



T.C.
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü

**LİFLİ POLİMERLE GÜÇLENDİRİLEN
BETONARME YAPI ELEMANLARININ
KAPASİTE HESABI İÇİN ANALİTİK
YÖNTEMLER
Kasım POLAT**

Yüksek Lisans Tezi



T.C

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**LİFLİ POLİMERLE GÜÇLENDİRİLEN BETONARME
YAPI ELEMANLARININ KAPASİTE HESABI İÇİN
ANALİTİK YÖNTEMLER**

Kasım POLAT

Doç. Dr. Babür DELİKTAŞ
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MEKANİK ANABİLİM DALI
BURSA - 2014

TEZ ONAYI

Kasım Polat tarafından hazırlanan “**Lifli Polimerle Güçlendirilen Betonarme Yapı Elemanlarının Kapasite Hesabı İçin Analitik Yöntemler**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekanik Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Babür DELİKTAŞ

Başkan : Doç. Dr. Babür DELİKTAŞ

U. Ü. Mühendislik Fakültesi

U.Ü.Mekanik Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Adem DOĞANGÜN

U. Ü. Mühendislik Fakültesi

U. Ü. Yapı Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. H. Orhun KÖKSAL

Ç.O.M.Ü. Mühendislik Fakültesi

Ç.O.M.Ü. Yapı Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım
Prof. Dr. Ali Osman DEMİR
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

U.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim

12.06.2014

Kasım Polat

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi
**LİFLİ POLİMERLE GÜÇLENDİRİLEN BETONARME YAPI
ELEMANLARININ KAPASİTE HESABI İÇİN ANALİTİK YÖNTEMLER**

Kasım POLAT
Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Babür DELİKTAŞ

Mevcut yapıların değişen yönetmeliklere uyumluluklarının sağlanması, çeşitli dış etkilerle kullanımları süresince doğabilecek ilave yüklere hazırlıklı hale getirmek için güçlendirilme sıklıkla başvurulan bir yöntem olmuştur. Bu etkiler altında yük taşıma kapasiteleri gittikçe azalan yapı elemanlarının ve yapı sisteminin onarım ve güçlendirilmesine ihtiyaç duyulabilmektedir. Karbon lifli polimerler, onarım ve güçlendirme amacı için yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. Lifli polimer ile yapı elemanlarının (kolon, kiriş, döşeme) kesme ve eğilme kapasiteleri iyileştirilebilmektedir. Kesme ve eğilme kapasitesi iyileştirilen yapı elemanları daha sünek davranabilmekte dolayısıyla daha fazla enerjiyi sönmüleme gücüne erişebilmektedir. Ayrıca CFRP nin kullanımı, mimari olarak yapıda alan kaybına sebep olmamakta, kullanımı daha risksiz ve kolay olmaktadır.

Bu tez çalışmasında Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkındaki Yönetmelik (DBYBHY, 2007) bağıntıları kullanılarak; (i) kolonların aksel basınç dayanımlarının artırılması (7E.2), (ii) kolonların sünekliğinin artırılması (7E.3), (iii) kolonların yetersiz bindirme boyu için sargılama (7E.4) gibi hesaplar yapıldı.

Ayrıca bu çalışma kapsamında, TDY2007’de betonarme kirişlerin kesme ve eğilme davranışlarının iyileştirilmesi için herhangi bir önerenin bulunmamasından dolayı, TS500 esaslarına göre denge ve uygunluk denklemleri kullanılarak çift donatılı ve tablasız kirişler için eğilme ve kesme kapasitelerinin hesaplanması için analitik yöntemler geliştirildi. Elde edilen analiz sonuçları deneysel verilerle karşılaştırıldı.

Lifli polimerler kullanılarak yapılacak iyileştirmelerin ACI-440 R2 ve FIB tarafından önerilen azaltma katsayılarından birini kullanılarak daha güvenli tarafta kalınacağı ve arzu edilen güvenli güçlendirme kapasitelerine çok rahat ulaşılabileceği gösterildi. Kolonlar için de yapılacak FRPli güçlendirmelerde ise deneysel sonuçlara göre daha konservatif sonuçların elde edildiği dolayısıyla yönetmelik formüllerinin hiçbir azaltma katsayısı kullanılmadan kullanılabileceği gösterildi.

Anahtar Kelimeler: FRP, betonarme kiriş ve kolon, güçlendirme, analitik modelleme, eğilme, aksel kuvvet, süneklik, kesme dayanımı, bindirme boyu.

2014, xi + 89 sayfa

ABSTARCT

MSc Thesis

ANALYTICAL MODEL FOR REINFORCING CONCRETE MEMBERS WITH USING FRP

Kasım POLAT

Department of Civil Engineering

Uludağ University

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Babür DELİKTAŞ

The strengthening is a frequently applied method in order to make the existing structures to be compatible with the varying code regulations and ready to stand against the additional loads due to external effects during their service life. Under these effects the repairing and strengthening might be needed for the structural members that lose their load bearing capacity by time. The carbon reinforced polymer composites are most commonly used materials for the purpose of repairing and strengthening. The flexural and shear capacities of the structural members (beams, columns, slabs) can be improved. with the carbon reinforced polymer composites. The increased load bearing capacities of the flexural and shear structural members lead structural systems to behave more ductile. This, in turn, provides structural systems to have a better energy absorption capacity. Furthermore, from architectural point of view, the use of FRPs will not cause loss of area in the structure, is easy to use and carries no risk.

In this thesis work using the analytical relations provided by Turkish Seismic Design Code (DBYBHY, 2007) for the buildings constructed in the seismic zones, the following capacity calculations; i) increasing axial compression strengths of columns ii) increasing ductility of columns iii) wrapping of the insufficient lap length of concrete were made. The flexural and shear capacity of the double reinforced beams were calculated using equilibrium and compatibility equations based on TS500 regulations since there have been no suggestions made in TDY2007 for the improvement of flexural and shear capacities for the beams. The obtained results were then compared with those of available experiments.

