1 \right]_{ETR} \quad (3.33)$$

$$\left[\frac{\varepsilon_{cc} - \varepsilon_{c0}}{\varepsilon_{c0}} \right]_{TOPLAM} = \left[\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} - 1 \right]_{FRP} + \left[\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} - 1 \right]_{ETR} \quad (3.34)$$

Tüm modellerde etriye'nin kuşatma basıncına katkısı için Mander'in (1988) önerdiği (3.31) ve (3.32) bağıntıları kullanılmıştır.

3.2.1 Etriye Katkısının Hesaplanması

Peker'in (2005) deneylerinde kullandığı kare ve dikdörtgen kesitli tüm numunelerde etriye dizilişleri iki şekildedir; kare numuneler için $\phi 8/200$ ve dikdörtgen numuneler için $\phi 8/175$. Bu durumda etriyeden kaynaklanan kuşatma basıncı katkısı da iki değer olarak bulunmaktadır. Bu değer kare numuneler için 0.177 MPa, dikdörtgen numuneler için ise 0.240 MPa olarak bulunmuştur. (Peker, Ö. , 2005)

Bu durumda (3.31) bağıntısındaki f'_l yerine bulunan bu değerler yazılarak. Bulunan f'_{cc} / f'_{c0} değeri, daha sonra (3.33) ve (3.32) bağıntısında yerine yazılarak sonuç dayanım ve şekil değiştirme oranları bulunabilir. Çizelge 3.5'de tüm numuneler için bulunan f'_{cc} / f'_{c0} ve $\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{c0}$ değerleri listelenmiştir. Bu değerler, Mander'in önerdiği (3.31) ve (3.32) bağıntılarıyla bulunmuş olup yalnızca etriye katkısını içermektedir.

Bir numune için örnek olarak göstermek gerekirse:

LSR-R-1-1-40a için, $f'_l=0.177$ MPa olduğundan (3.31) bağıntısında yerine koyularak

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} = 2,254 \sqrt{1 + 7,94 \times \frac{0.177}{13.53}} - 2 \times \frac{0.177}{13.53} - 1,254 = 1.08801$$

bulunur.

Aynı numune için $\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{c0}$ değeri (3.32) bağıntısından

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = 1 + 5(1.08801 - 1) = 1.4405$$

olarak elde edilir.

Çizelge 3.5 Etriye katkısı

No	Numune İsmi	f'_{c0} (MPa)	ε_{c0}	f'_1 (MPa)	f'_{cc} / f'_{c0}	$\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{c0}$
1	LSR-R-1-1-40a	13.53	0.002	0.177	1.08801	1.4405
2	LSR-R-1-1-40b	13.53	0.002	0.177	1.08801	1.4405
3	LSR-R-1-3-10a	13.53	0.002	0.177	1.08801	1.4405
4	LSR-R-1-3-10b	13.53	0.002	0.177	1.08801	1.4405
5	LSR-R-1-3-20a	13.53	0.002	0.177	1.08801	1.4405
6	LSR-R-1-3-20b	13.53	0.002	0.177	1.08801	1.4405
7	LSR-R-1-3-40a	13.53	0.002	0.177	1.08801	1.4405
8	LSR-R-1-3-40b	13.53	0.002	0.177	1.08801	1.4405
9	LSR-R-1-5-40a	13.53	0.002	0.177	1.08801	1.4405
10	LSR-R-1-5-40b	13.53	0.002	0.177	1.08801	1.4405
11	LSR-R-2-1-40a	13.53	0.002	0.240	1.11803	1.59015
12	LSR-R-2-1-40b	13.53	0.002	0.240	1.11803	1.59015
13	LSR-R-2-3-40a	13.53	0.002	0.240	1.11803	1.59015
14	LSR-R-2-3-40b	13.53	0.002	0.240	1.11803	1.59015
15	LSR-R-2-5-40a	13.53	0.002	0.240	1.11803	1.59015
16	LSR-R-2-5-40b	13.53	0.002	0.240	1.11803	1.59015

3.2.2 FRP Katkısının Hesaplanması

FRP'den kaynaklanan dayanım artışı değerlerinin hesaplanması için Bölüm 3.1'de açıklanan modeller kullanılacaktır. FRP kuşatma basıncı değerinin hesaplanması için İlki'nin (2004) önerdiği (3.35) bağıntısına ek olarak (4.17) bağıntısı da kullanılabilir.

$$f_l' = \frac{\kappa_a \rho_f \varepsilon_{h, rup} E_{frp}}{2} \quad (3.35)$$

Bu bağıntıda f_l' , en büyük efektif yanal gerilme değerini, κ_a kesit şekline bağlı etki faktörünü, E_{frp} ve ρ_f sırasıyla FRP tabakasının elastisite modülünü ve FRP tabakasıyla oluşturulan sargı kesit alanının beton kesit alanına oranını ifade etmektedir.

$\varepsilon_{h, rup}$ beton elemanlara sarılmış FRP tabakasının en büyük çekme dayanımını ifade etmektedir. Bu değer FRP tabakasının şekil değiştirme değerinin %70i olarak kabul edilir.

$$\varepsilon_{h, rup} = 0.7 \times \varepsilon_{frp} \quad (3.36)$$

Örnek olarak , LSR-R-1-1-40a için Peker'in (2005) çalışmasında f_l' değeri 2.103 MPa olarak hesaplanmıştır.

İlki vd (2004) Modeline göre (3.23) bağıntısında bu f_l' değeri yerine koyularak

$$\frac{f_{cc}'}{f_{c0}'} = 1 + 2.4 \left(\frac{2.103}{13.53} \right)^{1.2} = 1.2571$$

bulunur.

(3.24) bağıntısı yardımıyla $\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{c0}$ değeri de aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{\varepsilon_{c0}} = 1 + 20 \left(\frac{250}{250} \right) \left(\frac{2.103}{13.53} \right)^{0.5} = 8.885$$

Bölüm 3.1'de anlatılan ilgili bağıntılarda f_l' değeri yerine koyularak her model için FRP'den kaynaklanan kuşatma basıncı katkısı hesaplanır. Tüm numuneler için bulunan f_l' değerleri Çizelge 3.6' da , her model için hesaplanmış FRP'den kaynaklanan f_{cc}' / f_{c0}' ve $\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{c0}$ değerleri ise Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.6 f'_l değerleri

No	Numune İsmi	f'_{c0} (MPa)	ε_{c0}	f'_1 (MPa)
1	LSR-R-1-1-40a	13.53	0.002	2.103
2	LSR-R-1-1-40b	13.53	0.002	2.103
3	LSR-R-1-3-10a	13.53	0.002	4.058
4	LSR-R-1-3-10b	13.53	0.002	4.058
5	LSR-R-1-3-20a	13.53	0.002	4.917
6	LSR-R-1-3-20b	13.53	0.002	4.917
7	LSR-R-1-3-40a	13.53	0.002	6.310
8	LSR-R-1-3-40b	13.53	0.002	6.310
9	LSR-R-1-5-40a	13.53	0.002	10.516
10	LSR-R-1-5-40b	13.53	0.002	10.516
11	LSR-R-2-1-40a	13.53	0.002	2.250
12	LSR-R-2-1-40b	13.53	0.002	2.250
13	LSR-R-2-3-40a	13.53	0.002	6.750
14	LSR-R-2-3-40b	13.53	0.002	6.750
15	LSR-R-2-5-40a	13.53	0.002	11.250
16	LSR-R-2-5-40b	13.53	0.002	11.250

Çizelge 3.7 FRP'den kaynaklanan f'_{cc} / f'_{c0} değerleri

No	Numune	f'_{cc} / f'_{c0}						
		Samaan, Mirmiran ve Shahawy	Karbhari ve Gao	Toutanji	Saafi vd.	Spoelstra ve Monti	Razvi ve Saatçioğlu	İlki vd.
1	LSR-R-1-1-40a	1.7462	1.4158	1.7192	1.461	1.3827	1.9042	1.257
2	LSR-R-1-1-40b	1.7462	1.4158	1.7192	1.461	1.3827	1.9042	1.257
3	LSR-R-1-3-10a	2.1821	1.7366	2.2576	1.8	1.843	2.54	1.566
4	LSR-R-1-3-10b	2.1821	1.7366	2.2576	1.8	1.843	2.54	1.566
5	LSR-R-1-3-20a	2.3522	1.8705	2.4805	1.94	2.0085	2.7991	1.712
6	LSR-R-1-3-20b	2.3522	1.8705	2.4805	1.94	2.0085	2.7991	1.712
7	LSR-R-1-3-40a	2.6102	2.0815	2.8302	2.159	2.2487	3.2019	1.961
8	LSR-R-1-3-40b	2.6102	2.0815	2.8302	2.159	2.2487	3.2019	1.961
9	LSR-R-1-5-40a	3.3022	2.6866	3.8251	2.78	2.8448	4.3302	2.774
10	LSR-R-1-5-40b	3.3022	2.6866	3.8251	2.78	2.8448	4.3302	2.774
11	LSR-R-2-1-40a	1.7823	1.441	1.7618	1.487	1.4233	1.9551	1.279
12	LSR-R-2-1-40b	1.7823	1.441	1.7618	1.487	1.4233	1.9551	1.279
13	LSR-R-2-3-40a	2.688	2.1468	2.9381	2.227	2.319	3.3255	2.042
14	LSR-R-2-3-40b	2.688	2.1468	2.9381	2.227	2.319	3.3255	2.042
15	LSR-R-2-5-40a	3.4136	2.7885	3.9919	2.884	2.9355	4.5173	2.923
16	LSR-R-2-5-40b	3.4136	2.7885	3.9919	2.884	2.9355	4.5173	2.923

Çizelge 3.8 FRP'den kaynaklanan $\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{c0}$ değerleri

No	Numune	$\varepsilon_{cc} / \varepsilon_{c0}$						
		Samaan, Mirmiran ve Shahawy	Karbhari ve Gao	Toutanji	Saafi vd.	Spoelstra ve Monti	Razvi ve Saatçioğlu	İlki vd.
1	LSR-R-1-1-40a	4.7309	3.0786	2.8727	2.7592	2.5583	5.5889	8.8850
2	LSR-R-1-1-40b	4.7309	3.0786	2.8727	2.7592	2.5583	5.5889	8.8850
3	LSR-R-1-3-10a	6.9108	4.6825	4.2745	4.0528	2.7756	8.9186	11.9531
4	LSR-R-1-3-10b	6.9108	4.6825	4.2745	4.0528	2.7756	8.9186	11.9531
5	LSR-R-1-3-20a	7.7611	5.3520	4.8549	4.5870	2.8538	10.2867	13.0568
6	LSR-R-1-3-20b	7.7611	5.3520	4.8549	4.5870	2.8538	10.2867	13.0568
7	LSR-R-1-3-40a	9.0509	6.4067	5.7655	5.4227	2.9672	12.4229	14.6583
8	LSR-R-1-3-40b	9.0509	6.4067	5.7655	5.4227	2.9672	12.4229	14.6583
9	LSR-R-1-5-40a	12.5112	9.4318	8.3560	7.7925	3.2486	18.4537	18.6322
10	LSR-R-1-5-40b	12.5112	9.4318	8.3560	7.7925	3.2486	18.4537	18.6322
11	LSR-R-2-1-40a	4.9116	3.2045	2.9836	2.8584	2.5775	5.8536	17.3118
12	LSR-R-2-1-40b	4.9116	3.2045	2.9836	2.8584	2.5775	5.8536	17.3118
13	LSR-R-2-3-40a	9.4399	6.7333	6.0464	5.6822	3.0003	13.0802	29.2529
14	LSR-R-2-3-40b	9.4399	6.7333	6.0464	5.6822	3.0003	13.0802	29.2529
15	LSR-R-2-5-40a	13.0679	9.9415	8.7903	8.1893	3.2914	19.4590	37.4743
16	LSR-R-2-5-40b	13.0679	9.9415	8.7903	8.1893	3.2914	19.4590	37.4743

Peker'in (2005) çalışmasında yapılan bulunan deneysel sonuçların karşılaştırılması için tüm malzeme modelleriyle f'_{cc} ve ε_{cc} değerleri analitik olarak elde edilmiştir. (3.33) ve (3.34) bağıntılarıyla toplanan bu analitik sonuçlar, Çizelge 3.9 ve Çizelge 3.10'da deneysel sonuçlarla birlikte listelenmiştir. Özdeş numuneler için bulunmuş analitik sonuçlar değişmediğinden, karşılaştırmalarda bu numuneler için elde edilmiş deney sonuçlarının ortalaması kullanılacaktır. Çizelge 3.9 ve 3.10'un ilk sütununda deney sonuçlarının ortalaması alınan numunelerin numaraları belirtilmiştir.

Çizelge 3.9 f'_{cc} değerlerinin karşılaştırılması

No	Numune	f'_{cc} (MPa)							
		Deneysel	Samaan, Mirmiran ve Shahawy	Karbhari ve Gao	Toutanji	Saafi vd.	Spoelstra ve Monti	Razvi ve Saatçioğlu	İlki vd.
1-2	LSR-R-1-1-40	20.4	24.816	20.346	24.452	20.95	19.899	26.955	18.2
3-4	LSR-R-1-3-10	25.5	30.715	24.687	31.736	25.55	26.126	35.556	22.38
5-6	LSR-R-1-3-20	30	33.016	26.499	34.752	27.44	28.366	39.063	24.36
7-8	LSR-R-1-3-40	39.1	36.506	29.353	39.483	30.4	31.616	44.513	27.72
9-10	LSR-R-1-5-40	49.7	45.87	37.54	52.945	38.81	39.681	59.779	38.72
11-12	LSR-R-2-1-40	15	25.712	21.093	25.434	21.72	20.855	28.049	18.9
13-14	LSR-R-2-3-40	30.7	37.965	30.643	41.349	31.72	32.973	46.591	29.22
15-16	LSR-R-2-5-40	43.4	47.783	39.326	55.607	40.62	41.315	62.716	41.15

Çizelge 3.10 ε_{cc} değerlerinin karşılaştırılması

No	Numune	ε_{cc}							
		Deneysel	Samaan, Mirmiran ve Shahawy	Karbhari ve Gao	Toutanji	Saafi vd.	Spoelstra ve Monti	Razvi ve Saatçioğlu	İlki vd.
1-2	LSR-R-1-1-40	0.021	0.0103	0.007	0.0066	0.0064	0.006	0.0121	0.0187
3-4	LSR-R-1-3-10	0.064	0.0147	0.0102	0.0094	0.009	0.0064	0.0187	0.0248
5-6	LSR-R-1-3-20	0.064	0.0164	0.0116	0.0106	0.01	0.0066	0.0215	0.0267
7-8	LSR-R-1-3-40	0.061	0.019	0.0137	0.0124	0.0117	0.0068	0.0257	0.0302
9-10	LSR-R-1-5-40	0.077	0.0259	0.0197	0.0176	0.0165	0.0074	0.0378	0.0381
11-12	LSR-R-2-1-40	0.018	0.011	0.0076	0.0071	0.0069	0.0063	0.0129	0.0358
13-14	LSR-R-2-3-40	0.064	0.02	0.0146	0.0133	0.0125	0.0072	0.0273	0.0597
15-16	LSR-R-2-5-40	0.093	0.0273	0.0211	0.0188	0.0176	0.0078	0.04	0.0761

Deneysel sonuçlarla analitik sonuçlar karşılaştırıldığında f'_{cc} değerleri için yakın sonuçlar elde edilirken ε_{cc} değeri tahminleri başarılı değildir. İncelenen modeller arasında deneysel sonuçlarla en yakın ε_{cc} değerlerini İlki (2004) modeli verirken, f'_{cc} değerleri için bir model net olarak öne çıkmış değildir. Her numune için $f'_{cc_{deney}} / f'_{cc_{teorik}}$ ve $\varepsilon_{cc_{deney}} / \varepsilon_{cc_{teorik}}$ oranlarının listelendiği Çizelge 3.11 ve Çizelge 3.12'de modellerin performansı incelenebilir. Bu Çizelgelerde modellerin ortalama $f'_{cc_{deney}} / f'_{cc_{teorik}}$ ve $\varepsilon_{cc_{deney}} / \varepsilon_{cc_{teorik}}$ değerleri de verilmiştir.

Çizelge 3.11 $f'_{cc_{deney}} / f'_{cc_{teorik}}$ değerleri

No	Numune	$f'_{cc_{deney}} / f'_{cc_{teorik}}$						
		Samaan, Mirmiran ve Shahawy	Karbhari ve Gao	Toutanji	Saafi vd.	Spoelstra ve Monti	Razvi ve Saatçioğlu	İlki vd.
1-2	LSR-R-1-1-40	0.822	1.003	0.834	0.974	1.025	0.757	1.121
3-4	LSR-R-1-3-10	0.830	1.033	0.804	0.998	0.976	0.717	1.139
5-6	LSR-R-1-3-20	0.909	1.132	0.863	1.093	1.058	0.768	1.232
7-8	LSR-R-1-3-40	1.071	1.332	0.990	1.287	1.237	0.878	1.411
9-10	LSR-R-1-5-40	1.083	1.324	0.939	1.281	1.252	0.831	1.284
11-12	LSR-R-2-1-40	0.583	0.711	0.590	0.691	0.719	0.535	0.794
13-14	LSR-R-2-3-40	0.809	1.002	0.742	0.968	0.931	0.659	1.051
15-16	LSR-R-2-5-40	0.908	1.104	0.780	1.068	1.050	0.692	1.055
Ortalama		0.877	1.080	0.818	1.045	1.031	0.730	1.136

Analitik yöntemlerle bulunan kuşatılmış kesit dayanımı değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasının ardından, tüm modeller için kendi içinde meydana gelmiş tutarlılığı bir tek LSR-R-2-1-40 numunesi bozmaktadır. Bu numune için bulunan değerler, deneysel sonuca göre yüksek çıkmıştır.

Genele bakıldığında , en yakın sonuçları Saafi vd (1999) , Spoelstra ve Monti (1999) ile Karbhari ve Gao (1997) Modelleri vermektedir.

Çizelge 3.12 $\varepsilon_{cc_{deney}} / \varepsilon_{cc_{teorik}}$ değerleri

No	Numune	$\varepsilon_{cc_{deney}} / \varepsilon_{cc_{teorik}}$						
		Samaan, Mirmiran ve Shahawy	Karbhari ve Gao	Toutanji	Saafi vd.	Spoelstra ve Monti	Razvi ve Saatçioğlu	İlki vd.
1-2	LSR-R-1-1-40	2.039	3	3.182	3.281	3.5	1.735	1.123
3-4	LSR-R-1-3-10	4.354	6.274	6.809	7.111	10	3.422	2.581
5-6	LSR-R-1-3-20	3.902	5.517	6.038	6.4	9.697	2.977	2.397
7-8	LSR-R-1-3-40	3.211	4.453	4.919	5.214	8.971	2.374	2.020
9-10	LSR-R-1-5-40	2.973	3.909	4.375	4.667	10.40	2.037	2.021
11-12	LSR-R-2-1-40	1.636	2.368	2.535	2.609	2.857	1.395	0.503
13-14	LSR-R-2-3-40	3.2	4.384	4.812	5.12	8.889	2.344	1.072
15-16	LSR-R-2-5-40	3.407	4.408	4.947	5.284	11.92	2.325	1.222
Ortalama		3.090	4.289	4.702	4.961	8.279	2.326	1.617

Kuşatılmış kesit dayanım değerlerinde deneysel sonuca yaklaşık sonuçlar veren modeller, şekil değiştirme konusunda aynı başarıyı gösterememiştir. Çizelge 3.12’den görülebileceği gibi, şekil değiştirmenin tahmini konusunda İlki vd (2004), Razvi ve Saatçioğlu (1992) ile Samaan, Mirmiran ve Shahawy (1999) modelleri diğerlerine göre daha iyi sonuç vermiştir. Fakat bu modellerin sonuçları da yeterli düzeyde iyi değildir. Bu durum, Peker’in (2005) çalışmasının düşük dayanımlı beton için yapılmış olması ve modellerin uyum sağlayamamış olmaları ile açıklanabilir.