It is shown that the performed improvement by the use of FRPs provides to be on safer side and to reach easily to the intended reliable strengthen capacities in case of using one of the reduction coefficient proposed by ACI-440 R2 and FIB. Since the performed FRP strengthening of columns have more conservative results with respect to experimental ones there is no need to use any reduction coefficients in the formulations of the design code.

Keywords: FRP, RC beam, column, retrofitting, analytical modeling, flexure, axial forces, ductility, shear resistance, lap splice

2014, xv + 88 pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında teşvik edici yardım, yönlendirme ve desteklerinden dolayı değerli hocam sayın Doç. Dr. Babür Deliktaş'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tezin hazırlanması sürecinde bana çok değerli vakitlerini ayırarak teorik bilgilendirme, bilimsel katkı, teşvik ve yönlendirmede bulunarak hızlıca yol almamı sağlayan, beni cesaretlendiren Çanakkale On sekiz Mart Üniversitesi bölüm başkanı çok değerli hocam sayın Prof. Dr. Hasan Orhun Köksal'a katkıları için ayrıca minnettarım.

Bu çalışmada ayrıca konu ile ilgili bilgi ve kaynak paylaşımında özverili yaklaşımından dolayı bölüm başkanımız değerli hocam sayın Prof. Dr. Adem Doğangün'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sonlu eleman modellerini kurarak çalışmamda gösterdiği katkıdan dolayı Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi'nden Arş. Gör. Selen Aktan'a teşekkür ederim.

Lifli polimer uygulamaları hakkında sağladığı destek ve deneyimlerini büyük bir özveri ile paylaşan ve bu konudaki sorularımı sözlü ve yazılı olarak devamlı cevaplama gayretini ve samimiyetini gösteren meslektaşım Fyfe Europe'dan sayın İnş.Yük.Müh. Bayram Aygün'e çok teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca desteklerini ve şefkatini esirgemeyen, teşvik eden rahmetle ve minnetle yad ettiğim babama ve hala varlığı ile güven duyduğum anneme canı gönülden teşekkür ederim.

Bu süreçte vaktimi esirgediğim, yeterince ilgilenemediğim çok değerli kızlarım Hazel ve Ayşenaz Polat'a teşekkür ederim.

Kasım POLAT

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
TABLolar DİZİNİ	vii
SEMBOLLER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
1.GİRİŞ	1
1.1.Genel	1
1.2 Literatür Taraması	3
2. ONARIM VE GÜÇLENDİRME	10
2.1 Onarım ve Güçlendirme Hakkında Genel Bilgiler	10
2.2. Neden Onarım ve Güçlendirme	10
2.3. Kompozitlerin Kullanım Alanları	14
2.4.Kompozit Malzemelerin Uygulanması	15
2.5. Lifli Kompozitlerin Uygulama Projesinin Detaylandırılması	16
3.MATERYAL VE METOT	18
3.1.Betonarme Kirişler	18
3.1.1 Betonarme Kiriş Taşıma Kapasitesi Hesabı	20
3.1.2. Nihai Taşıma Kapasitesi Hesabı	22
3.2. Kirişlerin Kesme Dayanımlarının Arttırılması	25
3.3. Kolonların Eksenel Basınç Dayanımlarının Arttırılması	27
3.4. Kolonların Sürekliliğinin Arttırılması	28
3.5. Kolonlarda Yetersiz Bindirme Boyu İçin Sargılama	29
4.ANALİTİK DENKELEMLER İLE KAPASİTE HESAPLARI	31
4.1.Lifli Polimer Sargılı Kirişin Taşıma Moment Kapasitesi Hesabı	31
4.2. Kiriş Kesme Dayanımının Arttırılması Hesabı	36
4.3. Kolonların Eksenel Basınç Dayanımlarının Arttırılması	38
4.4. Kolonların Sürekliliğinin Arttırılması	40
4.5. Kolonların Yetersiz Bindirme Boyu İçin Sargılama	40

5.DENEYSEL VE ANALİTİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	43
5.1.Betonarme Deneş Kiriş Eğılme Test Sonuçlarının Analitik Sonuçlar İle Karşılaştırılması	43
5.2.Betonarme Deneş Kolonu Basınę Test Sonuçlarının Analitik Sonuçlar İle Karşılaştırılması	56
5.3.Betonarme Deneş Kiriş Eğılme Test Sonuçlarının Analitik Sonuçlar İle Karşılaştırılması	70
6. SONUÇLARIN DEğERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER	79
6.1.Betonarme Kiriş Eğılme Moment Kapasitesi İçin Sonuçların Değerlendirilmesi	79
6.2. Betonarme Kolon Basınę Dayanım Sonuçlarının Değerlendirilmesi	80
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	89

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

CFRP	Karbon esaslı lifli polimer
DBYBHY	Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik
GFRP	Cam esaslı lifli polimerler
AFRP	Aramid esaslı lifli polimerler
FRP	Lifli Polimer

TABLULAR DİZİNİ

Tablo2.1. Matriks, Takviye Elemanı ve Kompozit Yapı Tipleri	13
Tablo 2.2. Karbon Fiberlerin Mekanik Özellikleri	13
Tablo 2.3. Cam Fiberlerin Mekanik Özellikleri	14
Tablo 2.4. Aramid Fiberlerin Mekanik Özellikleri	14
Tablo 4.1 Mevcut Betonarme Kiriş GeometrikÖzellikleri	31
Tablo 4.2. Betonarme Kiriş Mukavemet Özellikleri	32
Tablo 4.3. Çelik Donatısı Mukavemet Özellikleri	32
Tablo 4.4. Karbon Fiber Mukavemet Özellikleri	32
Tablo4.5. Kiriş Geometrik Özellikleri	36
Tablo4.6. Betonarme Kiriş Mukavemet Özellikleri	36
Tablo4.7. Çelik Donatısı Mukavemet Özellikleri	37
Tablo4.8. Karbon Fiber Mukavemet Özellikleri	37
Tablo4.9. Karbon Fiber Mukavemet Özellikleri	39
Tablo 4.10. Kullanılan Malzeme Ve Kesit Geometrik Özellikleri	41
Tablo 5.1. Betonarme Deney Kirişinin Güçlendirme Şekilleri	44
Tablo 5.2. Betonarme Deney Kirişinin Ve Güçlendirme Malzemelerinin Özellikleri	45
Tablo 5.3. Deney Kirişinde Elde Edilen Göçme Kuvvetleri Ve Göçme Modları	46
Tablo 5.4. Deneysel Ve Analitik Kuvvet Sonuçlar	65
Tablo 5.5. Deney Kolon Numunelerine Ait Özellikler ve Basınç Dayanımları	72
Tablo 6.1. Eşit Deplasman İçin Kirişlerin Yük Taşıma Kapasiteleri	80
Tablo 6.2. Deney Sonuçları İle Analitik Sonuçların Mevcut Basınç Dayanıma Oranı Ve Artış Miktarı	81

SEMBOLLER DİZİNİ

A_{s1}	Çekme bölgesindeki toplam donatı alanı
A_{s2}	Basınç bölgesindeki toplam donatı alanı
A_f	Lifli polimer enkesit alanı
d_1	Çekme bölgesi paspayı
d_2	Basınç bölgesi paspayı
n	Lifli polimer katman sayısı
t_f	Lifli polimer enkesit kalınlığı
b_f	Lifli polimer enkesit genişliği
b	Kiriş genişliği
h	Kiriş derinliği
d	Kiriş faydalı yüksekliği
x_0	Çatlamış kesit tarafsız eksen derinliği
x	Lifli polimer uygulanmış kesitin tarafsız eksen derinliği
c	Eşdeğer basınç bloğu derinliği
E_c	Betonun elastisite modülü
E_f	Fiberin elastisite modülü
E_s	Çelik elastisite modülü
ϵ_{cu}	Betondaki maksimum birim kısalma
ϵ_{co}	Servis yükleri altında basınç bölgesi birim kısalma
ϵ_o	Servis yükleri altında çekme bölgesi birim uzama
ϵ_{s2}	Basınç bölgesi çeliğin birim uzaması
ϵ_{s1}	Çekme bölgesi çeliğin birim uzaması
ϵ_{sy}	Çeliğin tasarım akma uzaması
ϵ_{fu}	Fiberin kopma uzaması
ϵ_{flimit}	Fiberin limit uzama değeri
f_{ck}	Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_{ctd}	Betonun hesap çekme dayanımı
f_{cd}	Betonun tasarım basınç dayanımı
f_{yk}	Donatı çeliğinin karakteristik akma dayanımı
f_{yd}	Donatı çeliğinin tasarım akma dayanımı
M_o	Kirişin servis yüklerinden oluşan momenti

M_{rd1}	Kiriş mevcut moment kapasitesi
M_{rd2}	Güçlendirilmiş kiriş moment kapasitesi
M_d	Kiriş tasarım momenti
α_s	Modüler oran
V_c	Beton kesitin kesme dayanımı
V_s	Betonarme kesitin kesme donatısının kesmeye katkısı
V_f	Betonarme kesitte kullanılacak fiberin kesme katkısı
n_f	Kirişin tek yüzünde bulunan fiber sayısını
w_f	Lifli polimer genişliği
s_f	Fiber şeritler eksenler arası mesafeyi
f_{cc}	Sargılama sonucu iyileştirilen kesitin tasarım basınç dayanımı
f_{cm}	Sarılmamış beton basınç dayanımı
f_l	Fiberin sağladığı yanal basınç dayanımı
δ_f	Lifli Polimerin hacimsel oranı
N_k	Lifli Polimerin katman sayısı
R_c	Kesit köşe yuvarlatma yarıçapı
K_a	Kesit şekil etkinlik katsayısı
f_{hs}	Enine donatıda 0.001 birim uzamaya karşılık gelen gerilme
S_{etriye}	Etriye aralığı
A_s	Kolon donatı alanı (tek çubuk için)
f_{ym}	Mevcut donatı akma dayanımı
p	Kolonlar için çekirdek kesiti çevresi
n	Kolonlar için bindirme yapılmış donatı sayısı
φ	Kolon donatı çapı
d'	Kolon için pas payı kalınlığı
L_s	Kolon için var olan bindirme boyu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Lifli Kompoziti Oluşturan Fiber Ve Reçine	12
Şekil 2.2. Köşelerin Yuvarlatılması	16
Şekil 3.1. Eğilme Etkisinde Betonarme Kiriş Ve Donatılarda Oluşan Birim Uzamalar	22
Şekil 3.2. FRP' li Kirişlerde Uzamalar Ve İç Kuvvet Denge Denklemleri	23
Şekil 3.3. Kolon Ve Kirişlerde Kesme Dayanım İçin Uygulanacak Lifli Polimer Sargı Şekli	27
Şekil 3.4. Farklı Kesitler İçin Hesaplanacak Ka Şekil Etkinlik Katsayıları	28
Şekil 4.1. Mevcut Betonarme Kiriş Geometrik Özellikleri, Yükleme Ve Donatı Detayları	31
Şekil 4.2. Mevcut Betonarme Kiriş Geometrik Özellikleri Ve Donatı Detayları	36
Şekil 4.3. Mevcut Betonarme Kolon Geometrik Özellikleri	39
Şekil 4.4. Mevcut Betonarme Kolonun Donatı Detayı Ve Geometrik Özellikleri	40
Şekil 5.1. Betonarme Deney Kirişinin Donatı Detayı Ve Geometrik Özellikleri	44
Şekil 5.2. B Kirişinin Yük Altında Deformasyonu	45
Şekil 5.3. BC Kirişinin Yük Altında Deformasyonu	45
Şekil 5.4. BG Kirişinin Yük Altında Deformasyonu	46
Şekil 5.5. Tipik Bir Betonarme Kirişin Yük-Sehim Eğrisi	47
Şekil 5.6. Betonarme Kiriş Modellemesinde Elasto-Plastik Model Yaklaşımı	48
Şekil 5.7. Betonarme Kiriş Modellemesinde İzotropik Model Yaklaşımı	48
Şekil 5.8. Tresca, von Mises,değiştirilmiş von Mises akma kriteri	52
Şekil 5.9. Deney Kirişinin Nümerik Modeli	52
Şekil 5.10. A) Düzgün Yayılı Çatlak Teoremi B) Çatlak Boyunca Kesme Transfer Mekanizması	53
Şekil 5.11. Nümerik Modellemeleri Sonucu Elde Edilen Yük-Sehim Grafikleri	55
Şekil 5.12. Betonarme kirişin FRP kullanılarak eğilme kapasitesi hesabı için akış diyagramı	57
Şekil 5.13. Deneysel ve Analitik Sonuçların Grafikselleştirilmesi	65
Şekil 5.14. Güçlendirilmiş Kiriş Eğilme Moment Kapasitesi Azaltım Katsayısı	66