4. EKSENEL YÜK TAŞIMA KAPASİTESİ

Bu bölümde, FRP ile kuşatılmış dikdörtgen kesitli betonarme kolonların eksenel yük taşıma kapasitelerinin bulunmasıyla ilgili olarak yapılmış iki çalışma kullanılmıştır. Theriault ve Neale (2000) ile, M. Maalej, S. Tanwongsva ve P. Paramasivam (2002) tarafından yapılan bu çalışmalar, birer eksenel yük taşıma kapasitesi bağıntısı ortaya koymuştur.

Bu bağıntıların ortaya konmasının ardından, literatürde yer alan bazı deneysel çalışmalar incelenmiştir. Esfahani, M.R., Kianoush M.R., (2004) ile Feng, P., Lu, X.Z. ve Ye, L.P., (2002) tarafından yapılan bu çalışmalarda, FRP ile kuşatılmış dikdörtgen kesitli betonarme numunelerin eksenel yük taşıma kapasiteleri araştırılmıştır. Deneysel olarak bulunan sonuçlar, ilk kısımda anlatılan bağıntılar yardımıyla bulunan analitik sonuçlarla karşılaştırılmış, ve neticeleri verilmiştir.

Son olarak, uygun bulunan analitik bağıntı ile teorik olarak üretilmiş belirli miktardaki sistem kullanılarak Yapay Sinir Ağları ile bir çözüm modellenmiştir. Bu çözüm kullanılarak, hangi parametrenin sonuca ne kadar etki ettiği araştırılmış, çeşitli parametreler eksiltilerek eksenel yük taşıma kapasitesine en azı veri ile ulaşılmaya çalışılmıştır.

4.1 Önerilen Bağıntılar

Theriault ve Neale (2000) ile M. Maalej, S. Tanwongsva ve P. Paramasivam (2002) tarafından önerilen bağıntılarda ulaşılmak istenen, mümkün olduğu kadar basit işlemlerle, eksenel yük taşıma kapasitesinin bulunmasıdır. Theriault ve Neale (2000) , detaylı bir çözüm yöntemi getirmeden, işlemleri basite indirgemiş, öbür yanda M. Maalej, S. Tanwongsva ve P. Paramasivam (2002), tüm parametrelerin hesaba katılmasını sağlamıştır.

Kuşatılmış kolon basınç dayanım değerlerinin bulunmasının incelendiği 3. Bölümde . Theriault ve Neale (2000) bağıntısı anlatılmış, o sebepten burada ilgili bölüme atıflarda bulunularak geçilmiştir. M. Maalej, S. Tanwongsva ve P. Paramasivam (2002) tarafından önerilen bağıntı ise, detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

4.1.1 Theriault ve Neale Tarafından Önerilen Bağıntı

Theriault ve Neale (2000) tarafından öne sürülen bu bağıntı, FRP ile kuşatılmış dairesel ve dikdörtgen kesitli kolonlar için eksenel yük taşıma kapasitesini vermektedir.

Bölüm 3.1.8’de detaylı bir şekilde incelenmiş bu bağıntı, aynı bölümde (3.25) ile

gösterilmiştir.

Öncelikle FRP ile kuşatılmış kolonda, FRP'den kaynaklanan kuşatma basıncı (3.29) veya (3.30) bağıntısı ile hesaplanır. Daha sonra bulunan bu kuşatma basıncı, kesit şekline göre (3.27) veya (3.28) bağıntılarında yerine koyularak kuşatma gerilmesi oranı hesaplanır. Kuşatma gerilmesinin hesaplanmasının ardından gelen aşama, kuşatılmış kolon basınç dayanım değeri f'_{cc} 'nin bulunmasıdır. Bu işlem de, (3.26) bağıntısı yardımıyla gerçekleştirilir.

Sonuç eksenel yük taşıma kapasitesi, verilen bağıntılar ışığında, çeşitli katsayıların da dahil edilmesiyle bulunur.

4.1.2 M. Maalej, S. Tanwongsyal ve P. Paramasivam Tarafından Önerilen Bağntı

M. Maalej, S. Tanwongsyal ve P. Paramasivam tarafından 2002 yılında yayımlanan “Modelling of rectangular RC columns strengthened with FRP” isimli makalede FRP ve etriye ile kuşatılmış kolonlarda eksenel yük taşıma kapasitesinin bulunması üzerine çalışmalar yapılmıştır. Önerilen modelde kuşatılmış ve kuşatılmamış betonarme kolonlarda yük-deformasyon ilişkisi birbirinden ayrı iki bölgeyi içermektedir. Bu bölgelerden ilki parabolik şekilde artan bölge, ikincisi ise doğrusal olarak azalan bölgedir. Kolonu oluşturan elemanlar, eksenel yük kapasitesine parabolik şekilde artan bölgede katkı sağlarlar. Kuşatılmış ve kuşatılmamış betonun eksenel yük kapasitesine katkısını belirlemek için Saatçioğlu ve Razvi (1992) ve Hognestad (1951)'in önerdiği bağıntılar kullanılmıştır.

Ayrıca bulunan f_l yanal kuşatma basıncı değeri, Bölüm 3'de anılan modellere uygulanarak f'_{cc} kuşatılmış kolon dayanımları elde edilebilmektedir.

4.1.2.1 Betonun ve Donatının Katkısı

Kuşatılmış beton basınç dayanımı bağıntılarında kullanılan f_l kuşatma basıncı değeri, üniform kuşatma basıncı olarak tanımlanmıştır. Dairesel kolonlarda üniform kuşatma basıncı, yarım dairesel kesit için yazılabilecek serbest cisim diyagramı yardımı ile kolaylıkla bulunabilmektedir.

$$f_l = \frac{A_{st} f_{yt}}{sR} \quad (4.1)$$

Bu bağıntıda yer alan A_{st} , f_{yt} , s ve R sırasıyla enine donatının kesit alanı, akma gerilmesi,

etiriyeler arası mesafe ve enine donatının kapladığı alanın çapıdır. Benzer olarak dikdörtgen kesitlerde aynı bağıntı ;

$$f_l = \frac{\sum A_{st} f_{yt}}{s b_c} \quad (4.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada b_c , kuşatma basıncının meydana geldiği kesit derinliğidir.

Dikdörtgen ve kare kolonlarda kuşatma basıncı üniform değildir. Maksimum kuşatma basıncı kolonun köşelerinde ve boyuna donatı hizasında meydana gelir. Bununla birlikte, (4.2) bağıntısı ile bulunan kuşatma basıncı değerini ortalama kuşatma basıncı olarak almak, normal değerün üstüne çıkmak anlamına gelmektedir. Bu yüzden bulunan kuşatma basıncı değeri, kesitin ve donatının geometrik özelliklerine bağlı bir katsayı ile çarpılarak küçültülür. (Maalej, M., Tanwongswal, S., Paramasivam, P., 2002) Bu işlem sonucunda elde edilen değer, ortalama kuşatma basıncı olarak alınır.

$$k_3 = 0.26 \sqrt{\left(\frac{b_c}{s}\right) \left(\frac{b_c}{s_l}\right) \left(\frac{1}{f_l}\right)} \leq 1.0 \quad (4.3)$$

Bu bağıntıdaki f_l , (4.2) bağıntısıyla bulunan kuşatma basıncı ve s_l de boyuna donatılar arasındaki boşluk miktarıdır. Sonuç olarak, azaltılmış kuşatma basıncı değeri ;

$$f_{le} = k_3 f_l \quad (4.4)$$

olarak yazılabilir.

Kolonun iki yönünde farklı kuşatma basınçları oluşması durumunda başka bir düzenleme yapmak gerekmektedir. Bu durum, birçok dikdörtgen kesitli kolonda ve bazı kare kolonlarda görülmektedir. Saatçioğlu ve Razvi (1992) iki yönde farklı kuşatma basınçları meydana gelen kolonlardaki etkin kuşatma basıncının, kesit boyutlarıyla orantılı olduğunu ortaya koymuştur. Buna göre yanal kuşatma basıncı şu şekilde yazılmaktadır:

$$f_{le} = \frac{f_{lex} b_{cx} + f_{ley} b_{cy}}{b_{cx} + b_{cy}} \quad (4.5)$$

Bu bağıntıda f_{lex} ve f_{ley} kesit boyutları b_{cx} ve b_{cy} boyunca etkiyen yanal kuşatma değerleridir. Tüm bu bağıntılar yardımıyla f'_{cc} nü veren bağıntılardaki yanal kuşatma değeri f_l 'nin yerine f_{le} yazılarak etkin kuşatılmış kolon dayanımına ulaşılabilir. (Maalej, M.,

Tanwongsval, S., Paramasivam, P., 2002)

Çelikle kuşatılmış kolonlar için Saatçioğlu ve Razvi(1992)'nin Hognestad(1951) bağıntılarından faydalanarak ürettiği gerilme-birim deformasyon ilişkisini veren bağıntı;

$$f_c = f_{cc}' \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^2 \right]^{1/(1+2K)} \leq f_{cc}' \quad (4.6)$$

şeklindedir. Buradaki K katsayısı (3.21) bağıntısı yardımıyla bulunabilir.

(4.6) bağıntısı kullanılarak eksenel yük taşıma kapasitesi (N), çekirdek betonu(A), örtü betonu(B) ve boyuna donatı(C) etkisinin ayrı ayrı bulunup toplanmasıyla elde edilebilir ($\varepsilon_s = \varepsilon_c$ kabulü ile):

$$N = A + B + C \quad (4.7)$$

Yazılabilir. Burada;

$$A = 0.85 (A_{\text{çekirdek}} - \sum A_{sl}) f_{cc}' \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^2 \right]^{1/(1+2K)} \quad (4.8)$$

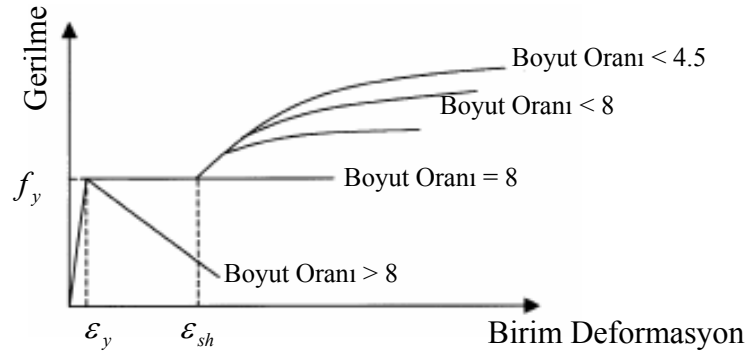
$$B = 0.85 (A_c - A_{\text{çekirdek}}) f_{c0}' \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^2 \right] \quad (4.9)$$

$$C = \sum f_{sl} A_{sl} \quad (4.10)$$

olarak düşünülmelidir.

Bu bağıntılarda, ε_c betonun eksenel birim deformasyonu, A_c kolonun kesit alanı, $A_{\text{çekirdek}}$ ise çekirdek beton alanıdır. A_{sl} boyuna donatı alanı ve f_{sl} boyuna donatıdaki basınç gerilmesidir.

Boyuna donatının eksenel yük taşıma kapasitesine katkısı, burkulma riskine bağlıdır. Burkulma veya dayanımdaki düşme, donatının boyut oranına (s / d_b) bağlıdır. Boyut oranı belirlenirken kullanılan s , boyuna donatı üzerindeki etriyeler arasındaki mesafe, d_b ise boyuna donatı çapıdır.



Şekil 4.1 Basınç altındaki donatı çeliğinin gerilme-birim deformasyon ilişkisi

Boyut oranı büyüdükçe, burkulma sebebiyle boyuna donatının dayanımında meydana gelecek azalma miktarı artar. Donatının boyut oranı ile gerilme-birim deformasyon eğrisi arasındaki ilişki Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

Boyuna donatının boyut oranı 8’den büyükse, donatı akma noktasında dayanımını yitirmiş hale gelir. Şekil 4.1’de gösterildiği gibi bu durumda gerilme değeri, (4.12) ve (4.13) bağıntılarıyla ifade edilen limit gerilme ve limit birim deformasyon değerlerine ulaşıncaya kadar doğrusal bir şekilde azalır. Boyut oranı 8’den küçük olan donatıların davranışı, çekme gerilmesi altında pekleşmeli davranış gösteren donatılarla benzeştirilebilir. Yalçın ve Saatçioğlu (2000) donatı boyut oranı ile basınç gerilmesi-birim deformasyon ilişkisini veren aşağıdaki bağıntıları önermişlerdir:

(a) Boyut oranı ≥ 8.0

$$f_{sl} = f_y - (\epsilon_s - \epsilon_y) \left[-23000 + 11000 \ln \left(\frac{s}{d_b} \right) \right]$$

$$\epsilon_y < \epsilon_s \leq \epsilon_{S/DU} \text{ durumu için.} \quad (4.11)$$

$$f_{S/DU} = 28 \left(\frac{s}{d_b} \right)^{-1.7} f_y \quad (4.12)$$

$$\varepsilon_{S/DU} = \left[40 - 6 \ln \left(\frac{s}{d_b} \right) \right] \varepsilon_y \quad (4.13)$$

(b) Boyut oranı ≤ 8.0

$$f_{sl} = f_y + (f_{S/DU} - f_{sh}) \left[2 \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_{S/DU} - \varepsilon_{sh}} - \left(\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}}{\varepsilon_{S/DU} - \varepsilon_{sh}} \right)^2 \right]$$

$$\varepsilon_s > \varepsilon_{sh} \text{ durumu için} \quad (4.14)$$

$$f_{S/DU} = f_{sh} + (f_u - f_{sh}) [48e^{-0.9(s/d_b)}] \quad (4.15)$$

$$\varepsilon_{S/DU} = \varepsilon_{sh} + (\varepsilon_u - \varepsilon_{sh}) [6e^{-0.4(s/d_b)}] \quad (4.16)$$

Bu bağıntılarda $f_y, f_{sh}, f_u, f_{S/DU}, \varepsilon_y, \varepsilon_{sh}, \varepsilon_u$ ve $\varepsilon_{S/DU}$ sırasıyla boyuna donatının akma gerilmesi, pekleşme gerilmesi, maksimum gerilmesi ve limit gerilmesi ve birim deformasyonlarıdır.

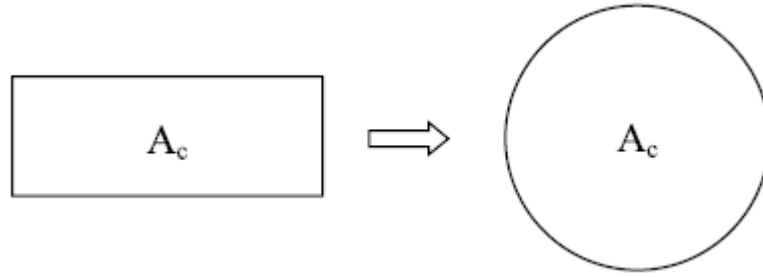
Bulunan f_{sl} değeri (4.10) bağıntısında yerine konularak boyuna donatının normal kuvvet taşıma kapasitesine katkısı belirlenebilir.

4.1.2.2 FRP levhanın katkısı

Bölüm 4.2’de anlatılan yöntem, bilinen betonarme kolonlar için kullanışlıdır. Enine ve boyuna doğrultuda FRP levhalar ile kuşatılmış kolonlarda ise FRP levhalar tarafından sağlanan kuşatma etkisi hesaplanmalı ve enine donatılarla sağlanan etkin kuşatma basıncına eklenerek çekirdek betonu için sonuç kuşatma basıncı elde edilmelidir. Ayrıca FRP levhanın eksenel yüke olan katkısı da hesaplanarak (4.7) bağıntısına eklenmelidir. Ayrıca, örtü betonu artık FRP ile kuşatılmış olduğundan kolondaki eksenel yükün hesaplanması sırasında bu etki de dikkate alınmalıdır.

Dikdörtgen kolonlardaki enine donatıda karşılaşılan durumda olduğu gibi, FRP levhalar ile kuşatılma durumunda da kuşatma basıncı üniform değildir. Köşelerde maksimum, açıklık ortalarında minimumdur. Etkin kuşatma basıncını elde etmek için, hesaplamalarda dikdörtgen kesit aynı alandaki eşdeğer bir dairesel kesite çevrilir (Şekil 4.2). Enine ve boyuna FRP levhalar bu eşdeğer dairesel kesiti kuşatmış gibi düşünülür. Daha sonra yanal kuşatma

basıncı, yarım-dairesel kesitin serbest cisim diyagramı düşünülerek elde edilebilir.



Şekil 4.2 Kolon kesitinin dönüştürülmesi

FRP levhadan kaynaklanan kuşatma basıncına, FRP'nin enine ve boyuna doğrultudaki elastisite modüllerinin etkisi de düşünülmelidir. FRP'nin boyuna yöndeki elastisite modülü, enine yöndeki elastisite modülünden daha yüksektir. Eşitlik sonucunda, yanal kuşatma basıncı şöyle yazılabilir:

$$f_{la} = \frac{(E_{a-0}N_{la-0} + E_{a-90}N_{la-90})\epsilon_a t_a}{R_a} \quad (4.17)$$

Bu bağıntıda E_{a-0} ve E_{a-90} FRP levhanın boyuna (0°) ve enine (90°) yöndeki çekme elastisite modülleridir. N_{la-0} ve N_{la-90} da aynı şekilde, boyuna (0°) ve enine (90°) yöndeki FRP levha sayısıdır. ϵ_a , FRP levhanın çekme birim deformasyonu, t_a kalınlığıdır. R_a ise eşdeğer dairesel kesit yarıçapıdır.

Enine donatının sağladığı maksimum yanal kuşatma basıncına enine donatı aktığında ulaşıldığı için FRP levhaların sağladığı yanal kuşatma basıncının maksimum değerine de FRP'nin çekme birim deformasyonunun enine donatının akma birim deformasyonuna eşit olduğu anda ulaştığı kabul edilir. Bu durumda (4.17) bağıntısı şu şekilde yazılabilir:

$$f_{la} = \frac{f_{yt}}{E_{st}} \frac{(E_{a-0}N_{la-0} + E_{a-90}N_{la-90})t_a}{R_a} \quad (4.18)$$

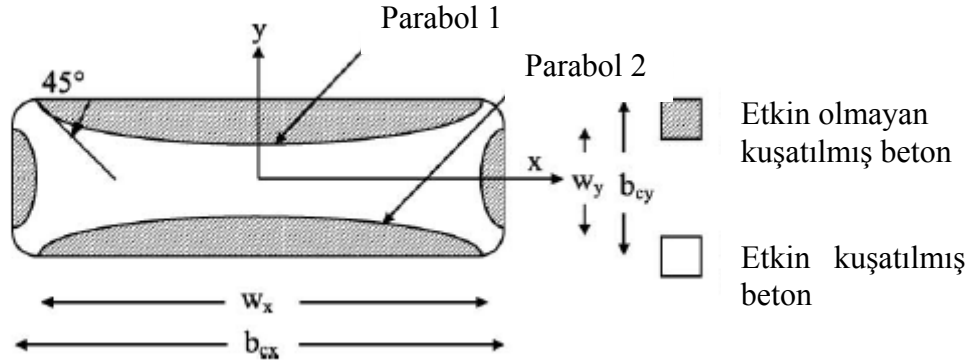
E_{st} enine donatı çekme elastisite modülüdür.