Değişimi	
Şekil 5.15. Deneysel Ve Analitik Sonuçların Grafiksel Karşılaştırılması	70
Şekil 5.16. Lam & Teng (2003) Deneyi Basınç Sonuçları İle Analitik Hesap Sonuçları	73
Şekil 5.17. Lam & Teng (2003) Deneyi Basınç Sonuçları İle Analitik Hesap Basınç Değerlerinin Grafiksel Karşılaştırılması	74
Şekil 5.18. Haraji at al. (2006) Deneyi Basınç Sonuçları İle Analitik Hesap Sonuçları	75
Şekil 5.19. Haraji at al.(2006) Deneyi Basınç Sonuçları İle Analitik Hesap Basınç Değerlerinin Grafiksel Karşılaştırılması	76
Şekil 5.20. Turgay (2007) Deneyi Basınç Sonuçları İle Analitik Hesap Sonuçları	77
Şekil 5.21. Turgay (2007) Deneyi Basınç Sonuçları İle Analitik Hesap Basınç Değerlerinin Grafiksel Karşılaştırılması	78

1.GİRİŞ

1.1.Genel

Yeryüzünde aktif sayılabilecek önemli fay hatları üzerinde olan ülkemizin yapı stoğu deprem açısından değerlendirildiğinde güvenli sayılabilecek az sayıda yapıımız olduğu görülmektedir. Büyük çoğunluğu mühendislik hizmeti almamış bu yapıların son yıllarda yaşadığımız önemli deprem etkilerine maruz kalmaları çok sayıda can kaybına sebep olmakla birlikte ciddi bir ekonomik kayıp söz konusudur. Bu amaçla mevcut yapıları doğabilecek yeni depremlere karşı güvenli hale getirme çabası yapıların güçlendirilmesini de gündeme getirmektedir.

Deprem etkilerine karşı yapıların güçlendirilmesi eleman veya sistem bazında olmak üzere iki açıdan değerlendirilebilir. Deprem etkilerine maruz yapılar yeterli süneklilik, yatay ve düşey etkilere karşı dayanım ve rijitlik açılarından değerlendirilir. Yapının yeterli rijitlik ve aşırı deplasman sorunu varsa yapı sisteminde bir sorunun var olduğu ve yapının bir bütün olarak güçlendirilmesi gerektiği anlaşılmalıdır. Aksi durumda sadece yapı elemanlarında görülen bireysel kusurlar giderilerek güçlendirme yapılması yeterli olabilmektedir.

Yapı elemanlarının güçlendirilmesini gerektirecek sebepler arasında korozyon, yetersiz enine ve boyuna donatılar, standart dışı malzeme kullanımı, eksik ve hatalı proje üretimi, yetersiz işçilik, artan ilave yükler ve buna benzer çok sayıda neden ileri sürülebilir. Sayılan bütün bu sebepler yapı elemanlarında dayanım (kesme, basınç ve eğilme) sorunlarına sebep olmaktadır. Kesme dayanımı yetersiz yapı elemanlarında gevrek kırılma söz konusu olduğundan bu türden yapı elemanlarının acilen güçlendirilmesi gerekmektedir.

Yapı elemanlarının güçlendirilmesi için farklı yöntemler uygulanmaktadır. Bunlar arasında betonarme manto, çelik levhalar ve karbon fiberler (CFRP) ile güçlendirilme sayılabilmektedir. CFRP ile güçlendirme son yıllarda başvurulan en yeni yöntemdir. Bu yöntemin en önemli avantajı ise hafifliği, anti korrozif oluşu, yüksek dayanımı, işçilik kolaylığı, kimyasal etkilere karşı dayanıklılığı, mimarı alan kaybına sebep olmamasıdır.

Ülkemizde 06.03.2007 tarih ve 26454 sayılı resmî gazetedeki yayımlanan ‘Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY, 2007)’ ilk defa karbon fiberler ile yapı elemanlarının güçlendirilmesine imkân vermektedir

TDY2007’de yapı elemanları için bu kapsamda yapılabilecek iyileştirme türleri sırasıyla şu şekildedir:

a-Kolonların Eksenel Basınç Dayanımlarının Arttırılması (7E.2)

b-Kolonların Sünekliliğinin Arttırılması (7E.3)

c-Kolonların Yetersiz Bindirme Boyu İçin Sargılama (7E.4)

Ancak, TDY2007’de betonarme kirişlerin kesme ve eğilme davranışlarının iyileştirilmesi için herhangi bir öneri yoktur. Bu eksikliği giderme amacı ile TS500 esaslarına göre denge ve uygunluk denklemleri kullanılarak çift donatılı ve tablasız kirişler için eğilme ve kesme kapasitelerinin hesaplanması bu tez çalışmasının başlıca amacıdır.