Etkin olarak kuşatılmış beton alanının belirlenmesi için Sheikh ve Uzumeri'nin (1980) önerdiği yöntem kullanılmaktadır. Şekil 4.2'de gösterildiği gibi, etkin olmayan kuşatılmış beton alanı köşeden 45 derecelik eğimle başlayan ikinci dereceden parabollerle sınırlanmıştır.

Kesit geometrisinden bu dört alanın her biri:

$$\frac{w^2}{6} \quad (4.19)$$

olarak yazılabilir. w kolonun uzun ya da kısa boyutuna eşittir (w_x veya w_y).



Şekil 4.3 Etkin kuşatılmış beton alanı

Kesit boyutları oranı arttıkça uzun kenardaki parabol (parabol 1 ve parabol 2) çakışabilir. Sınır şartlarından Parabol 1 ve Parabol 2'nin denklemleri çıkartılabilir:

$$y_1 = \frac{1}{w_x} x^2 + \frac{1}{4} (2b_{cy} - w_x) \quad (4.20)$$

$$y_2 = -\left(\frac{1}{w_x} x^2 + \frac{1}{4} (2b_{cy} - w_x) \right) \quad (4.21)$$

Bu denklemlerde w_x , $(b_{cx} - 2r)$ ye eşittir ve r kolonun köşe yarıçapıdır. Aynı şekilde w_y de

$(b_{cy} - 2r)$ ye eşittir. (4.20) ve (4.21) bağıntıları eşitlendiğinde $2b_{cy} < w_x$ olduğunda iki parabolün x ekseninde x_1 noktasında kesiştiği görülür. Parabollerin çakışması sonucu arada kalan alan, toplam etkin olmayan kuşatılmış alan'dan çıkartılır:

$$A_{ie} = \sum_{i=1}^2 2 \int_0^{w_x/2} (-1)^{i+1} \left(\frac{b_{cy}}{2} - y_i \right) dx + 2 \frac{w_y^2}{6} - 2 \int_0^{x_1} (y_2 - y_1) dx \quad (4.22)$$

Etkin olmayan kuşatılmış alan hesaplandıktan sonra etkin kuşatma katsayısı k_e ve FRP levhaların sağladığı etkin yanal kuşatma basıncı

$$k_e = \frac{A_c - A_{ie}}{A_c} \quad (4.23)$$

$$f_{l,e} = k_e f_l \quad (4.24)$$

şeklinde hesaplanabilir.

FRP'den kaynaklanan etkin yanal kuşatma basıncı enine donatıdan kaynaklanan yanal kuşatma basıncına eklenerek çekirdek betonundaki toplam kuşatma basıncı elde edilir. Örtü betonunu, sadece FRP'den kaynaklanan yanal kuşatma basıncı etkiler. En son olarak FRP levhanın eksenel yüke olan etkisi (D) de (4.7) bağıntısına eklenir. Bu etki şu bağıntıyla bulunur:

$$D = (E_{ac-0} N_{la-0} + E_{ac-90} N_{la-90}) P t_a \varepsilon_c \quad (4.25)$$

Burada P , kolonun çevre uzunluğu, E_{a-0} ve E_{a-90} FRP levhanın lif yönündeki (0°) ve enine yöndeki (90°) basınç elastisite modülleridir.

(4.7) bağıntısının son hali şu şekilde olur:

$$N = A + B + C + D \quad (4.26)$$

4.2 Bağıntıların İrdelenmesi

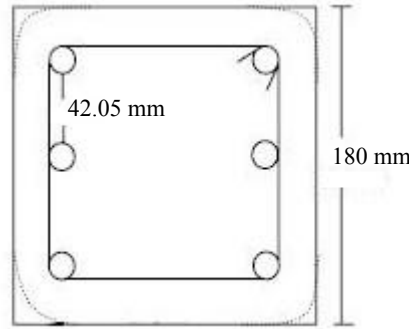
Theriault ve Neale (2000) ile, M. Maalej, S. Tanwongswal ve P. Paramasivam (2002) tarafından ortaya konan bağıntılar, Esfahani, M.R., Kianoush M.R., (2004) ile Feng, P., Lu, X.Z. ve Ye, L.P., (2002) tarafından yapılmış deneylerde kullanılarak incelenmiştir.

Bu incelemelerde esas alınan, deneysel sonuçlarla olan tutarlılıktır. İki ayrı örnek olarak gösterilecek deneysel çalışmalarda, birinci örnekte 1, ikinci örnekte ise 3 adet numune üzerinde deney uygulanmıştır. Öncelikle, numunelerin özellikleri anlatılmış, beton ve donatının dayanım değerleri, FRP'nin elastisite modülü belirtilmiştir. Bu veriler ışığında (3.25) ve (4.26) bağıntılarıyla bulunan eksenel yük taşıma kapasiteleri, deneysel olarak bulunan kapasite değeriyle karşılaştırılmıştır.

Örnek 1:

Bu bölümde, (3.25) ve (4.26) bağıntılarıyla bulunan eksenel yük taşıma kapasiteleri bir dizi deneysel çalışma sonucu (Esfahani, M.R., Kianoush M.R., 2004) elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Köşeleri 12 mm yarıçapında yuvarlatılmış olan örnek numune 180 mm boyunda ve 180 mm eninde kare kesitlidir. 6 adet 10 mm çapında donatı çeliği Şekil 4.3 de gösterildiği gibi yerleştirilmiştir. Bu donatılar için f_y değeri 400 MPa'dır. Etriye ise 160 mm aralıklı ve 10 mm çaplıdır.



Şekil 4.4 Kolon kesidi

Kesitte 25 mm kalınlığında örtü betonu bulunmaktadır. Kuşatılmamış basınç dayanımı, f'_c 46.1 MPa'dır. 2 kat olarak uygulanan FRP malzemenin özellikleri Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 Kullanılan FRP'nin özellikleri

Çekme Dayanımı, f_{FRP}	Çekme Elastisite Modülü, E	Birim deformasyon, ϵ_{FRP}	Kalınlık, t
876 MPa	72.4 GPa	0.003	1 mm

Bu numune için deneysel olarak elde edilmiş eksenel yük değeri 1618 kN'dur. Öncelikle deneysel verilerin yayımlandığı makalede önerilmiş olan yöntem uygulanacaktır.

Theriault ve Neale (2000) tarafından önerilen bu bağıntılar sırasıyla uygulanırsa;

(3.30) bağıntısına göre f_{lfrp} ;

$$f_{lfrp} = 2 \times 2 \times 1 \times 72400 \times 0.003 \times 1 \times (180 + 180) / (180 \times 180) = 9.653 \text{ MPa}$$

olarak bulunur. Daha sonra bulunan bu f_{lfrp} değeri, (3.28) bağıntısında yerine konulursa,

$$\omega_w = 9.653 / 46.1 = 0.209$$

bulunur. Daha sonra bu değeri de (3.26) bağıntısında yerine yazılarak,

$$f'_{cc} = 46.1(1 + 0.209) = 55.75 \text{ MPa}$$

elde edilir. Ve son olarak (3.25) bağıntısı kullanılarak eksenel yük taşıma kapasitesi bulunur.

Bu bağıntıdaki kesit alanı

$$A_g = 180 \times 180 = 32400 \text{ mm}^2 \text{ ve toplam boyuna donatı alanı}$$

$$A_{st} = 6\pi \frac{10^2}{4} = 471.24 \text{ mm}^2 \text{ dir.}$$

α_1 katsayısı ise $0.85 - 0.0015 f'_{c0}$ a eşit olduğundan, 0.78085 olarak hesaplanır. Bulunan bu değerler (3.25) bağıntısında yerine konulursa, taşıma kapasitesi

$$P_{rc} = (0.78085)(55.75)(32400 - 471.24) + 400(471.24) = 1578.43 \text{ kN}$$

olarak elde edilir.

Önerilen bu yöntemde etriyenin etkisi dikkate alınmamaktadır. Kuşatma etkisi sadece FRP'nin katkısı dikkate alınarak hesaplanmaktadır.

Aynı numune için bir de M. Maalej, S. Tanwongsva ve P. Paramasivam (2002) tarafından önerilen yöntem kullanılacaktır.

Bu yöntemde eksenel normal kuvvet kapasitesi (4.26) bağıntısı ile bulunmaktadır.

A, B ve C parametreleri aşağıdaki şekilde bulunur:

$$A_{\text{çekirdek}} = (180 - 25)(180 - 25) = 24025 \text{ mm}^2 \text{ ve } \sum A_{sl} = 6\pi \frac{10^2}{4} = 471.24 \text{ mm}^2$$

olarak belirlenir.

f'_{cc} bu yöntemde hem etriyeden hem de FRP'den gelen kuşatma etkisiyle belirlenmektedir.

Etriya

Etriya kaynaklı kuşatma basıncı (4.2) bağıntısı ile bulunmaktadır.

$$f_l = \frac{\pi \frac{10^2}{4} 400}{160 \times 180} = 1.09 \text{ MPa}$$

FRP'den

FRP etkisi de (4.17) bağıntısı ile bulunur. Bu bağıntıdaki R_a , eşdeğer dairesel kesit yarıçapı 180 mm'lik bir kare için,

$$R_a = \sqrt{\frac{180 \times 180}{\pi}} = 101.55 \text{ mm}$$

olarak bulunur.

(4.17) bağıntısının son hali;

$$f_{la} = \frac{2 \times 72400 \times 0.003 \times 1}{101.55} = 4.28 \text{ MPa}$$

Etkin FRP kuşatma basıncının bulunması ise şu şekilde olmaktadır:

Öncelikle (4.20) ve (4.21) bağıntılarıyla belirtilmiş parabollerin çakışıp çakışmadığına bakılır.

Bu parabol denklemlerinde,

$$w_x = b_{cx} - 2r = 180 - 24 = 156 \text{ mm}$$

olarak bulunur.

Aynı şekilde w_y de 156 mm'dir.

Çakışma durumu için $2b_{cy} < w_x$ kontrolü yapılmalıdır. $2 \times 180 = 360 > 156$ olduğu için parabollerin çakışmadığı görülür. Parabollerin çakışmadığı durumda etkin kuşatma basıncı katsayısı, (4.22) ve (4.23) bağıntılarından hareketle şu şekilde bulunmaktadır:

(4.22) bağıntısından;

$$A_{ie} = \frac{w_x^2}{3} + \frac{w_y^2}{3} = 16224 \text{ mm}^2$$

ve (4.23) bağıntısından;

$$k_e = \frac{32400 - 16224}{32400} = 0.5$$

olarak bulunur.

Bu durumda FRP'den kaynaklanan etkin kuşatma basıncı (4.24) bağıntısından;

$$f_{l,e} = (0.5)(4.28) = 2.14 \text{ MPa}$$

olarak elde edilir.

Etriye ve FRP'den kaynaklanan kuşatma basınçları hesaplandıktan sonra kuşatılmış kolon basınç dayanımı;

$$f_{I_{TOPLAM}} = 2.14 + 1.09 = 3.23 \text{ MPa}$$

şeklinde bulunur.

Bu noktadan sonra f'_{cc} ve ε_{cc} değerlerinin hesabı için Bölüm 3'de anlatılan herhangi bir yöntem kullanılabilir. Bölüm 4.1.2'de incelenmiş makalede uygulanan malzeme modeli, 3.1.6'da geçen, Razvi ve Saatçioğlu (1992) modelidir. Bu model, Bölüm 3'de yapılan karşılaştırmalarda da tutarlı sonuçlar vermiş olduğu için seçilmiştir.

Bu modele göre sırasıyla,

$$k_1 = 6.7(3.23)^{-0.17} = 5.49 \text{ ve}$$

$$K = \frac{(5.49)(3.23)}{46.1} = 0.38$$

olarak bulunur. Bulunan bu değerler ile birlikte, (3.19) ve (3.20) bağıntılarıyla;

$$\frac{f'_{cc}}{46.1} = 1 + 6.7 \frac{(3.23)^{0.83}}{46.1}$$

$$f'_{cc} = 63.83 \text{ MPa}$$

ve

$$\varepsilon_{cc} = (0.002)(1 + 5(0.38)) = 0.0058$$

sonuçlarına ulaşılır.

Bu değerler (4.8) bağıntısında yerine koyulduğunda, çekirdek betonunun aksenal yük taşıma kapasitesine katkısı aşağıdaki şekilde bulunur:

$$A = 0.85(24025 - (471.24))(63.83) \left[2 \left(\frac{0.002}{0.0058} \right) - \left(\frac{0.002}{0.0058} \right)^2 \right]^{1/(1+2.(0.38))} = 928.28 \text{ kN}$$

Örtü betonunun taşıma kapasitesine katkısını ifade eden B parametresi de (4.9) bağıntısında belirtildiği gibi;

$$B = 0.85(A_c - A_{\text{çekirdek}}) f'_{c0} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^2 \right]$$

olarak hesaplanır.

FRP ile kuşatılmış durumda, B parametresinin son hali:

$$B = 0.85(A_c - A_{\text{çekirdek}}) f'_{cc} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^2 \right]^{1/(1+2K)}$$

Şeklindedir.

Etriye çekirdek betonunun etrafında olduğu için kuşatma basıncı hesaplanırken örtü betonu için sadece FRP etkisi dikkate alınacaktır.

Bu durumda

$$f_{l_{TOPLAM}} = 2.14 \text{ MPa olmaktadır.}$$

Daha sonra , A bulunurken uygulanan işlemler benzer bir sırayla tekrarlanırsa;

$$k_1 = 6.7(2.14)^{-0.17} = 5.89$$

$$K = \frac{(5.89)(2.14)}{46.1} = 0.27$$

olarak bulunur. Bulunan bu değerler ile birlikte, (3.19) ve (3.20) bağıntılarıyla;

$$\frac{f'_{cc}}{46.1} = 1 + 6.7 \frac{(2.14)^{0.83}}{46.1} ; f'_{cc} = 58.7 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{cc} = (0.002)(1 + 5(0.27)) = 0.0047$$

sonuçlarına ulaşılır.

Ve (4.9) bağıntısında FRP kuşatması dikkate alınarak oluşturulan son bağıntıda bu değerler yerine konulursa örtü betonunun taşıma kapasitesine katkısı;

$$B = 0.85(32400 - 24025)(58.7) \left[2 \left(\frac{0.002}{0.0047} \right) - \left(\frac{0.002}{0.0047} \right)^2 \right]^{1/(1+2(0.27))} = 322.1 \text{ kN}$$

olarak elde edilir.

(4.10) bağıntısı yardımıyla bulunacak C değeri de aşağıdaki gibidir:

$$C = 400 \times 6 \times \pi \frac{10^2}{4} = 188.5 \text{ kN}$$

Son olarak, FRP'den kaynaklanan ve (4.25) bağıntısıyla gösterilen D parametresi hesaplanacaktır. D parametresi hesaplanırken, FRP malzemenin çekme değil, basınç özellikleri kullanılmaktadır. İncelenen örnekte FRP'nin basınç elastisite modülü ve basınç dayanımı değerleri belirtilmediğinden, kullanılan FRP türü için genel özelliklere bakılarak, yaklaşık olarak basınç elastisite modülü çekme elastisite modülünün %55i olarak alınmıştır. (ACI 440, 2000).

Bu durumda ;

$$D = 0.55 \times 2 \times 72400 \times 4 \times 180 \times 0.003 \times 1 = 172.022 \text{ kN}$$

olarak bulunur.

Bulunan A,B,C ve D değerleri yardımıyla eksenel yük taşıma kapasitesi;

$$N = A + B + C + D = 928.28 + 322.1 + 188.5 + 172.022 = 1610.90 \text{ kN}$$

olarak bulunur.

İki yöntemle bulunan ve deneysel olarak elde edilen eksenel normal kuvvet taşıma kapasiteleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 Sonuçların karşılaştırılması

Deneysel	1.Yöntem	2.Yöntem
1618 kN	1578.43 kN	1610.90 kN

Örnek 2:

Bu kısımda Feng, P., Lu, X.Z. ve Ye, L.P., (2002)'nin çalışmasında 3 farklı numune için deneysel olarak elde edilmiş eksenel yük taşıma kapasiteleri, (4.26) ve (3.25) bağıntıları ile bulunan değerlerle karşılaştırılacaktır.

Anılan çalışmada (Feng, P., Lu, X.Z., Ye, L.P., 2002) 200x200x600 mm boyutlarındaki kare kesitli numuneler için, 25 mm örtü betonu, 4 adet 10 mm çapında boyuna donatı, 6 mm çapında, 200 mm aralıkla yerleştirilmiş etriye dikkate alınmıştır. Numunelerin köşeleri 20 mm yarıçapında yuvarlatılmıştır. Betonun f'_c değeri 27.8 MPa, Elastisite Modülü ise 2.95×10^4 MPa'dır. Boyuna ve enine donatı çeliği akma dayanımları sırasıyla 342 MPa ve 290.8 MPa alınmıştır. Tüm donatılar için Elastisite Modülü, 2.1×10^5 MPa'dır. Kullanılan GFRP malzemenin kalınlığı 0.304 mm, dayanımı 900 MPa, birim deformasyonu 0.003 ve Elastisite Modülü 6.5×10^4 MPa'dır.

İncelenecek 3 numuneden CM1 bir kat, CM2 iki kat, CM3 de üç kat FRP ile kuşatılmıştır.

Daha önce kullanılmış iki yöntemle bu numunelerin eksenel yük taşıma kapasiteleri bulunacak ve bu değer, deneysel sonuçlarla karşılaştırılacaktır.

Birinci yöntem

Theriault ve Neale (2000) yöntemini bahsi geçen 3 numuneye uygularsak;

CM1 için

(3.30) bağıntısına göre f_{lfrp} bulunacak olursa,

$$f_{lfrp} = 2 \times 1 \times 65000 \times 0.003 \times 0.304 \times (180 + 180) / (180 \times 180) = 1.1856 \text{ MPa}$$

Daha sonra bulunan bu f_{lfrp} değeri, (3.28) bağıntısında yerine konulursa,

$$\omega_w = 1.1856 / 27.8 = 0.0426$$

bulunur. Daha sonra bu değer de (3.26) bağıntısında yerine yazılarak,

$$f'_{cc} = 27.8(1 + 0.0426) = 28.99 \text{ MPa}$$

elde edilir.

Ve son olarak (3.25) bağıntısı kullanılarak eksenel yük taşıma kapasitesi bulunur. Bu

bağıntıdaki kesit alanı

$A_g = 200 \times 200 = 40000 \text{ mm}^2$ ve toplam boyuna donatı alanı

$$A_{st} = 4\pi \frac{10^2}{4} = 314.16 \text{ mm}^2 \text{ dir.}$$

α_1 katsayısı ise $0.85 - 0.0015 f'_{c0}$ a eşit olduğundan, 0.80652 olarak hesaplanır. Bulunan bu değerler (3.25) bağıntısında yerine konulursa, taşıma kapasitesi

$$P_{rc} = (0.80652)(28.99)(40000 - 314.16) + 342(314.16) = 1035.34 \text{ kN}$$

olarak elde edilir.

CM2 için

(3.30) bağıntısına göre f_{lfrp} bulunacak olursa,

$$f_{lfrp} = 2 \times 2 \times 65000 \times 0.003 \times 0.304 \times (180 + 180) / (180 \times 180) = 2.3712 \text{ MPa}$$

Daha sonra bulunan bu f_{lfrp} değeri, (3.28) bağıntısında yerine konulursa,

$$\omega_w = 2.3712 / 27.8 = 0.0853$$

bulunur. Daha sonra bu değer de (3.26) bağıntısında yerine yazılarak,

$$f'_{cc} = 27.8(1 + 0.0853) = 30.17 \text{ MPa}$$

elde edilir. Bulunan bu değerler (3.25) bağıntısında yerine konulursa, taşıma kapasitesi

$$P_{rc} = (0.80652)(30.17)(40000 - 314.16) + 342(314.16) = 1073.11 \text{ kN}$$

olarak elde edilir.

CM3 için

(3.30) bağıntısına göre f_{lfrp} bulunacak olursa,

$$f_{lfrp} = 2 \times 3 \times 65000 \times 0.003 \times 0.304 \times (180 + 180) / (180 \times 180) = 3.5568 \text{ MPa}$$

Daha sonra bulunan bu f_{lfrp} değeri, (3.28) bağıntısında yerine konulursa,

$$\omega_w = 3.5568 / 27.8 = 0.1279$$

bulunur. Daha sonra bu değer de (3.26) bağıntısında yerine yazılarak,

$$f'_{cc} = 27.8(1 + 0.1279) = 31.36 \text{ MPa}$$

elde edilir. Bulunan bu değerler (3.25) bağıntısında yerine konulursa, taşıma kapasitesi

$$P_{rc} = (0.80652)(31.36)(40000 - 314.16) + 342(314.16) = 1111.20 \text{ kN}$$

olarak elde edilir.

İkinci Yöntem

M. Maalej, S. Tanwongsva ve P. Paramasivam (2002) yöntemine göre;

CM1 için

Öncelikle;

$$A_{\text{çekirdek}} = (200-25).(200-25) = 30625 \text{ mm}^2 \text{ ve } \sum A_{sl} = 4\pi \frac{10^2}{4} = 314.16 \text{ mm}^2$$

olarak belirlenir.

f'_{cc} bu yöntemde hem etriyeden hem de FRP'den gelen kuşatma etkisiyle belirlenmektedir.

Etriyaeden

Etriyaeden kaynaklanan kuşatma basıncı (4.2) bağıntısı ile bulunmaktadır.

$$f_l = \frac{\pi \frac{6^2}{4} 290.8}{200 \times 200} = 0.206 \text{ MPa}$$

FRP'den

FRP etkisi de (4.17) bağıntısı ile bulunur. Bu bağıntıdaki R_a , eşdeğer dairesel kesit yarıçapı 200 mm'lik bir kare için,

$$R_a = \sqrt{\frac{200 \times 200}{\pi}} = 112.84 \text{ mm}$$

olarak bulunur.

(4.17) bağıntısının son hali;

$$f_{la} = \frac{1 \times 65000 \times 0.003 \times 0.304}{112.84} = 0.525 \text{ MPa}$$

Etkin FRP kuşatma basıncının bulunması da şu şekilde olmaktadır:

Öncelikle (4.20) ve (4.21) bağıntılarıyla belirtilmiş parabollerin çakışıp çakışmadığına bakılır.

Bu parabol denklemlerinde

$$w_x = b_{cx} - 2r = 200 - 40 = 160 \text{ mm}$$

olarak bulunur.

Aynı şekilde w_y de 160 mm'dir.

Çakışma durumu için $2b_{cy} < w_x$ kontrolü yapılmalıdır. $2 \times 200 = 400 > 160$ olduğu için parabollerin çakışmadığı görülür. Parabollerin çakışmadığı durumda etkin kuşatma basıncı katsayısı, 4.22 ve 4.23 bağıntılarından hareketle şu şekilde bulunmaktadır:

(4.22) bağıntısından;

$$A_{ie} = \frac{w_x^2}{3} + \frac{w_y^2}{3} = 17066.67 \text{ mm}^2$$

ve (4.23) bağıntısından;

$$k_e = \frac{40000 - 17066.67}{40000} = 0.573$$

bulunur.

Bu durumda FRP'den kaynaklanan etkin kuşatma basıncı (4.24)bağıntısından;

$$f_{l,e} = (0.573)(0.525) = 0.301 \text{ MPa}$$

olarak elde edilir.

Etriyeden ve FRP'den kaynaklanan kuşatma basınçları hesaplandıktan sonra kuşatılmış kolon basınç dayanımı;

$$f_{I_{TOPLAM}} = 0.301 + 0.206 = 0.507 \text{ MPa}$$

şeklinde bulunur.

Bu noktadan sonra f'_{cc} ve ε_{cc} değerlerinin hesabı için Bölüm 3'de anlatılan herhangi bir yöntem kullanılabilir. Bölüm 4'te incelenmiş makalede uygulanan malzeme modeli, 3.1.6'da geçen, Razvi ve Saatçioğlu (1992) modelidir.

Bu modele göre sırasıyla,

$$k_1 = 6.7(0.507)^{-0.17} = 7.52 \text{ ve}$$

$$K = \frac{(7.52)(0.507)}{27.8} = 0.137$$

olarak bulunur. Bulunan bu değerler ile birlikte, (3.19) ve (3.20) bağıntılarıyla;

$$\frac{f'_{cc}}{27.8} = 1 + 6.7 \frac{(0.507)^{0.83}}{27.8}$$

$$f'_{cc} = 31.61 \text{ MPa}$$

ve

$$\varepsilon_{cc} = (0.002)(1 + 5(0.137)) = 0.00337$$

sonuçlarına ulaşılır.

Bu değerler (4.8) bağıntısında yerine koyulduğunda, çekirdek betonunun eksenel yük taşıma kapasitesine katkısı aşağıdaki şekilde bulunur:

$$A = 0.85(30625 - (314.16))(31.61) \left[2 \left(\frac{0.002}{0.00337} \right) - \left(\frac{0.002}{0.00337} \right)^2 \right]^{1/(1+2(0.137))} = 706.74 \text{ kN}$$

Örtü betonunun taşıma kapasitesine katkısını ifade eden B parametresi de (4.9) bağıntısında belirtildiği gibi;

$$B = 0.85(A_c - A_{\text{çekirdek}})f'_{c0} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^2 \right]$$

olarak hesaplanır.

FRP ile kuşatılmış durumda, B parametresinin son hali:

$$B = 0.85(A_c - A_{\text{çekirdek}})f'_{cc} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^2 \right]^{1/(1+2K)}$$

şeklindedir.

Etriye çekirdek betonunun etrafında olduğu için kuşatma basıncı hesaplanırken örtü betonu için sadece FRP etkisi dikkate alınacaktır.

Bu durumda

$$f_{l_{TOPLAM}} = 0.301 \text{ MPa olmaktadır.}$$

Daha sonra , A bulunurken uygulanan işlemler benzer bir sırayla tekrarlanırsa;

$$k_1 = 6.7(0.301)^{-0.17} = 8.21$$

$$K = \frac{(8.21)(0.301)}{27.8} = 0.089$$

olarak bulunur. Bulunan bu değerler ile birlikte, (3.19) ve (3.20) bağıntılarıyla;

$$\frac{f'_{cc}}{27.8} = 1 + 6.7 \frac{(0.301)^{0.83}}{27.8}$$

$$f'_{cc} = 30.27 \text{ MPa}$$

ve

$$\varepsilon_{cc} = (0.002)(1 + 5(0.089)) = 0.00289$$

sonuçlarına ulaşılır.

Ve (4.9) bağıntısında FRP kuşatması dikkate alınarak oluşturulan son bağıntıda bu değerler yerine konulursa örtü betonunun taşıma kapasitesine katkısı;

$$B = 0.85(40000 - 30625)(30.27) \left[2 \left(\frac{0.002}{0.00289} \right) - \left(\frac{0.002}{0.00289} \right)^2 \right]^{1/(1+2(0.089))} = 221.648 \text{ kN}$$

olarak elde edilir.

(4.10) bağıntısı yardımıyla bulunacak C değeri de aşağıdaki gibidir:

$$C = (342)(4)(\pi \frac{10^2}{4}) = 107.44 \text{ kN}$$

Son olarak, FRP'den kaynaklanan ve (4.25) bağıntısıyla gösterilen D parametresi hesaplanacaktır. D parametresi hesaplanırken, FRP malzemenin çekme değil, basınç özellikleri kullanılmaktadır. İncelenen örnekte FRP'nin basınç elastisite modülü ve basınç dayanımı değerleri belirtilmediğinden, kullanılan FRP türü için genel özelliklere bakılarak, yaklaşık olarak basınç elastisite modülü çekme elastisite modülünün %55i olarak alınmıştır. (ACI 440, 2000).

Bu durumda ;

$$D = (0.55)(65000)(4 \times 200)(0.003)(0.304) = 26.083 \text{ kN}$$

olarak bulunur.

Bulunan A,B,C ve D değerleri toplandığında elde edilen normal kuvvet taşıma kapasitesi;

$$N = A + B + C + D = 706.74 + 221.648 + 107.44 + 26.083 = 1061.91 \text{ kN}$$

olarak bulunur.

CM2 için

f'_{cc} bu yöntemde hem etriyeden hem de FRP'den gelen kuşatma etkisiyle belirlenmektedir.

Etriyeden

Etriyeden kaynaklanan kuşatma basıncı (4.2) bağıntısı ile bulunmaktadır.

$$f_l = \frac{\pi \frac{6^2}{4} 290.8}{200 \times 200} = 0.206 \text{ MPa}$$

FRP'den

FRP etkisi de (4.17) bağıntısı ile bulunur. Bu bağıntıdaki R_a , eşdeğer dairesel kesit yarıçapı 200 mm'lik bir kare için,

$$R_a = \sqrt{\frac{200 \times 200}{\pi}} = 112.84 \text{ mm}$$

olarak bulunur.

(4.17) bağıntısının son hali;

$$f_{la} = \frac{2 \times 65000 \times 0.003 \times 0.304}{112.84} = 1.05 \text{ MPa}$$

Etkin FRP kuşatma basıncının bulunması da şu şekilde olmaktadır:

Bu durumda FRP'den kaynaklanan etkin kuşatma basıncı (4.24)bağıntısından;

$$f_{l,e} = (0.573)(1.05) = 0.602 \text{ MPa}$$

olarak elde edilir.

Etriyeden ve FRP'den kaynaklanan kuşatma basınçları hesaplandıktan sonra kuşatılmış kolon basınç dayanımı;

$$f_{l_{TOPLAM}} = 0.602 + 0.206 = 0.808 \text{ MPa}$$

şeklinde bulunur.

Razvi ve Saatçioğlu (1992) modeline göre sırasıyla,

$$k_1 = 6.7(0.808)^{-0.17} = 6.95 \text{ ve}$$

$$K = \frac{(6.95)(0.808)}{27.8} = 0.202$$

olarak bulunur. Bulunan bu değerler ile birlikte, (3.19) ve (3.20) bağıntılarıyla;

$$\frac{f'_{cc}}{27.8} = 1 + 6.7 \frac{(0.808)^{0.83}}{27.8}$$

$$f'_{cc} = 33.41 \text{ MPa}$$

ve

$$\varepsilon_{cc} = (0.002)(1 + 5(0.202)) = 0.00402$$

sonuçlarına ulaşılır.

Bu değerler (4.8) bağıntısında yerine koyulduğunda, çekirdek betonunun eksenel yük taşıma kapasitesine katkısı aşağıdaki şekilde bulunur:

$$A = 0.85(30625 - (314.16))(33.41) \left[2 \left(\frac{0.002}{0.00402} \right) - \left(\frac{0.002}{0.00402} \right)^2 \right]^{1/(1+2 \cdot (0.202))} = 699.69 \text{ kN}$$

FRP ile kuşatılmış durumda, Örtü betonunun taşıma kapasitesine katkısını ifade eden B parametresinin son hali;

$$B = 0.85(A_c - A_{\text{çekirdek}}) f'_{cc} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^2 \right]^{1/(1+2K)}$$

şeklindedir.

Etriye çekirdek betonunun etrafında olduğu için kuşatma basıncı hesaplanırken örtü betonu için sadece FRP etkisi dikkate alınacaktır.

Bu durumda

$$f_{I_{TOPLAM}} = 0.602 \text{ MPa olmaktadır.}$$

Daha sonra , A bulunurken uygulanan işlemler benzer bir sırayla tekrarlanırsa;

$$k_1 = 6.7(0.602)^{-0.17} = 7.304$$

$$K = \frac{(7.304)(0.602)}{27.8} = 0.158$$

olarak bulunur. Bulunan bu değerler ile birlikte, (3.19) ve (3.20) bağıntılarıyla;

$$\frac{f'_{cc}}{27.8} = 1 + 6.7 \frac{(0.602)^{0.83}}{27.8}$$

$$f'_{cc} = 32.197 \text{ MPa}$$

ve

$$\varepsilon_{cc} = (0.002)(1 + 5(0.158)) = 0.00358$$

sonuçlarına ulaşılır.

Ve (4.9) bağıntısında FRP kuşatması dikkate alınarak oluşturulan son bağıntıda bu değerler yerine konulursa örtü betonunun taşıma kapasitesine katkısı;

$$B = 0.85(40000 - 30625)(32.197) \left[2 \left(\frac{0.002}{0.00358} \right) - \left(\frac{0.002}{0.00358} \right)^2 \right]^{1/(1+2(0.158))} = 217.62 \text{ kN}$$

olarak elde edilir.

(4.10) bağıntısı yardımıyla bulunacak C değeri de aşağıdaki gibidir:

$$C = 342 \times 4 \times \pi \frac{10^2}{4} = 107.44 \text{ kN}$$

Son olarak, FRP'den kaynaklanan ve (4.25) bağıntısıyla gösterilen D parametresi hesaplanacaktır. D parametresi hesaplanırken, FRP malzemenin çekme değil, basınç özellikleri kullanılmaktadır. İncelenen örnekte FRP'nin basınç elastisite modülü ve basınç dayanımı değerleri belirtilmediğinden, kullanılan FRP türü için genel özelliklere bakılarak, yaklaşık olarak basınç elastisite modülü çekme elastisite modülünün %55i olarak alınmıştır. (ACI 440, 2000).

Bu durumda ;

$$D = 2 \times 0.55 \times 65000 \times 4 \times 200 \times 0.003 \times 0.304 = 52.166 \text{ kN}$$

olarak bulunur.

Bulunan A,B,C ve D değerleri toplandığında elde edilen normal kuvvet taşıma kapasitesi;

$$N = A + B + C + D = 699.69 + 217.62 + 107.44 + 52.166 = 1076.92 \text{ kN}$$

olarak bulunur.

CM3 için

f'_{cc} bu yöntemde hem etriyeden hem de FRP'den gelen kuşatma etkisiyle belirlenmektedir.

Etriyeden

Etriyeden kaynaklanan kuşatma basıncı (4.2) bağıntısı ile bulunmaktadır.

$$f_t = \frac{\pi \frac{6^2}{4} 290.8}{200 * 200} = 0.206 \text{ MPa}$$

FRP'den

FRP etkisi de (4.17) bağıntısı ile bulunur. Bu bağıntıdaki R_a , eşdeğer dairesel kesit yarıçapı 200 mm'lik bir kare için,

$$R_a = \sqrt{\frac{200 \times 200}{\pi}} = 112.84 \text{ mm}$$

olarak bulunur.

(4.17) bağıntısının son hali;

$$f_{la} = \frac{3 \times 65000 \times 0.003 \times 0.304}{112.84} = 1.576 \text{ MPa}$$

Etkin FRP kuşatma basıncının bulunması da şu şekilde olmaktadır:

Bu durumda FRP'den kaynaklanan etkin kuşatma basıncı (4.24)bağıntısından;

$$f_{l,e} = (0.573)(1.576) = 0.903 \text{ MPa}$$

olarak elde edilir.

Etriyeden ve FRP'den kaynaklanan kuşatma basınçları hesaplandıktan sonra kuşatılmış kolon basınç dayanımı;

$$f_{l_{TOPLAM}} = 0.903 + 0.206 = 1.109 \text{ MPa}$$

şeklinde bulunur.

Razvi ve Saatçioğlu (1992) modeline göre sırasıyla,

$$k_1 = 6.7(1.109)^{-0.17} = 6.58 \text{ ve}$$

$$K = \frac{(6.58)(1.109)}{27.8} = 0.263$$

olarak bulunur. Bulunan bu değerler ile birlikte, (3.19) ve (3.20) bağıntılarıyla;

$$\frac{f'_{cc}}{27.8} = 1 + 6.7 \frac{(1.109)^{0.83}}{27.8}$$

$$f'_{cc} = 35.1 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{cc} = (0.002)(1 + 5(0.263)) = 0.00463$$

sonuçlarına ulaşılır.

Bu değerler (4.8) bağıntısında yerine koyulduğunda, çekirdek betonunun aksenal yük taşıma kapasitesine katkısı aşağıdaki şekilde bulunur:

$$A = 0.85(30625 - (314.16))(35.1) \left[2 \left(\frac{0.002}{0.00463} \right) - \left(\frac{0.002}{0.00463} \right)^2 \right]^{1/(1+2(0.263))} = 699.29 \text{ kN}$$

FRP ile kuşatılmış durumda, Örtü betonunun taşıma kapasitesine katkısını ifade eden B parametresinin son hali;

$$B = 0.85(A_c - A_{\text{çekirdek}}) f'_{cc} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^2 \right]^{1/(1+2K)}$$

şeklindedir.

Etriye çekirdek betonunun etrafında olduğu için kuşatma basıncı hesaplanırken örtü betonu için sadece FRP etkisi dikkate alınacaktır.

Bu durumda

$$f_{I_{TOPLAM}} = 0.903 \text{ MPa olmaktadır.}$$

Daha sonra , A bulunurken uygulanan işlemler benzer bir sırayla tekrarlanırsa;

$$k_1 = 6.7(0.903)^{-0.17} = 6.817$$

$$K = \frac{(6.817)(0.903)}{27.8} = 0.221$$

olarak bulunur. Bulunan bu değerler ile birlikte, (3.19) ve (3.20) bağıntılarıyla;

$$\frac{f'_{cc}}{27.8} = 1 + 6.7 \frac{(0.903)^{0.83}}{27.8}$$

$$f'_{cc} = 33.956 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_{cc} = (0.002)(1 + 5(0.221)) = 0.00421$$

sonuçlarına ulaşılır.