Bu tez çalışmasında deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkındaki yönetmelik (DBYBHY, 2007) bağıntıları ve TS500 esaslarına göre denge ve uygunluk denklemleri kullanılarak kirişler için eğilme ve kesme kapasiteleri için hesaplama bağıntıları türetildi. Analitik olarak elde edilen sonuçlar yapılmış deney ve sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırıldı. Geliştirilen analitik bağıntılar ile elde edilen sonuçlarının, yapılan deney ve sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırıldığında %25-30 mertebelerinde, farklılık gösterdiği görüldü. Ancak hesaplamalardaki bu farkın, lifli polimerler kullanılarak yapılacak iyileştirmeler için ACI - 440 R2 ve FIB tarafından önerilen azaltma katsayılarından birinin geliştirilen analitik denklemlerle kullanıldığında önemli oranda düştüğü görüldü. Sonuç olarak, hesaplamaların güvenli tarafta kalması ve arzu edilen güçlendirme kapasitelerine daha rahat ulaşılması için geliştirilen analitik denklemlerin bu azaltma katsayıları ile birlikte kullanılmasının uygun olduğu görülmüştür.

1.2 Literatür Taraması

Betonarme elemanların lifli polimerler ile güçlendirilmesi için yurtiçinde ve yurtdışında çok sayıda deneysel ve analitik çalışma yapılmıştır. Bu tez kapsamında ele alınan çalışmalar tamamen mevcut deprem yönetmeliğinde yer alan lifli polimerler ile güçlendirilecek elemanların hesaplarını kapsadığı için bu konuda yapılan çalışmaların ağırlıklı olarak araştırılması hedeflenmiştir. Ancak yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu mevcut kirişlerin eğilme ve kesme kapasitelerinin iyileştirilmesi ile beton basınç dayanımlarının artırılmasına yönelik olmuştur. Aşağıda lifli polimerler ile yapılan araştırmaların kısa bir özeti sunulmaktadır.

Özcan (2005), 15 cm x25 cm ölçülerinde ve 220 cm uzunluğunda betonarme kirişler için üç noktalı eğilme deneyine tabi tutmuş, mevcut ve güçlendirilen kirişlere ait yük-yer değiştirme ve yük-şekil değiştirme durumları incelemiştir. Karbon lifli polimerler ile güçlendirilen kirişlerin eğilme ve şekil değiştirme kapasitelerinde artışlar olduğu gözlemiştir.

Çetinkaya ve ark. (2003), deneysel çalışma için 4 adet betonarme kiriş kullanılmıştır. Deneysel çalışma üç farklı grup halinde değerlendirilmiştir. İlkinde 2 adet deney kirişi güçlendirilmeden taşıma gücüne erişinceye dek yükleme yapılmış ve yük-deplasman değişimi izlenmiştir. İkincisinde taşıma gücüne ulaşan bu kirişler güçlendirilerek tekrar yükleme yapılmış ve yük-deplasman değişimi gözlenmiştir. üçüncüsünde ise henüz test edilmeyen orjinal iki adet kiriş güçlendirilerek taşıma gücüne ulaşınca kadar eğilmeye tabi tutularak yük-deplasman değişimi izleniyor. Böylece CFRP ile yapılan güçlendirmede kiriş taşıma gücünde önemli artışlar oluşturduğu gözlenmiştir.

Tan (2002), tarafından 11,5 cm ve 42 cm gibi farklı boyutlarda çok sayıda betonarme dikdörtgen kesit üzerinde yapılan aksenal basınç deneyi çalışmasında sargı şekillerinin taşıma kapasitesi üzerinde etkileri araştırılmıştır.

Al-Saidy ve Ark. (2007). tarafından yapılan bir çalışmada farklı elastisite modülüne sahip iki adet karbon lifli polimer ile sarılan kirişlerin eğilme kapasitelerinde ve rijitliğinde artışlar olduğu gözlenmiştir.

Peker (2005), benzer bir çalışmayı farklı geometrik enkesite sahip (kare, silindir, dikdörtgen) numuneler üzerinde yapmıştır. Bu çalışmada, numuneler farklı miktarlarda CFRP ile sarılarak aksenal yüke maruz bırakılmıştır; numunelerin şekil etkinliği ve sargı miktarı etkinliği görülmeye çalışılmıştır. Sonuçta kesme etkisi için yapılan enine sargılamının basınç dayanımında sargı miktarı ile doğru orantılı olarak arttırdığı ve boy donatılarda burkulmayı geciktirdiği gözlenmiştir. Ayrıca silindir kesitlerde şekil değiştirmeye karşı direnç miktarının diğer geometrik şekillerdeki numunelere göre daha fazla olduğu görülmüş ve köşe yuvarlatma etkilerinin olumlu anlamda etkisinin olduğu görülmüştür.

Akgüzel (2003), iki katlı ve tek açıklıklı farklı çerçeveler mevcut yönetmelik şartlarına göre özellikle yetersiz bir şekilde imal etmiş ve CFRP ile sararak yatay yükleme yapmıştır. Deney sonucunda CFRP ile güçlendirilen çerçeve sistemin enerji yutma ve yatay yük taşıma kapasitesinin, sistemin dolgu duvarlı olması durumundaki kapasitesine göre %90' ın üzerinde olduğunu göstermiştir.