Ve (4.9) bağıntısında FRP kuşatması dikkate alınarak oluşturulan son bağıntıda bu değerler yerine konulursa örtü betonunun taşıma kapasitesine katkısı;

$$B = 0.85(40000 - 30625)(33.956) \left[2 \left(\frac{0.002}{0.00421} \right) - \left(\frac{0.002}{0.00421} \right)^2 \right]^{1/(1+2(0.221))} = 216.41 \text{ kN}$$

olarak elde edilir.

(4.10) bağıntısı yardımıyla bulunacak C değeri de aşağıdaki gibidir:

$$C = 342 \times 4 \times \pi \frac{10^2}{4} = 107.44 \text{ kN}$$

Son olarak, FRP'den kaynaklanan ve (4.25) bağıntısıyla gösterilen D parametresi hesaplanacaktır. D parametresi hesaplanırken, FRP malzemenin çekme değil, basınç özellikleri kullanılmaktadır. İncelenen örnekte FRP'nin basınç elastisite modülü ve basınç dayanımı değerleri belirtilmediğinden, kullanılan FRP türü için genel özelliklere bakılarak, yaklaşık olarak basınç elastisite modülü çekme elastisite modülünün %55i olarak alınmıştır. (ACI 440, 2000).

Bu durumda ;

$$D = 3 \times 0.55 \times 65000 \times 4 \times 200 \times 0.003 \times 0.304 = 78.25 \text{ kN}$$

olarak bulunur.

Bulunan A,B,C ve D değerleri toplandığında elde edilen normal kuvvet taşıma kapasitesi;

$$N = A + B + C + D = 699.29 + 216.41 + 107.44 + 78.25 = 1101.39 \text{ kN}$$

olarak bulunur.

Çizelge 4.3 Sonuçların karşılaştırılması

Numune	Deneyisel	Birinci Yöntem	İkinci Yöntem
CM1	1070 kN	1035.34 kN	1061.91 kN
CM2	1100 kN	1073.11 kN	1076.92 kN
CM3	1148 kN	1111.20 kN	1101.39 kN

4.3 Yapay Sinir Ağları İle Modelleme

İnsanlığın doğayı araştırma ve taklit etme çabalarının en son ürünlerinden bir tanesi, yapay sinir ağları (YSA) teknolojisidir. YSA, basit biyolojik sinir sisteminin çalışma şeklini simüle etmek için tasarlanan programlardır. Simüle edilen sinir hücreleri içerirler ve bu nöronlar çeşitli şekillerde birbirlerine bağlanarak ağı oluştururlar. Bu ağlar öğrenme, hafızaya alma ve veriler arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarma kapasitesine sahiptirler (Yurtoğlu,2005). Diğer bir ifadeyle, YSA'lar, normalde bir insanın düşünme ve gözlemlemeye yönelik doğal yeteneklerini gerektiren problemlere çözüm üretmektedir. Bir insanın, düşünme ve gözlemleme yeteneklerini gerektiren problemlere yönelik çözümler üretebilmesinin temel sebebi ise insan beyninin ve dolayısıyla insanın sahip olduğu yaşayarak veya deneyerek öğrenme yeteneğidir.

Biyolojik sistemlerde öğrenme, nöronlar arasındaki sinaptik bağlantıların ayarlanması ile olur. Yani, insanlar doğumlarından itibaren bir yaşayarak öğrenme süreci içerisine girerler. Bu süreç içinde beyin sürekli bir gelişme göstermektedir. Yaşayıp tecrübe ettikçe sinaptik bağlantılar ayarlanır ve hatta yeni bağlantılar oluşur. Bu sayede öğrenme gerçekleşir. Bu durum YSA için de geçerlidir. Öğrenme, eğitime yoluyla örnekler kullanarak olur; başka bir deyişle, gerçekleşme girdi/çıktı verilerinin işlenmesiyle, yani eğitime algoritmasının bu verileri kullanarak bağlantı ağırlıklarını bir yakınsama sağlanana kadar, tekrar tekrar ayarlamasıyla olur.

YSA'lar, ağırlıklandırılmış şekilde birbirlerine bağlanmış bir çok işlem elemanlarından (nöronlar) oluşan matematiksel sistemlerdir (Yurtoğlu,2005). Bir işlem elemanı, aslında sık sık transfer fonksiyonu olarak anılan bir denklemdir. Bu işlem elemanı, diğer nöronlardan sinyalleri alır; bunları birleştirir, dönüştürür ve sayısal bir sonuç ortaya çıkartır. Genelde, işlem elemanları kabaca gerçek nöronlara karşılık gelirler ve bir ağ içinde birbirlerine bağlanırlar; bu yapı da sinir ağlarını oluşturmaktadır.

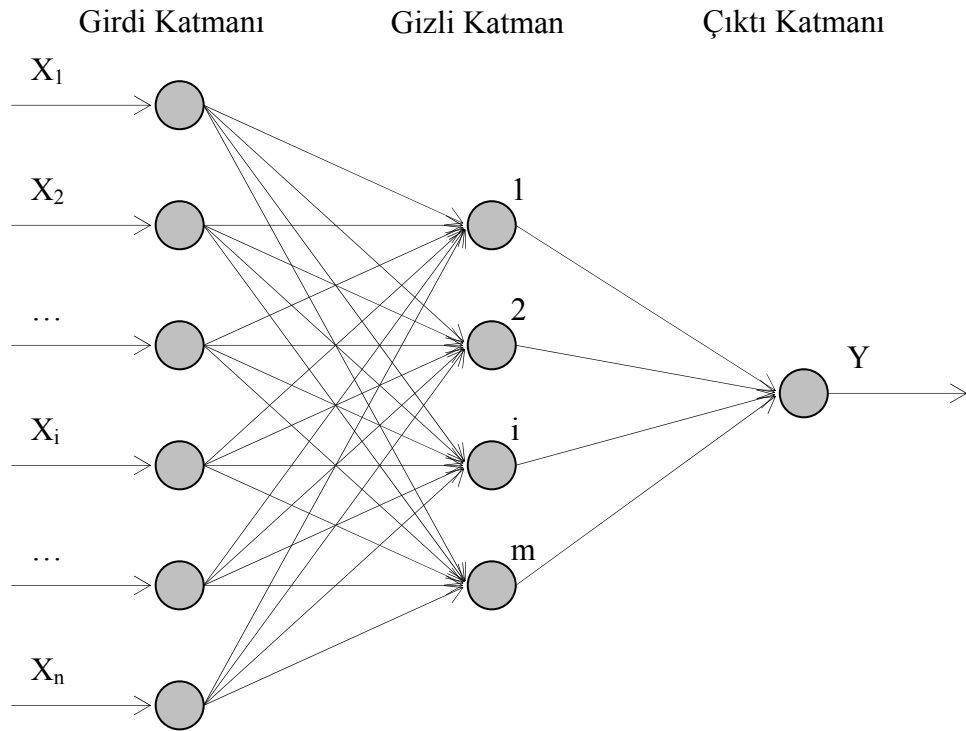
Sinir ağları yardımıyla hesaplamanın merkezinde dağıtılmış, adaptif ve doğrusal olmayan işlem kavramları vardır. YSA'lar, geleneksel işlemcilerden farklı şekilde işlem yapmaktadırlar. Geleneksel işlemcilerde, tek bir merkezi işlem elemanı her hareketi sırasıyla gerçekleştirir. YSA'lar ise her biri büyük bir problemin bir parçası ile ilgilenen, çok sayıda basit işlem elemanlarından oluşmaktadır. En basit şekilde, bir işlem elemanı, bir girdiyi bir ağırlık kümesi ile ağırlıklandırır, doğrusal olmayan bir şekilde dönüşümünü sağlar ve bir çıktı değeri oluşturur. İlk bakışta, işlem elemanlarının çalışma şekli yanıltıcı şekilde basittir. Sinir

ağları yardımıyla hesaplamanın gücü, toplam işlem yükünü paylaşan işlem elemanlarının birbirleri arasındaki yoğun bağlantı yapısından gelmektedir.

Çoğu YSA'da, benzer karakteristiğe sahip nöronlar tabakalar halinde yapılandırılırlar ve transfer fonksiyonları eş zamanlı olarak çalıştırılırlar. Hemen hemen tüm ağlar, veri alan nöronlara ve çıktı üreten nöronlara sahiptirler.

YSA'nın ana ögesi olan matematiksel fonksiyon, ağın mimarisi tarafından şekillendirilir. Daha açık bir şekilde ifade etmek gerekirse, fonksiyonun temel yapısını ağırlıkların büyüklüğü ve işlem elemanlarının işlem şekli belirler. YSA'ların davranışları, yani girdi ile çıktıları veriye nasıl ilişkilendirdikleri, ilk olarak nöronların transfer fonksiyonlarından, nasıl birbirlerine bağlandıklarından ve bu bağlantıların ağırlıklarından etkilenir (Yurtoğlu,2005).

Şekil 4.5'de tipik bir ileri beslemeli YSA gösterilmektedir. Bu modelde, girdi katmanı, gizli katman ve çıktı katmanı görülmektedir.



Şekil 4.5 Tipik yapay sinir ağları modeli

Girdi katmanı ve çıktı katmanı arasında ağırlıklandırma denilen bir işlem uygulanmaktadır. Ağırlıklar gelen girdilerin hücre üzerindeki etkisini belirler. Burada ağırlığın küçük olması gelen girdinin önemsiz olduğu anlamına gelmez , hatta ağırlığın 0 olması dahi gelen girdiyi en

önemli veri haline getirebilir. Ağırlıklar sabit veya değişken değerler olabilir. Gizli katmandaki her bir düğüm noktasında kullanılan modele göre seçilmiş bir fonksiyon yer almaktadır. Toplama fonksiyonu da denilen bu fonksiyon, girdilerin ağırlıklandırılmış değerleri üzerinden işlem yapar ve bu işlem sonucunu bir sonraki katmana iletir. En nihayetinde bir sonuç değeri bulunur.

Tipik bir yapay sinir ağı modelinde uygulanan fonksiyon aşağıdaki gibidir:

$$u_i = \varphi\left(\sum_{j=1}^n w_{ij}x_j - \theta_i\right) \quad (4.27)$$

Burada u_i , düğüm noktası çıktısını ifade etmektedir. w_{ij} , i nolu düğüm noktasındaki sinaptik ağırlık katsayısıdır. x_j girdi sinyali, θ_i düğüm noktasının başlangıç değeri ve φ transfer fonksiyonu ya da başka bir isimle aktivasyon fonksiyonudur. Bu fonksiyon hücreye gelen net girdiyi işleyerek hücrenin bu girdiye karşılık üreteceği çıktıyı belirler. Çıktıyı hesaplamak için değişik fonksiyonlar kullanılır. Toplama fonksiyonunda olduğu gibi her işlemci elemanının aynı fonksiyonu kullanabileceği gibi farklı aktivasyon fonksiyonları kullanmaları da mümkündür. Hangi aktivasyon fonksiyonunun problemi çözmede daha iyi bir çözüm sağlayacağı sorusu halen kesin bir cevaba sahip değildir, deneme yanılma yöntemi izlenmektedir.

4.3.1 YSA ile FRP uygulaması

Bu bölümde FRP ile kuşatılmış dikdörtgen kesitli kolonların eksenel yük taşıma kapasitesini verecek bir YSA modeli önerilmiştir. Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3 incelendiğinde, Çizelgelerde ikinci yöntem olarak geçmekte olan, M. Maalej, S. Tanwongswal ve P. Paramasivam (2002) tarafından önerilmiş bağıntılar yardımıyla uygulanan yöntemin, diğer yöntemden daha iyi sonuçlar vermekte olduğu görülebilir. Bu sebeple Yapay Sinir Ağları ile yapılacak modellemede bu yöntem esas alınmıştır.

YSA modellemesi için Neuro Solutions programı kullanılmıştır. Programın sunduğu alternatif YSA modelleri arasından Radial Basis Function (RBF) seçilmiştir. Gizli katmanlar içerisindeki düğüm noktalarında uygulanacak transfer fonksiyon ise programda Tanhaxon adıyla geçmekte olan tanjant hiperbolik fonksiyonudur.

Radial Basis Function, yani Radyal Temelli Fonksiyonlar, Yapay Sinir Ağları modelleri arasında, fonksiyon yaklaştırmada en mükemmel sonuçları veren ağlardır. Çok parametrelili sonuçlar için en uygunu olduğundan bu çalışmada RBF seçilmiştir.

Tanhaxon fonksiyonu, katman içerisindeki her düğüm noktasına tanjant hiperbolik fonksiyonu uygular. Bu durum, o katmandaki her düğüm noktasının değerinin -1 ile 1 arasında kalmasını sağlar.

$$f(x_i, w_i) = \tanh[x_i^{lin}] \quad (4.28)$$

Tanhaxon fonksiyonunun uygulanış şeklinin gösterildiği 4.28 bağıntısında x_i^{lin} , lineer akson'dan gelmektedir. x_i^{lin} , büyütme ve kopyalama katsayısıdır.

Tüm parametrelerin standartlarla belirlenmiş sınırlar içerisinde yer alması koşuluyla üretilmiş 50 set ile YSA modeli eğitilerek test verileriyle sonuçların tutarlılığı kontrol edilmiştir. Parametrelerin eksenel yük taşıma kapasitesine etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için kesit boyutları sabit tutulmuştur. Kesit 250 mm eninde ve 250 mm boyunda bir kare kesittir. Eksenel yük taşıma kapasitesinin bulunmasında gerekli olan parametreler ve bu parametrelerin değer aralıkları Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Bu Çizelgede, Şekil 4.5'de gösterilen girdi katmanında yer alacak veriler yer almaktadır. İlk sütunda, veri numarası bulunmaktadır.

Çizelge 4.5'de ise kullanılmış veri takımları gösterilmiştir. 50 adet veri setinden son 10 adedi, eğitim sonrası test amaçlı olarak kullanılmıştır.

Çizelge 4.4 Tasarım parametreleri

Tasarım	Parametre Adı	Tanım	Aralık
X_1	d	Pas Payı (mm)	20-40
X_2	r	Köşe Yarıçapı (mm)	10-50
X_3	ϕ_b	Boyuna donatı çapı (mm)	12-30
X_4	n_b	Boyuna donatı adedi	4-10
X_5	f_{y-b}	Boyuna donatı akma mukavemeti (MPa)	195-425
X_6	ϕ_e	Enine donatı çapı (mm)	8-20
X_7	f_{y-e}	Enine donatı akma mukavemeti (MPa)	195-425
X_8	s	Enine donatı aralığı	50-100
X_9	f_{c0}	Beton dayanım değeri (MPa)	20-60
X_{10}	ϵ_{FRP}	FRP birim deformasyon	0.003-0.005
X_{11}	$E_{FRP-\zeta}$	FRP çekme elastisite modülü (MPa)	35000-575000
X_{12}	E_{FRP-b}	FRP basınç elastisite modülü (MPa)	20000-300000
X_{13}	n_{FRP}	FRP katman sayısı	1-5
X_{14}	t_{FRP}	FRP katman kalınlığı (mm)	0.1-2
Y	N	Eksenel yük taşıma kapasitesi (kN)	1133-17121

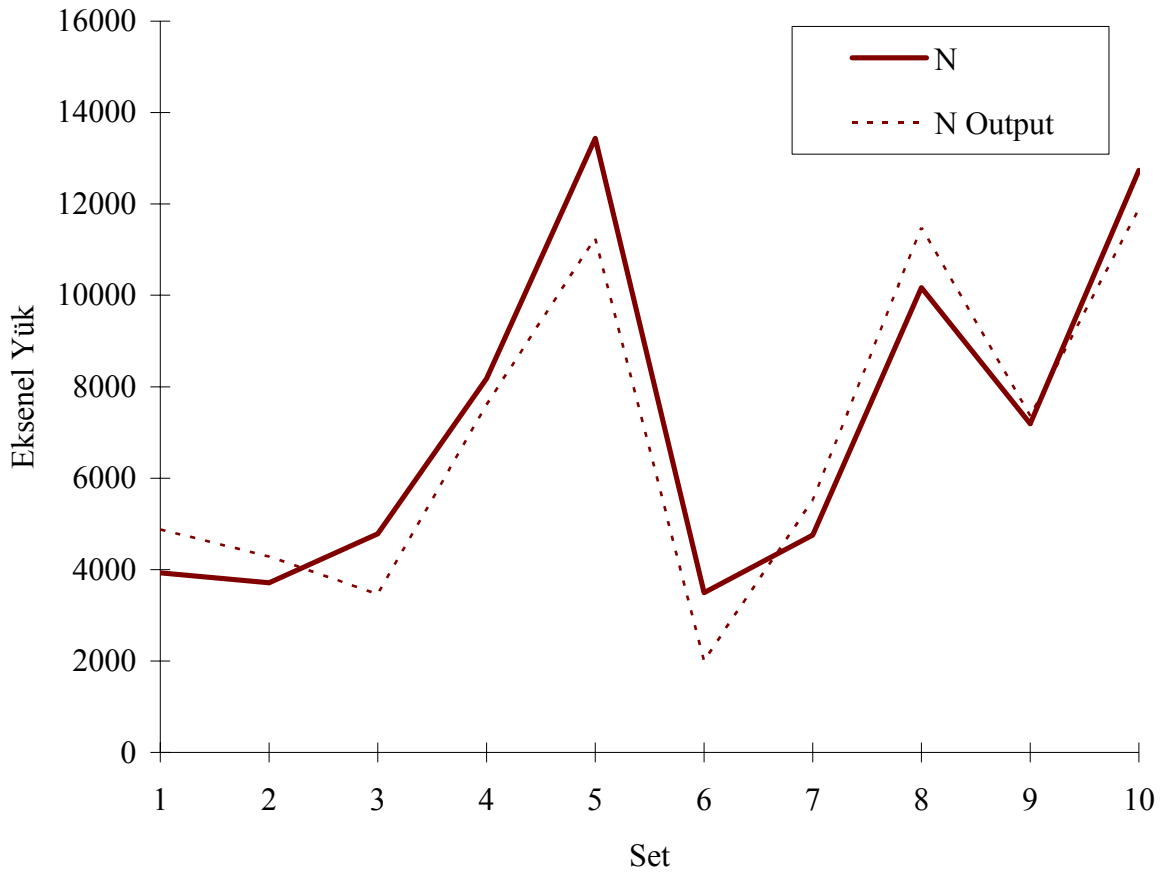
Çizelge 4.5 Kullanılan veri setleri

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	
Set No	d	r	ϕ_b	n_b	f_{y-b}	ϕ_c	f_{y-e}	s	f_{c0}	ϵ_{FRP}	$E_{FRP-\varphi}$	E_{FRP-b}	n_{FRP}	t_{FRP}	N
1	20	10	12	4	195	8	195	50	20	0.003	35000	20000	1	0.1	1133.82683
2	22	15	14	6	200	10	350	55	25	0.0032	50000	30000	2	0.2	1596.099365
3	24	20	16	8	250	12	300	60	30	0.0034	75000	50000	3	0.3	2209.105875
4	26	25	18	10	300	14	250	65	35	0.003	100000	35000	4	0.4	2885.458774
5	28	30	20	4	350	16	195	70	40	0.0036	125000	40000	5	0.5	3342.81778
6	30	35	22	6	400	18	400	75	45	0.0038	150000	100000	1	0.6	3755.387791
7	32	40	24	8	425	20	300	80	50	0.004	175000	87000	3	0.7	5575.171586
8	34	45	26	10	195	8	200	85	55	0.003	190000	115000	5	0.8	5950.966314
9	36	50	28	4	250	10	250	90	60	0.0042	220000	100000	2	0.9	4959.388836
10	38	12	30	8	350	12	425	95	24	0.0044	250000	150000	4	1	7778.260863
11	40	14	14	6	425	14	400	100	28	0.0046	278000	160000	1	1.1	3306.503858
12	25	16	16	10	195	16	350	50	32	0.003	300000	170000	2	1.2	4637.404675
13	20	18	18	4	200	18	250	60	36	0.0048	320000	180000	3	1.3	8682.215287
14	24	20	20	6	250	8	250	70	40	0.005	350000	190000	4	1.4	12576.14027
15	26	22	22	8	300	10	400	80	44	0.003	385000	200000	5	1.5	11802.19246
16	28	24	24	10	350	12	300	90	48	0.0032	400000	210000	1	1.6	5674.879502
17	32	26	26	4	400	14	250	100	52	0.0034	430000	220000	3	1.7	10925.99193
18	36	28	28	6	425	16	200	55	56	0.003	480000	230000	5	1.8	17121.26285
19	40	30	16	8	200	8	200	65	20	0.0036	500000	240000	2	1.9	9155.914531
20	25	32	18	10	300	10	195	75	25	0.0038	575000	300000	4	2	21956.36576
21	22	34	20	4	400	12	425	85	30	0.004	400000	200000	1	0.2	2394.349211
22	26	36	22	8	195	14	400	95	35	0.003	52000	30000	2	0.4	2499.721941
23	30	38	24	4	200	8	350	50	40	0.0042	80000	27000	3	0.6	2761.510745
24	34	40	26	6	250	10	300	55	45	0.0044	107000	60000	4	0.8	4532.445668
25	38	42	18	8	300	12	300	60	50	0.0046	133000	80000	5	1	6663.269496