İlki ve Kumbasar (2003), in çalışmasında CFRP ile güçlendirilmiş farklı sayıda ve şekillerdeki (kare, dikdörtgen ve silindir) numuneler laboratuvar ortamında aksenal basınca maruz bırakılmış, lifli polimerlerin silindir numuneler üzerinde elde edilen basınç dayanımları ve süneklilik artışları diğer şekildeki numunelerden daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Sheikh ve Yau (2002), farklı çap ve aralıkta etriyeye sahip çok sayıda betonarme kolon numunelerinin farklı özelliklerde lifli polimerler ile güçlendirilerek değişen aksenal yükler uygulanmış. Numunelerdeki şekil değiştirmelerin artan yüklerle birlikte arttığı, bu artışın karşılanması için lifli polimer miktarının artırılması gerektiği görülmüştür. Sık etriye aralığı ve etriye oranındaki artışlar ile birlikte kolondaki sünekliliğin arttırdığı ve boy donatısının burkulmasını geciktirdiği gözlenmiştir. Ayrıca lifli polimer miktarının azaltılması için ise daha yüksek mukavemet özelliklerine sahip lifli polimerlerin kullanılması gerektiği görülmüştür.

Xiao ve Wu (2000), farklı mukavemet ölçülerinde daire kesitli numuneler farklı kalınlıkta CFRP ile sarılarak dayanımın beton kalitesi ve sargı kalınlığı miktarına göre değişkenliği incelenmiş. Sonuçta numune dayanımı ve sargı miktarı arttıkça sünekliliğin

belirgin artış gösterdiği gözlenmiş, buradan yola çıkarak analitik bir model önerisinde bulunmuştur.

Wang ve Restrepo (2001), enine, boyuna donatılı kare ve dikdörtgen kesitli kolonlar cam ve karbon lifli polimerler kullanılarak güçlendirilmiş. Güçlendirilen bu numuneler aksenal basınca maruz bırakılmış, deney sonucunda enine sargılamanın boy donatılarının burkulmasını engellediği gözlenmiştir.

Tanarşlan ve Ertutar , (2008), etriyesiz üretilen 7 adet deney kirişin farklı şekillerde CFRP şeritler ile kesme kapasitesindeki değişimler incelenmiş. İlk kiriş güçlendirilmeden referans olarak kullanılmış, diğer kirişler ise L,U ve sadec kiriş yanlarına CFRP şeritler yapıştırılmış. Böylece etriyesiz üretilen CFRP'li kirişin sünek davranışındaki azalmalar gözlenmiştir. Etriyesiz CFRP'li kirişlerin dayanımlarında ve sünenliliklerinde artışlar sağlandığı tespit edilmiş ve daha sonra bu çalışmanın sonuçlarını temel alan analitik bir model geliştirilmeye çalışılmıştır.

Lee ve ark. (2003), değişik oranlarda korozyona maruz bırakılmış kolonların bir kısmı güçlendirilerek, diğer bir kısmı ise güçlendirilmeden basınç deneyine tabi tutulmuşlardır. Lifli polimer ile güçlendirilmeyen kolonlarda korozyondan dolayı hızlı bir şekilde dayanım kapasitesinde yetersizlik görülürken güçlendirilen kolonlarda tam tersine artışlar oluştuğu gözlenmiştir. Ayrıca güçlendirilen kolonların süneklilik kapasitelerinde artışlar olduğu gözlenmiştir.

Haroun ve Ark. (2001), daire ve dikdörtgen kesitli farklı sayıda kısa köprü kolonları kesme iyileştirmesi için lifli polimerler ile sargılanmıştır. Sargılanmamış kolonlarda gevrek kırılma görülürken, sargılı kolonlarda eğilme kırılması gerçekleştiği görülmüştür.

Ersoy ve Uzsoy (1971), tek katlı ve tek açıklıklı çok sayıda çerçeve sistemler lifli polimerler ile güçlendirilerek yatay yük etkilmiş, çerçevenin yatay deplasmanında önemli oranda azalma sağlanırken yük taşıma kapasitesinde artışlar olduğu gözlenmiştir.

Mirmiran ve Shahawy (1997), lifli polimerler ile güçlendirilen daire kesitli yapı elemanlarının sünekliliğini ve eğilme kapasitesini daha çok arttırdığı gözlenmiştir.

Norris ve Ark. (1997), ondokuz adet deney kirişi farklı doğrultuda dokuma özelliklerine sahip CFRP kumaşlar ile kiriş alt ve yanlarına yapıştırılarak kirişlerin çatlama dayanımından daha yüksek bir kuvvet altında kırılma şekli incelenmiş ve kesme ve eğilme kapasiteleri incelenmiştir. Görülmüştür ki güçlendirilmiş kirişte kesme ve eğilme kapasitesi artışları CFRP kumaş dokuma yönüne göre farklı şekillerde oluşmaktadır.

Hawileh ve Ark. (2014), deneysel olarak yapılan çalışmada 5 adet kirişi kullanılmıştır. İlk kiriş kontrol amaçlı lifli polimer sargılanmamış. Diğer kirişlerin eğilme bölgelerinde kullanılmak üzere karbon, cam, cam+karbon, cam+karbon+cam şeklinde kombinasyonlar ile 4 noktadan yüklü numunelerin eğilme kapasiteleri, yük-deplasman değişimleri, göçme şekilleri ve malzemelerin gerçek mekanik değerlerini tespit etmek amaçlanmıştır. Güçlendirilen numunelerde eğilme kapasitesi yukarıdaki kombinasyonlara bağlı olarak %30 ila %98 oranında artmıştır. Ayrıca sadece cam ve hibrid lifli polimer ile yapılan güçlendirme sadece karbon lif kullanılarak yapılan güçlendirmelerden daha fazla elemana süneklilik sağlamıştır. Bu deney sonuçları ACI 440.2R-08' de verilen analitik formüller ile karşılaştırılmış ve sonuçların %5 sapma ile uyumlu olduğu gözlenmiştir.