Çizelge 4.5 (devam)

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	
Set No	d	r	ϕ_b	n_b	f_{y-b}	ϕ_c	f_{y-e}	s	f_{c0}	ϵ_{FRP}	$E_{FRP-\zeta}$	E_{FRP-b}	n_{FRP}	t_{FRP}	N
26	25	44	20	10	350	10	250	65	55	0.003	161000	112000	1	1.2	4288.893054
27	20	46	22	4	400	12	200	70	60	0.0048	184000	100000	3	1.4	7632.356342
28	22	10	24	6	425	10	425	75	24	0.005	203000	135000	5	1.6	11503.24373
29	24	15	14	8	195	12	425	80	28	0.003	227000	127000	2	1.8	4301.670595
30	26	20	16	10	200	10	400	85	32	0.0032	258000	150000	4	2	9289.214321
31	28	25	18	4	250	12	350	90	36	0.0034	312000	160000	1	0.3	2343.515744
32	30	30	20	6	300	8	300	95	40	0.003	330000	170000	2	0.6	3564.780446
33	32	35	22	6	400	10	300	100	44	0.0036	360000	180000	3	0.9	6689.370542
34	34	40	24	4	250	12	250	50	48	0.0038	390000	190000	4	1.2	10746.09184
35	36	45	18	8	350	14	200	60	52	0.004	403000	200000	5	1.5	17105.62447
36	38	50	20	10	195	16	195	70	56	0.003	431000	250000	1	1.8	5920.238432
37	40	10	30	4	200	18	200	80	60	0.0042	480000	230000	3	0.4	5252.37204
38	25	20	24	4	250	20	425	90	20	0.0044	42000	25000	5	0.8	2901.866161
39	20	30	26	8	300	8	350	100	25	0.0046	57000	25000	2	1.2	2999.252826
40	30	40	28	8	350	10	250	55	30	0.003	84000	50000	4	1.6	5068.243117
41	40	50	24	4	400	12	400	65	35	0.0048	111000	75000	1	2	3927.230935
42	25	15	22	6	425	14	195	75	40	0.005	167000	109000	2	0.5	3710.603619
43	20	25	20	8	200	16	425	85	45	0.003	191000	125000	3	1	4779.021994
44	25	35	18	10	300	18	300	95	50	0.0032	207000	140000	4	1.5	8175.549264
45	25	45	16	4	400	8	400	60	55	0.0034	229000	159000	5	2	13435.01147
46	20	12	18	6	195	10	350	70	60	0.003	260000	128000	1	0.4	3497.418872
47	20	18	14	8	250	12	300	80	24	0.0036	315000	198000	3	0.8	4750.804653
48	25	24	16	10	300	10	250	70	28	0.0038	320000	175000	5	1.2	10170.8148
49	30	30	18	4	350	12	200	80	32	0.004	400000	165000	2	1.6	7191.757928
50	25	28	22	6	200	10	195	90	36	0.003	350000	240000	4	2	12732.41363

Neuro Solutions programı ile bu veriler kullanılarak bir ağ modellenmiştir. Program, ilk 40 veri setiyle eğitilmiş , son 10 veri setiyle de test edilmiştir. Test sonucunda, uygulanan eğitim doğrultusunda bulunan sonuçlarla, analitik olarak bulunan sonuçlar Şekil 4.6’da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.6 Eksenel yük değerlerinin karşılaştırılması

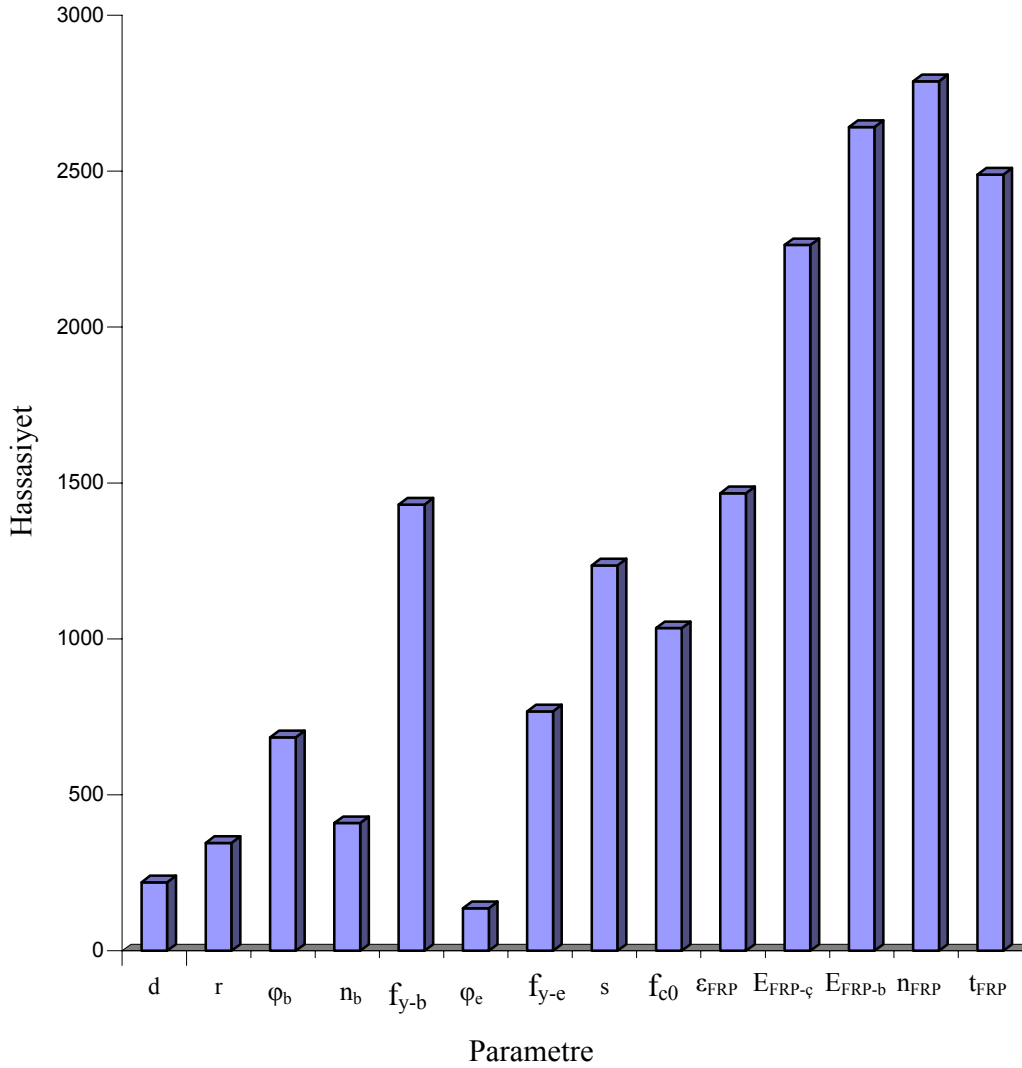
Şekilde kesikli çizgi ile, Yapay Sinir Ağı’nın belirlediği eksenel yük (N) değerleri, düz çizgi ile de, analitik yoldan bulunmuş eksenel yük (N output) değerleri gösterilmiştir. İki çizginin birbiriyle uyumlu bir şekilde ilerliyor oluşu, Yapay Sinir Ağı modelinin doğru kurulmuş ve sağlıklı işliyor olduğunu göstermektedir. Grafiğin yatay ekseninde test verisi numarası belirtilmiştir. Çizelge 4.5’deki 41~50 numaralı setler, burada 1’den 10’a kadar numaralandırılmıştır. Grafiğin düşey ekseninde ise kN cinsinden eksenel yük taşıma kapasitesi gösterilmektedir.

Çizelge 4.6’da 14 adet parametre ile modellenmiş Yapay Sinir Ağı’nın belirlediği eksenel yük değerleri ile analitik yoldan bulunmuş eksenel yük değerleri karşılıklı olarak tek tek gösterilmiştir. Maksimum hata % 42, minimum hata % 2’dir. Ortalama hata ise %17 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.6 Eksenel yük değerlerinin karşılaştırılması

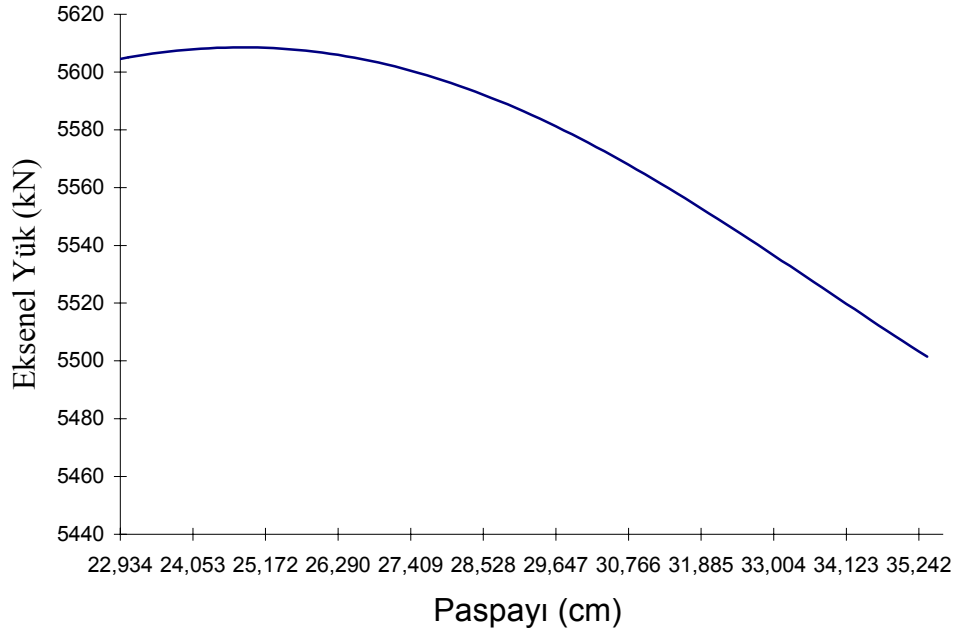
Set No	YSA İle Çözüm Sonucu (kN)	Analitik Çözüm Sonucu (kN)
1	4876.02	3927.23
2	4281.83	3710.60
3	3457.95	4779.02
4	7607.98	8175.55
5	11253.34	13435.01
6	1996.84	3497.42
7	5514.74	4750.80
8	11475.48	10170.81
9	7350.19	7191.76
10	11888.63	12732.41

Yapay Sinir Ağları yardımıyla eksenel yük taşıma kapasitesinin bulunması sırasında kullanılan 14 parametreden sonuca en çok etki edenlerini de belirlemek mümkündür. Bunun için Neuro Solutions programı menüsünden, “Sensitivity About The Mean” seçilip, buna göre test uygulanır. Yukarıda anlatılan örnek için, hassasiyet analizi yapıldığında Şekil 4.7’de de görülebileceği gibi, 8-9 değer diğerlerine göre daha etkin olduğu görülmektedir. Şekilde hassasiyet olarak isimlendirilmiş düşeyde yer alan değerler, her bir parametre için, verilerin standart sapmasının, çıktının standart sapmasına oranı ile elde edilmektedir.

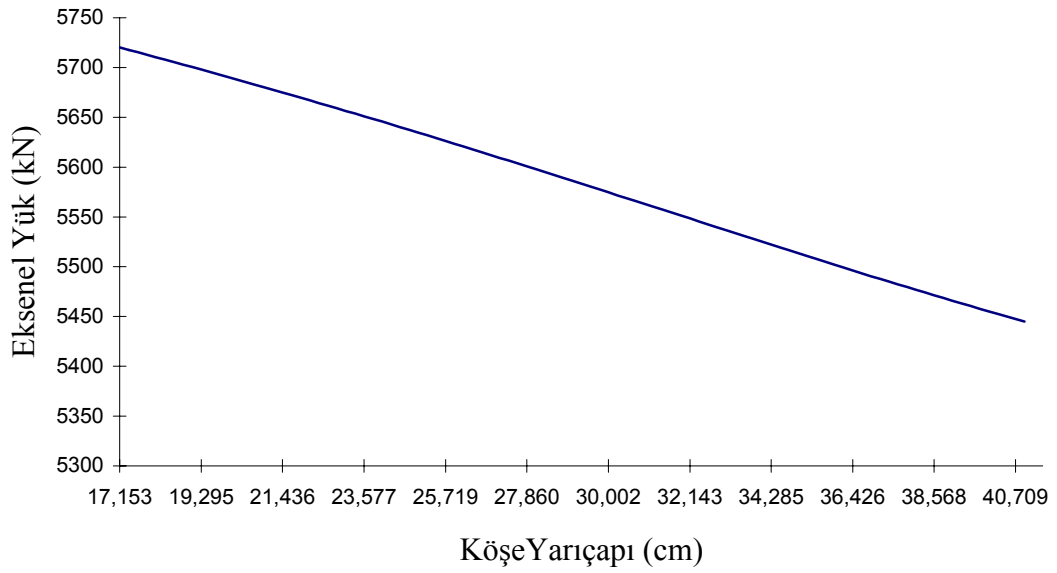


Şekil 4.7 Parametrelerin hassasiyetleri

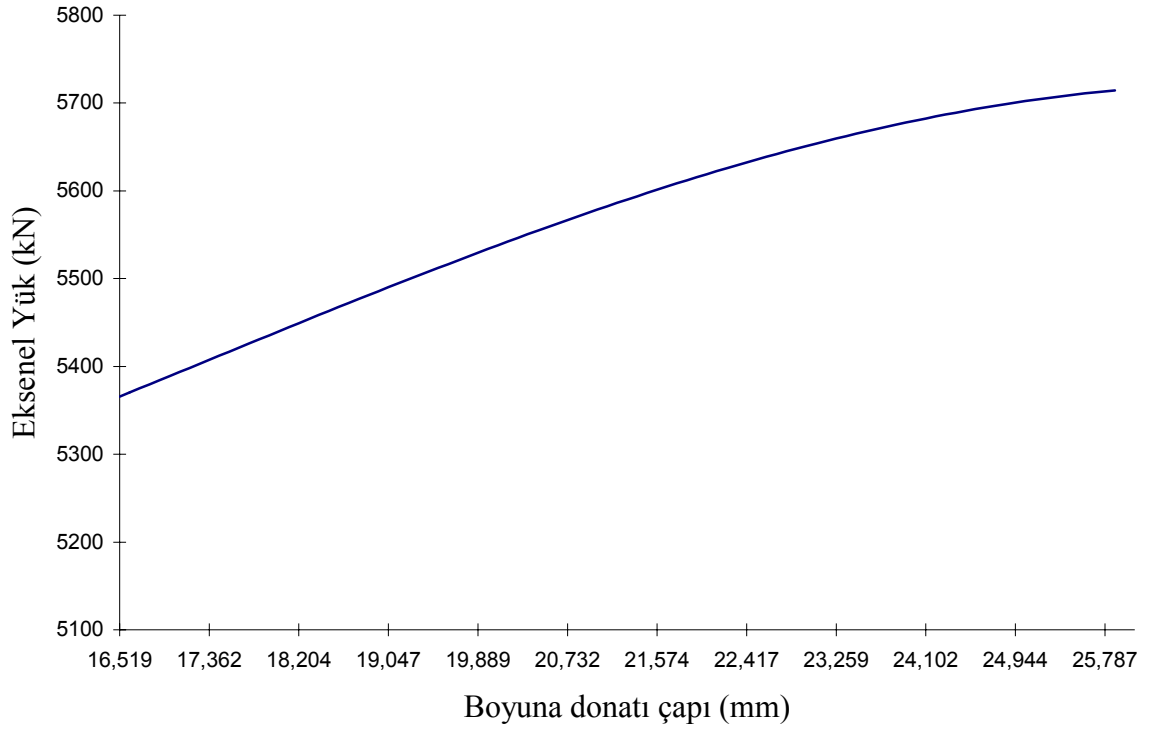
Tüm parametrelerin değişiminin aksenal yük taşıma kapasitesine etkisi de tek tek aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir. Bu grafiklerden kullanılan parametrelerin her birinin artması ya da azalması durumunda sonuca olan etkisi görülmektedir. Yapay Sinir Ağı modellenirken, değişik büyüklüklerdeki değerlerin bir arada sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi için öncelikle tüm parametreler, veri setleri içerisindeki maksimum değerlerine bölünmüş (normalize edilmiş), ve birbirine denk verilerle çalışabilmenin önü açılmıştır. Neuro Solutions programının çıktısı olarak alınabilecek aşağıdaki grafikler, sonradan dinormalize edilmiştir.



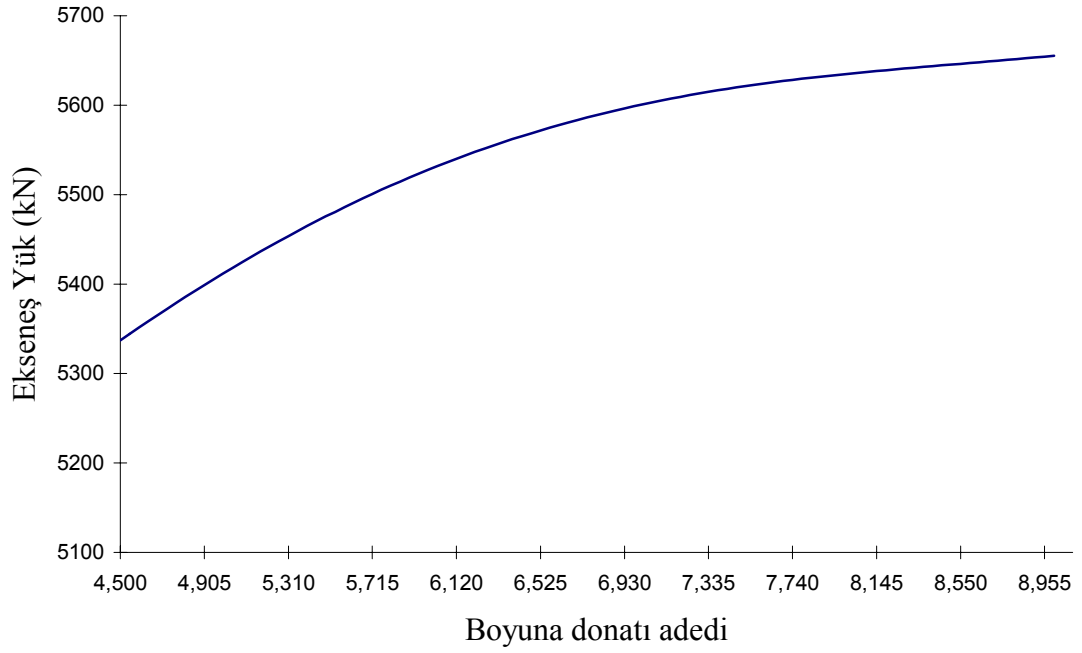
Şekil 4.8 Paspayı (d)-eksenel yük ilişkisi



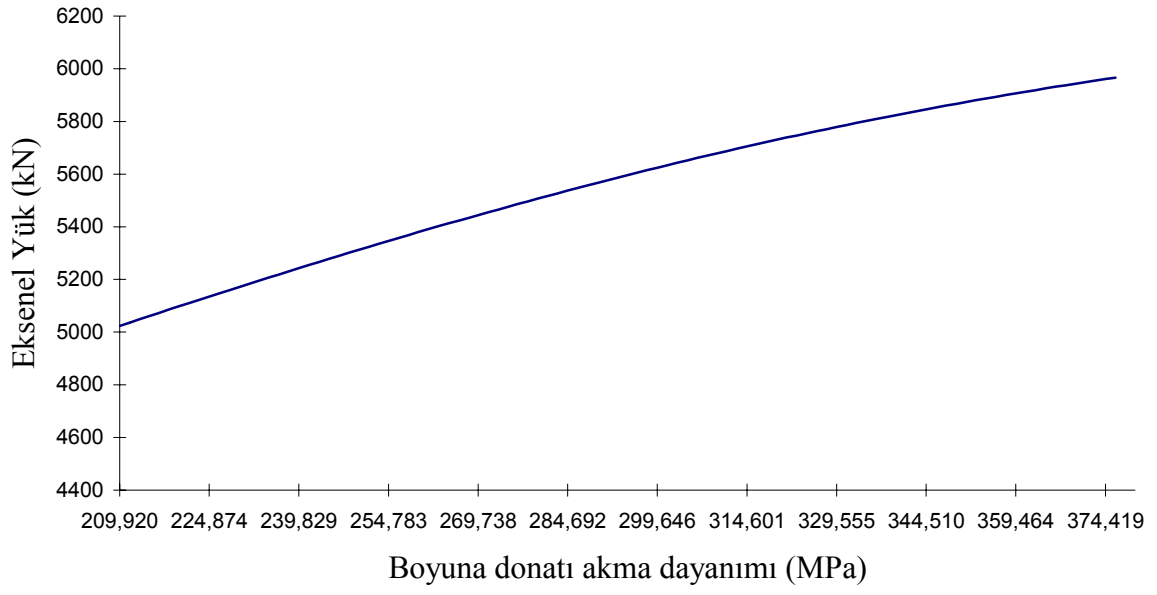
Şekil 4.9 Köşe yarıçapı (r)-eksenel yük ilişkisi



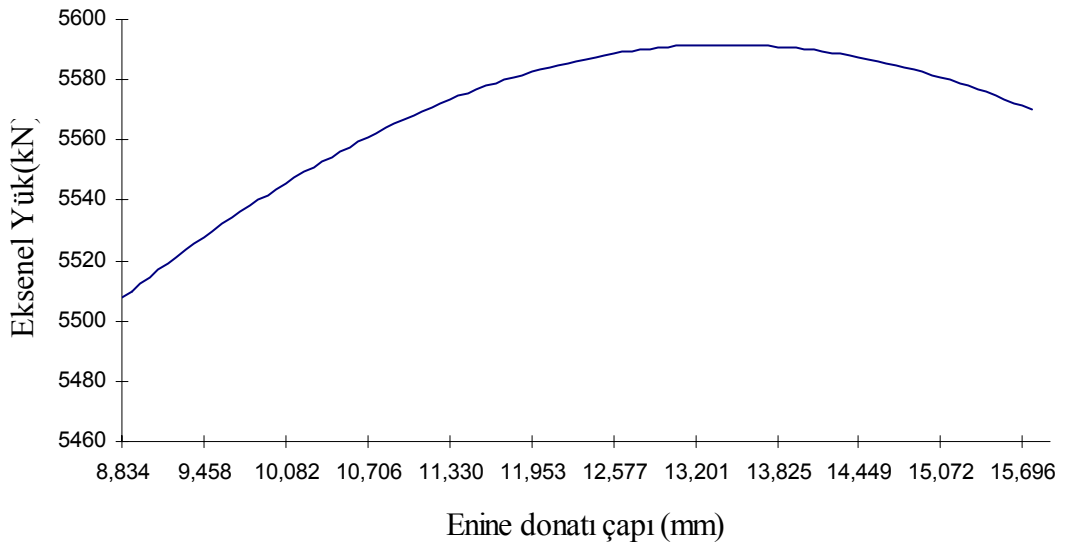
Şekil 4.10 Boyuna donatı çapı (ϕ_b) -eksenel yük ilişkisi



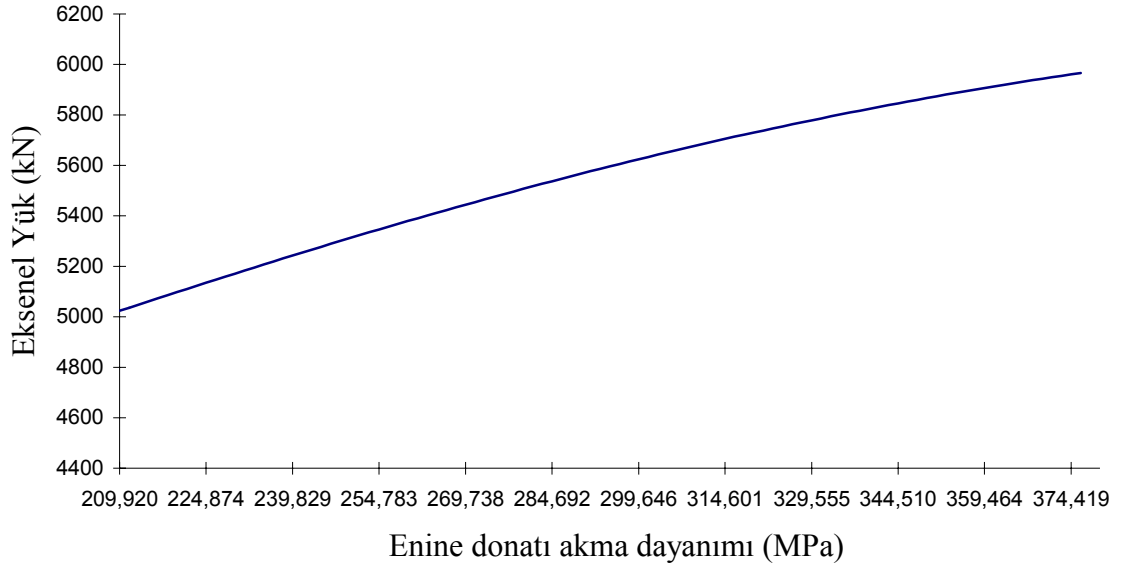
Şekil 4.11 Boyuna donatı adedi (n_b) -eksenel yük ilişkisi



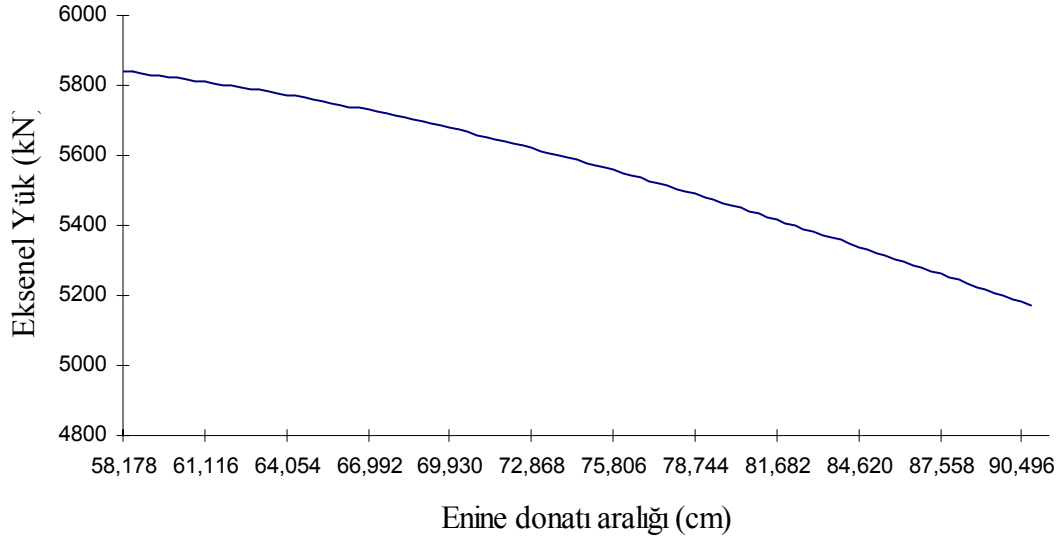
Şekil 4.12 Boyuna donatı akma dayanımı (f_{y-b}) -eksenel yük ilişkisi



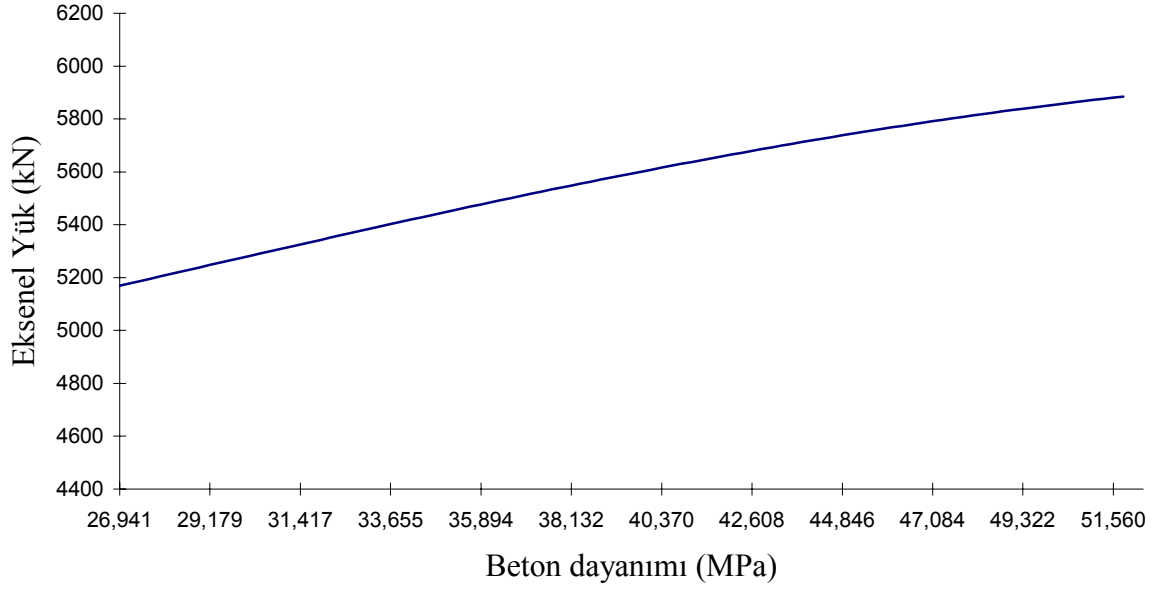
Şekil 4.13 Enine donatı çapı (ϕ_e) -eksenel yük ilişkisi



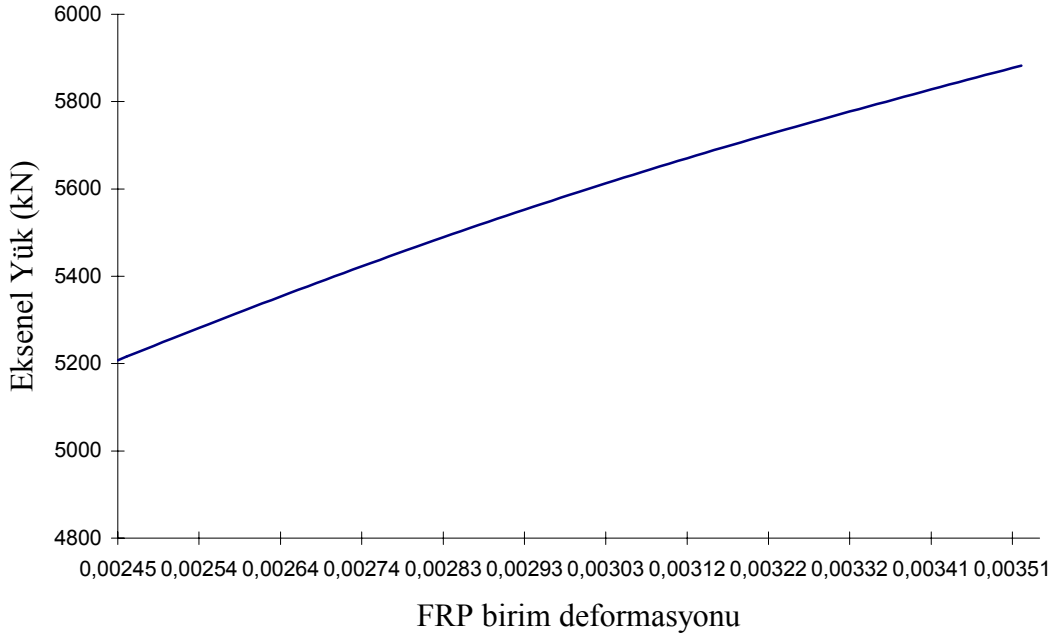
Şekil 4.14 Enine donatı akma dayanımı (f_{y-e}) – eksenel yük ilişkisi



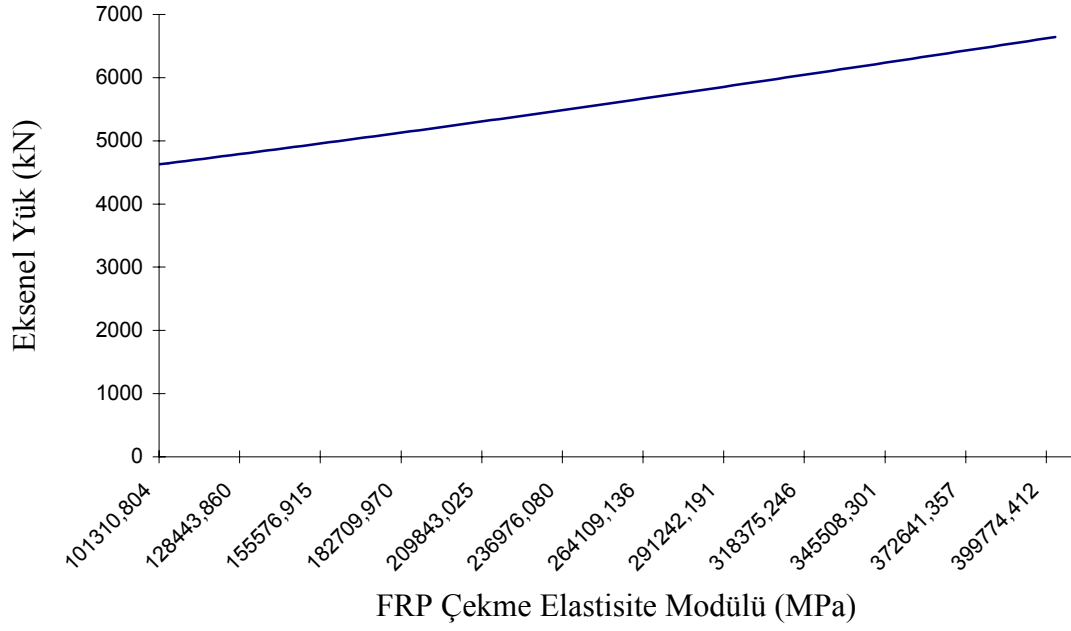
Şekil 4.15 Enine donatı aralığı (s) – eksenel yük ilişkisi



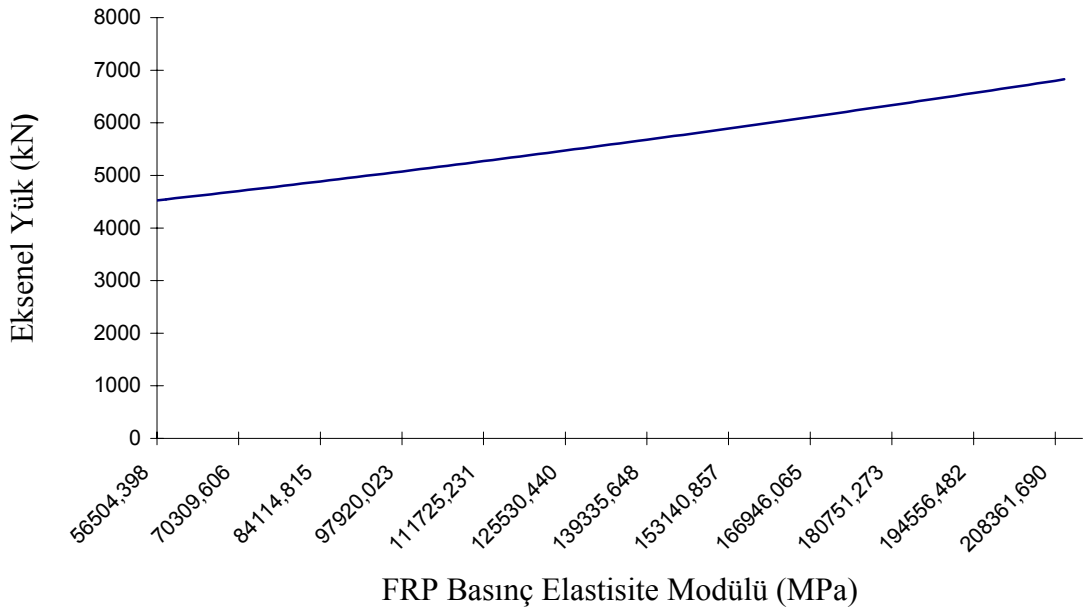
Şekil 4.16 Beton dayanımı (f_{c0}) -eksenel yük ilişkisi