Anıl ve Ark. (2011), yetersiz kesme dayanımına sahip 7 adet T şeklinde betonarme kiriş CFRP plakalar ile sarılarak kirişlerin kesme dayanımlarının ve süneklilik artışlarının değişimleri deneysel olarak incelenmiştir. Bir adet kiriş referans kirişi olarak seçilmiş kalan diğer 6 adet kiriş U şeklinde CFRP plakalar farklı aralıklarda ($s_f=125\text{mm}, 150\text{mm}, 200\text{mm}$) kullanılarak ankrajlı ve ankraşsız bir şekilde kesme etkileri değerlendirilmiştir. Ankraşsız CFRP plakalar ile güçlendirilen kirişlerde kesme kapasitelerinde artış olduğu gözlenmekle birlikte CFRP sıyrılması ile kesitlerin sünek davranış gösterecek seviyeye çıkmadan göçtükleri görülmüştür. Ankrajlı CFRP plakalar ile güçlendirilen kirişlerde ise hem kesme kapasitelerinde önemli artışlar olduğu hemde kesitin sünek davranış gösterdiği gözlenmiştir. Birim deformasyon miktarı açısından

değerlendirilen numunelerde ankrajlı numunelerde %44 daha fazla deformasyon olduğu gözlenmiştir.

Carolin ve Taljsten (2003), 3.5m ve 4.5m ' lik dikdörtgen kesitli kirişlerin çeşitli parametreler altında (yorulma, ankrajlı ve ankrajsız,) deneye tabi tutularak kirişte oluşan kesme çatlaklarının açıklık boyunca kesme ve eğilme etkilerine göre davranışları gözlemlenmiştir.

Habibur ve Ark., (2011), 190 cm açıklığında 5 adet betonarme kirişin dördü çekme bölgesine farklı kombinasyonlardaki, şekillerde ve boylarda CFRP plakalar kullanılır. Dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Bir adet kiriş güçlendirilmeyerek kontrol amaçlı kullanılmıştır. Güçlendirilen kirişlerin yükleme sonucunda rijitliğinde ve eğilme kapasitesinde belirgin artışlar olduğu gözlenmiştir. Farklı kombinasyonlar ile güçlendirilen kirişlerin kendi aralarında ve de kontrol kirişi ile mukayeselerinde U şeklinde ankrajlı CFRP plakaların daha etkili olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada ayrıca farklı seviyelerde CFRP miktarının kirişin göçme modu üzerinde etkileri de araştırılmıştır.

Jayanath ve Ark. (2013), tarafından yapılan çalışmada orantılı bir şekilde 3 adet kiriş ve tek doğrultuda çalışan 6 adet tek açıklı döşeme imal edilmiş. Bu numunelerden bir adet kirişi ve 3 adet döşemeyi güçlendirmeyerek kontrol amaçlı kullanmışlardır. FRP plakaları ile güçlendirilen elemanları dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuş böylece deneysel ölçülen kopma uzamaları hesaplanarak bazı ulusal standartlarda verilen (ACI 440-R2-08, Japon Standart, Mısır (ECP-208) Standartı) analitik fomüller ile uyumlulukları değerlendirilmiştir.

Parra,ve Ark. (2012), tarafından yapılan çalışmada ise farklı göçme şekillerine bağlı olarak oluşan kesme çatlaklarına dik bir şekilde uygulanan tek yönlü FRP plakalarının çatlakla oluşturduğu farklı açıların kirişlerin kesme kapasiteleri üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Ayrıca kirişte mevcut etriye miktarının ve FRP kalınlığının olumlu etkilerinden bahsedilmiştir. Bu olumlu etki kesitin çatlamadığı durum için doğrusal olduğu gözlenmiştir. Kim G., ve ark., tarafından yapılan çalışmada ise farklı kirişler üzerinde karbon lamine ve kumaşlar ile cam fiberler güçlendirme amaçlı kullanılmıştır. Daha sonra deneye tabi tutulan bu kirişlerin fiber ve kumaşların sıyırılması sonucu gevrek kesme kırılmasına maruz kaldıkları görülmüştür. Kullanılan bu farklı fiberlerde

akma şekil değiştirmelerinin benzeştiği ve her birinin %54 oranında kirişlerin kesme kapasitesini arttırdıkları görülmüştür. Ayrıca 45° lik açı ile dokunan lifli polimerlerin numunelerin kesme kapasitesini en azami şekilde arttırdığı görülmüştür. Bu numunelerin sonlu eleman analizinde elde edilen değerler de deney sonuçları ile uyumlu oldukları tespit edilmiştir.

Yetgin, ve Çavdar, (2005), ise karbon lifli polimer plakalar ile güçlendirilen farklı betonarme kirişlerin sonlu eleman modelleri oluşturarak non-lineer analizler yapmışlardır. Böylece kirişlere ait çatlak oluşumları, kiriş orta açıklık ve lifli polimer yüzeylerinde oluşan gerilme değişimleri incelenmiştir.

Öncü ve Ark. (2010) mevcut betonarme bir binanın güçlendirilmesi üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalar, deneysel ve analitik olarak gerçekleştirilmiştir. Analitik çalışmalar deprem yönetmeliğinde yer alan lifli polimer ile sargılanma esaslarına göre yapılmıştır. Analitik çalışmada düşük dayanımlı beton karotların CFRP ile sargılanmasında basınç dayanımlarının yaklaşık olarak iki katına çıktığı gözlenmiştir. Deneysel çalışmada ise mevcut binanın daha düşük dayanımlı karotları laboratuvar ortamında eksenel yük altında kırılmıştır. Daha sonra CFRP ile sarılan bu numuneler tekrar eksenel kırılmaya tabi tutulmuşlardır. Böylece taşıma gücünü kaybetmiş beton numunelerinde bile CFRP ile sargılama sonrasında basınç dayanımlarında artış olduğu gözlenmiştir.