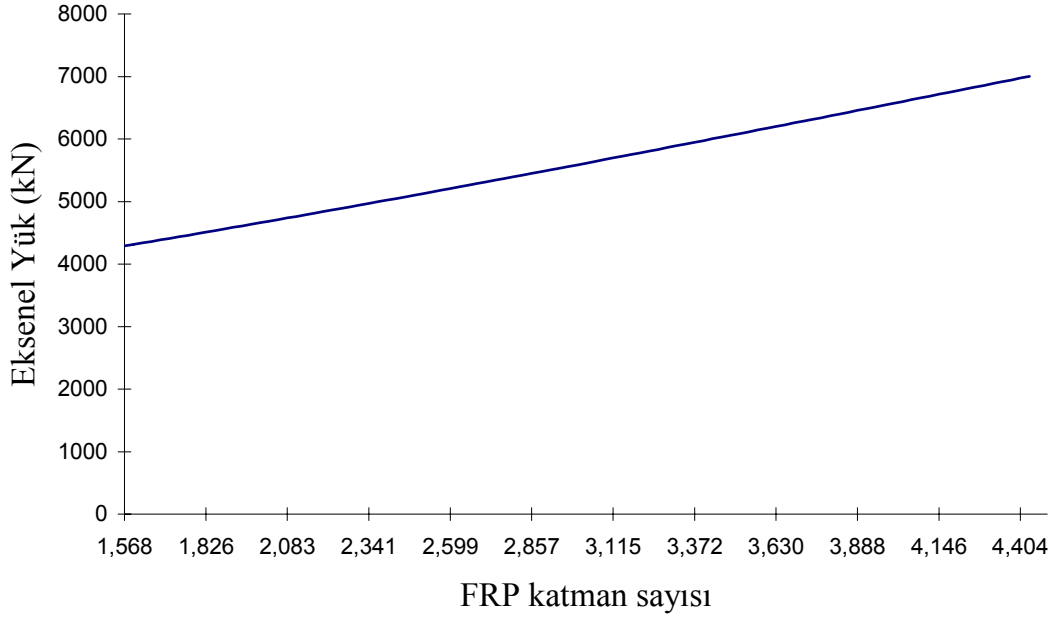
Şekil 4.17 FRP birim deformasyonu (ϵ_{frp}) - eksenel yük ilişkisi



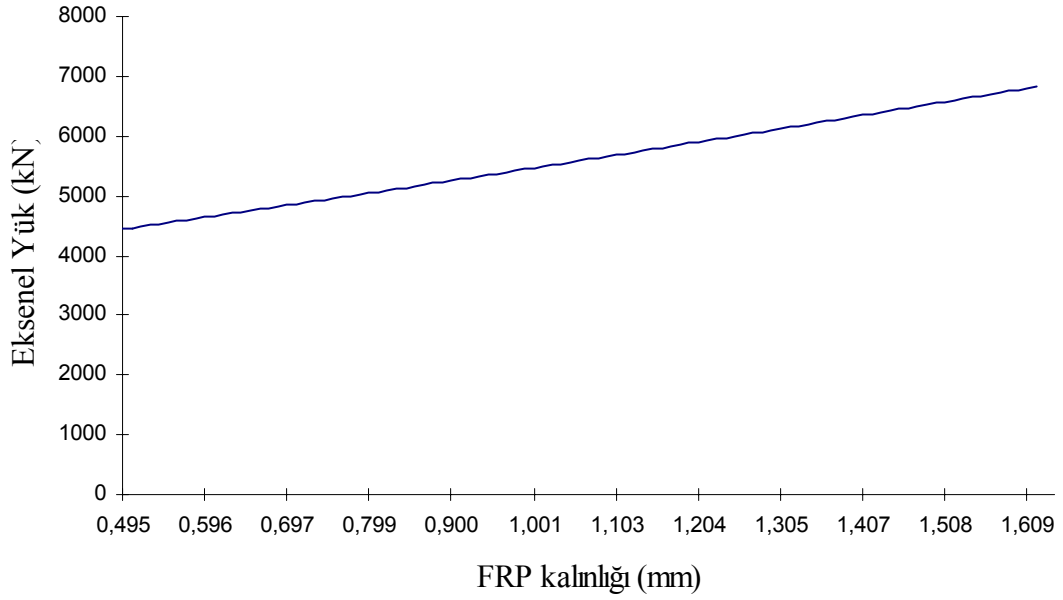
Şekil 4.18 FRP çekme elastisite modülü ($e_{FRP-ç}$)-eksenel yük ilişkisi



Şekil 4.19 FRP basınç elastisite modülü (e_{FRP-b})-eksenel yük ilişkisi



Şekil 4.20 FRP katman sayısı (n_{frp}) –eksenel yük ilişkisi

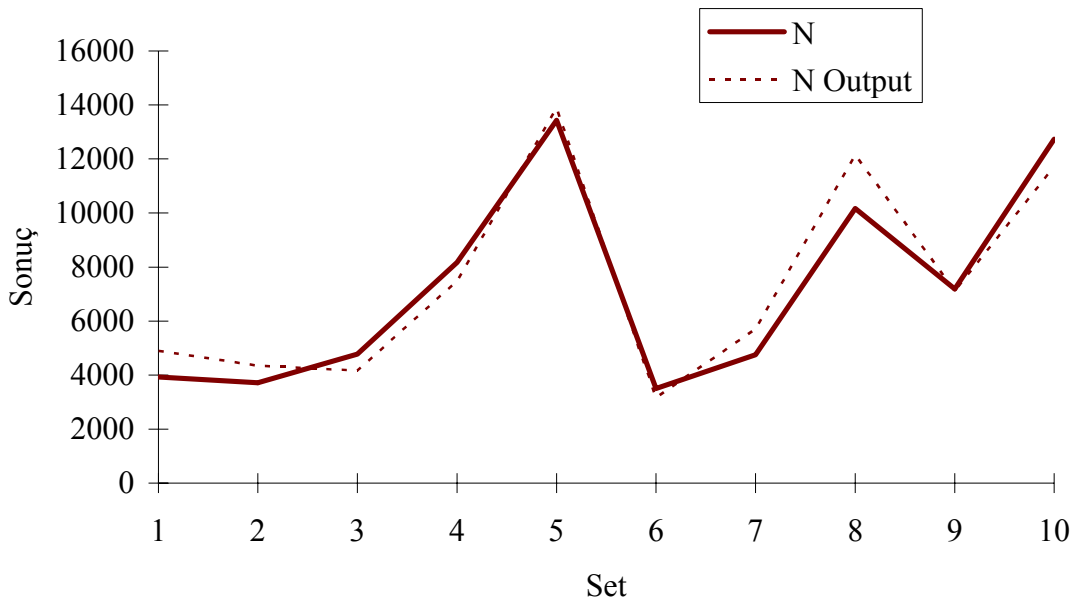


Şekil 4.21 FRP kalınlığı (t_{frp}) – eksenel yük ilişkisi

Bu grafiklerden, paspayı değerinin, köşe yarıçapının ve etriye aralığının artmasının eksenel yük taşıma kapasitesini azaltmakta olduğu görülmektedir. Şekil 4.13’de görüldüğü gibi, enine donatı çapı ile eksenel yük taşıma kapasitesi ilişkisi doğrusal değildir. Enine donatı çapı arttıkça eksenel yük taşıma kapasitesi bir değere kadar artmakta, daha sonra azalmaktadır. Enine donatı çapının arttırılması bir yerden sonra eksenel yük taşıma kapasitesini olumsuz yönde etkiler.

4.3.1.1 Azaltılmış Parametreler İle Çözüm

Şekil 4.7’de gösterilen hassasiyet değerlendirmesinden sonuca etkisi en fazla olan 8 parametre belirlenmiştir. Bunlar FRP kalınlığı, FRP katman sayısı, FRP çekme ve basınç elastisite modülleri, FRP birim deformasyonu, beton dayanımı, boyuna donatı dayanımı ve etriye aralığıdır. Sadece bu parametreler göz önüne alınarak kurulan Yapay Sinir Ağları modeline de Çizelge 4.5’de verilmiş 40 adet eğitime ve 10 adet test verisi uygulanmış, neticede analitik yöntemle ve Yapay Sinir Ağları ile bulunmuş N değerleri Şekil 4.22’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.22 Eksenel yük değerlerinin karşılaştırılması (azaltılmış veri ile)

Şekil 4.22’de kesikli çizgi ile gösterilen, Yapay Sinir Ağları modelinin ürettiği sonuç, düz çizgi olan ise analitik olarak bulunmuş sonuçtur. Sonuç son derece uyumlu olduğundan, seçilmiş parametrelerin bilinmesinin, FRP ile kuşatılmış dikdörtgen kesitli betonarme kolonlarda eksenel yük taşıma kapasitesinin bulunabilmesi için yeterli olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.7 Eksenel yük değerlerinin karşılaştırılması (azaltılmış parametre ile)

Set No	YSA İle Çözüm Sonucu (kN)	Analitik Çözüm Sonucu (kN)
1	4901.45	3927.23
2	4356.90	3710.60
3	4168.29	4779.02
4	7472.19	8175.55
5	13884.90	13435.01
6	3159.34	3497.42
7	5704.92	4750.80
8	12141.71	10170.81
9	7110.33	7191.76
10	11716.54	12732.41

Çizelge 4.7’de 8 adet parametre ile modellenmiş Yapay Sinir Ağı’nın belirlediği eksenel yük değerleri ile analitik yoldan bulunmuş eksenel yük değerleri karşılıklı olarak tek tek gösterilmiştir. Bu 8 parametre FRP kalınlığı, FRP katman sayısı, FRP çekme ve basınç elastisite modülleri, FRP birim deformasyonu, beton dayanımı, boyuna donatı dayanımı ve etriye aralığıdır. Maksimum hata, %20 olarak görülmüştür, minimum hata ise %1’dir. Ortalama hata %12.5’tir. Maksimum hatanın görüldüğü 8 numaralı set dışında, sonuçlar 14 parametrenin de kullanıldığı modele göre daha iyidir.

5. SONUÇ

FRP ile kuşatılmış kolonlarda kuşatma basıncının hesabı için önerilen matematiksel modeller arasından en kapsamlı sonuçları veren, Razvi ve Saatçioğlu tarafından önerilen modeldir. Daha sonra bu model kullanılarak elde edilmiş olan analitik bağıntılar içerisinde deneysel sonuca en yakın dayanımı bulan bağıntı belirlenmiştir. Bu bağıntı M. Maalej, S. Tanwongsva ve P. Paramasivam (2002) tarafından önerilen bağıntıdır. Yapay Sinir Ağları eğitiminde kullanılmış olan 40 adet eğitim verisi seti ve 10 adet test verisi seti için Eksenel Kuvvet Taşıma Kapasitesi değerleri M. Maalej, S. Tanwongsva ve P. Paramasivam'ın (2002) önerdiği bağıntıyla belirlenmiştir.

Yapay Sinir Ağları ile uygun model belirlendikten ve çalıştırıldıktan sonra, tüm parametrelerin sonuca olan etkileri tek tek incelenmiştir. Paspayı değerinin artırılması, çekirdek betonu alanını küçülteceğinden eksenel yük taşıma kapasitesinin azalmasına yol açmaktadır. Köşe yarıçapının artırılmasının da eksenel yük taşıma kapasitesini azaltmakta olduğu görülebilir. Boyuna donatı çapı, boyuna donatı adedi ve boyuna donatı akma dayanımının artmasının eksenel yük taşıma kapasitesini arttırmakta olduğu görülmektedir. Enine donatı çapı ile eksenel yük taşıma kapasitesi ilişkisi doğrusal değildir. Enine donatı çapı arttıkça eksenel yük taşıma kapasitesi bir değere kadar artmakta, daha sonra azalmaktadır. Enine donatı akma dayanımının artmasının da eksenel yükü arttırdığı görülmektedir. Etriye aralığı-eksenel yük ilişkisi incelendiğinde, etriye aralığının artmasının, kuşatma etkisini azaltacağından eksenel yük taşıma kapasitesi de azaltmakta olduğu görülür. Beton dayanımı, FRP birim deformasyonu, FRP çekme elastisite modülü, FRP basınç elastisite modülü, FRP katman sayısı ve FRP kalınlığının artırılması durumunda , eksenel yük taşıma kapasitesinin artacağı sonucuna ulaşılabilir.

Bu incelemelerden sonra lifle kuvvetlendirilmiş polimerlerle kuşatılmış dikdörtgen kesitli betonarme kolonların eksenel yük taşıma kapasitelerinin bulunması için gerekli olan 14 parametreden sonuca en çok etki edenler araştırılmıştır.

Neuro Solutions programının içerdiği hassasiyet analizleri yapılmış ve elde edilen grafikler üzerinden 8 adet parametre belirlenmiştir.

Belirlenen parametreler şunlardır:

- FRP kalınlığı
- FRP katman sayısı
- FRP çekme elastisite modülü
- FRP basınç elastisite modülü
- FRP birim deformasyonu
- Beton dayanımı
- Boyuna donatı dayanımı
- Etriye aralığı

Lifle Kuvvetlendirilmiş Polimerlerle kuşatılmış dikdörtgen kesitli betonarme kolonların eksenel yük taşıma kapasitesinin bulunması için bu 8 parametrenin yeterli olup olmadığı, Neuro Solutions programında yapılan test ile kontrol edilmiştir. Şekil 4.22’de görüldüğü gibi Yapay Sinir Ağları ile bulunan eksenel yük taşıma kapasitesi değerleri, analitik olarak elde edilmiş eksenel yük taşıma kapasitesi değerlerine yakın ve uyumlu sonuçlar vermiştir.

Bu durumda bu 8 parametrenin, eksenel yük taşıma kapasitesini bulmak için yeterli olduğu söylenebilir. Yapılacak deneysel çalışmalarda bu parametrelerin ölçülmesi Yapay Sinir Ağları yardımıyla eksenel yük taşıma kapasitesinin önceden tahmin edilmesine olanak sağlayacaktır. Ayrıca eksik veri sebebiyle ulaşılamayan taşıma kapasitesi değerlerini de bu çalışmada üretilmiş Yapay Sinir Ağları modeliyle hesap etmek mümkündür.

KAYNAKLAR

ACI 440, (2000). "Guide For The Design And Construction Of Concrete Reinforced With FRP Bars", American Concrete Institute, USA.

Alacali N. S., Akbas B. and Doran, B., (2006), Predicting Lateral Confinement Coefficient For R/C Rectangular Columns By A Neural Network Model, First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006.

Barbieri, E. (2002), "Composite Materials: High And New Technology For Ground Consolidation"

Becque, J., (2000), "Analytical Modelling of Concrete Columns Confined by FRP", Structural Engineering Division Department of Civil and Geological Engineering University of Manitoba Winnipeg, Manitoba, Canada

Esfahani, M.R., Kianoush M.R., (2004), "Axial Compressive Strength of Reinforced Concrete Columns Wrapped with FRP", 1st Conference on Application of FRP Composites in Construction and Rehabilitation of Structures, Tehran, Iran.

Feng, P., Lu, X.Z., Ye, L.P., (2002), "Experimental Research and Finite Element Analysis of Square Concrete Columns Confined by FRP Sheets Under Uniaxial Compression", Department of Civil Engineering, Tsinghua Univ., Beijing, China.

Hognestad, E. A. (1951), "A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members.", Bulletin 399, University of Illinois Engineering Experimental Station, Champaign.

ISIS Canada (2004), "An Introduction to FRP Strengthening of Concrete Structures", Principal Contributor: L.A. Bisby, Ph.D., P.Eng. Department of Civil Engineering, Queen's University Contributor: B.K. Williams

Kachlakev, D. Green, B. K. and Barnes, W. , (2000). "Behavior of Concrete Specimens Reinforced With Composite Materials", The Oregon Department of Transportation Research Group, Oregon.

Karbhari, V. M., and Gao, Y. (1997). .Composite jacketed concrete under uniaxialcompression . verification of simple design equations.. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 9(4), 185-193.

Koçak, A.R. (2005), "Betonarme Yapıların Lif Takviyeli Polimerler (FRP) ile Onarımı ve Güçlendirilmesi", İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Lorenzis, L.D., (2001), "A Comparative Study of Models on Confinement of Concrete Cylinders with FRP Composites", Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.

Maalej, M., Tanwongsva, S., Paramasivam, P., (2002), "Modelling of Rectangular RC Columns Strengthened with FRP", Department of Civil Engineering, The National University of Singapore, Singapore.

Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R. (1988), "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", ASCE Journal of the Structural Division, 114, No.8, 1804-1826 .

Monti, G., (2003), "Seismic Upgrade Of Reinforced Concrete Columns With FRP", Università La Sapienza di Roma, Italy.

Neuro Solutions for Excel, version 5.02

Okamoto, T., Matsubara, S., Tanigaki, M., and Jasuo, K. (1993). "Practical Application and Performance of PPC Beams Reinforced with Braided FRP Bars," *Proceedings Fiber-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures*, SP-138, A. Nanni, and C. W.Dolan, Eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp. 875-894.

Peker, Ö. (2005), "Düşük Dayanımlı Betonarme Elemanların CFRP ile Güçlendirilmesi", İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Richard, R.M., and Abbott, B.J. (1975). "Versatile elastic-plastic stres-strain formula." *J.Engrg. Mech.*, ASCE, 101(4), 511-515.

Saatçioğlu, M., Razvi, S.R., (1992), "Strength and Ductility of Confined Concrete", *ASCE Journal of the Structural Division*, 118, No.6, 1590-1607.

Sakashita, M., Masuda, Y., Nakamura, K., Tanano, H., Nishida, I., and Hashimoto, T., (1997). "Deflection of Continuous Fiber Reinforced Concrete Beams Subjected to Loaded Heating," *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, V. 2, pp. 51-58.

Samaan, M., Mirmiran, A., and Shahawy, M.(1998). "Modelling of concrete confined by fiber composites." *J. Struct. Engrg.*, ASCE, In Press.

Shahawy, M., Beitelman, T., Mirmiran, A., (1998), "Analysis and Modelling of Fiber-Wrapped Columns and Concrete-Filled Tubes", *Structural Research Center The Florida Department of Transportation Tallahassee, Florida ,USA*.

Taerwe, L. R., (1993), "FRP Development and Applications in Europe," *Reinforcement for Concrete Structures: Properties and Applications*, A. Nanni, ed., Elsevier Science, pp. 99-114.

Toutanji, H. A., (1999), "Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets", *ACI Materials Journal*, V.96, No.3, May-June 1999, 397-403.

Yalçın, C., Saatçioğlu M., "Inelastic analysis of reinforced concrete columns". *Comput Struct* 2000; 77:539-55.

Yıldırım, T. (2005), "Nöron Ağları Ve Uygulamaları ders notları", Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Bölümü, İstanbul.

Yurtoğlu, H. (2005), "Yapay Sinir Ağları Metodolojisi İle Öngörü Modellemesi: Bazı Makroekonomik Değişkenler İçin Türkiye Örneği", *Ekonomik Modeller Ve Stratejik Araştırmalar Genel Müdürlüğü*, Ankara.

EKLER

EK 1 YSA Modeli CD'si

EK 1 YSA Modeli CD'si

Çalışmada kullanılan, Neuro Solutions for Excel programı ile üretilmiş Yapay Sinir Ağları modeli, bir cd içerisinde ekte sunulmuştur.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 21.11.1979

Doğum yeri Safranbolu

Lise 1992-1996 Küçükçekmece Orhan Cemal Fersoy Lisesi

Lisans 1996-2001 Yıldız Üniversitesi İnşaat Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2001-2006 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Programı

Çalıştığı kurumlar

2001-2003 Hamim Mimarlık.
2006-Devam ed. Standart Yapı Denetim Hizm. Ltd. Şti.