Arın (2006). 10 cm x 10 cm ebadında ve 50 cm boyunda 4Ø8 boyuna donatısı olan betonarme kirişin aynı özelliklerde ama farklı kalınlıkta karbon lifli polimer ile güçlendirilmesinde taşıma kapasitesindeki artışlar analitik ve nümerik olarak incelemiştir. Güçlendirilmiş bu kirişlerin eğilme kapasitelerindeki artışların CFRP miktarının artırılması ile doğru orantılı olduğu gözlenmiştir.

Mert ve Ark. (2007), 16 adet kiriş elemanları farklı donatılarda, kesitlerde ve açıklıklarda hazırlanarak farklı lifli polimerler ile güçlendirilmiş sonlu eleman modelleri hazırlanmış ve doğrusal olmayan analizleri yapılmıştır. Böylece kirişte oluşan çatlaklar

incelenmiş, lifli polimerde kiriş boyunca oluşan gerilmeler grafiklerle halinde elde edilmiştir.

2. ONARIM VE GÜÇLENDİRME

2.1 Onarım ve Güçlendirme Hakkında Genel Bilgiler

Onarım ve güçlendirme, kelime anlamı olarak ikisi de performans iyileştirmesini çağırırsa da gerçekte farklı anlamlar içermektedirler. Herhangi bir sebepten dolayı hasar görmüş bir yapı veya yapı elemanının taşıma kapasitesinin eski haline getirilmesi için yapılan işlemlerdir.

Güçlendirme, yapı veya yapı elemanlarının hasarlı veya hasarsız durumlarına bakılmaksızın taşıma kapasitelerinin mevcut taşıma kapasitesinin üzerine çıkarmak için yapılan her türlü iyileştirmelerdir.

Yapıların onarım veya güçlendirilmesi sanıldığı gibi kolay değildir. Bu konuda önümüze farklı zorluklar çıkmaktadır. Bunlar;

- Teknik Problemler
- Ekonomik problemler
- Hukuki problemler

Teknik problemler: Yetişmiş ve tecrübeli teknik eleman yetersizliği, dolayısıyla uygun olmayan güçlendirme çalışması ile birlikte yetersiz ve kalitesiz malzeme kullanımı şeklinde olabilmektedir.

Ekonomik problemler: Yapılan güçlendirme yöntemi ve miktarı, maliyeti doğrudan etkilemektedir. Gereğinden fazla yapılan güçlendirmenin fayda yerine zarar getireceğini vurgulamakta fayda vardır.

Hukuki problemler: Güçlendirilecek binanın konumu, kullanım amacı ve hak sahiplerinin etkileri, yürürlükteki kanun ve yönetmelikler güçlendirme uygulamalarını etkileyebilir.

2.2. Neden Onarım ve Güçlendirme:

Pahalı ve uygulaması meşakkatli olan onarım ve güçlendirmeye ihtiyaç duyulmasının temel sebeplerini üç farklı ana başlık altında sıralayabiliriz. Bunlar;

Tasarımdan Dolayı Oluşan Hasarlar: Bu hasarları üç başlık şeklinde özetlemek mümkündür.

- Yetersiz bilgi ve donanım
- Yönetmelikler de var olan eksiklikler
- Tasarım aşamasında minimum kriterler kullanılarak yapılan hesaplar

Dış Etkilerden Dolayı Oluşan Hasarlar: Bu hasarları beş başlık şeklinde özetlemek mümkündür. (Aktan, 2014):

- Depremler
- Rüzgârlar
- Yanıcı, yakıcı ve patlayıcılar
- Fiziki darbeler (çarpmalar vs.)
- Donatılarda oluşan oksitlenme veya betondaki karbonatlaşma (Ca(OH)_2 'nin havanın CO_2 gazıyla birleşerek nötr bir tuz olan kalsiyum karbonata dönüşmesidir. Bu olgu betonarme yapı elemanlarının servis ömrünü etkileyen bir faktör olarak değerlendirilir.

Kullanımdan Kaynaklanan Hasarlar: Bu hasarları iki başlık şeklinde özetlemek mümkündür.

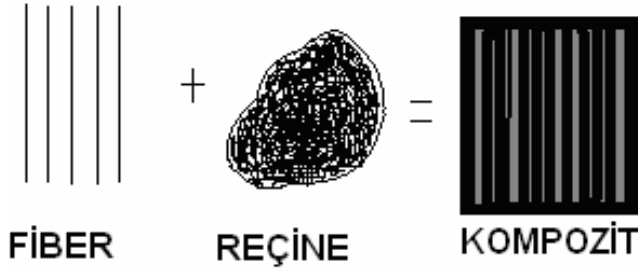
- Yapının farklı bir amaç için kullanımı
- Kullanımdaki özensizlikler

Onarım ve güçlendirme için genel olarak, mantolama (betonarme veya çelik) ve perde ilavesi (betonarme veya çelik) yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemlerde ağırlıklı olarak kullanılan onarım ve güçlendirme malzemeleri şu şekildedir:

- Betonarme
- Çelik
- Epoksi / Enjeksiyon Reçineleri
- Beton Püskürtme
- Tamir Harçları

- Lifli Malzemeler

Lifli Malzemeler: Lifli malzemeler, çapları mikron seviyesinde olan ve boyca uzun olan bir çeşit kompozit malzemedir. İki veya daha fazla malzemenin, iyi özelliklerini bir araya toplamak ya da ortaya yeni bir özellik çıkarmak için, mikro veya makro seviyede heterojen karışımıyla oluşan malzemeye birleşik veya kompozit malzeme denir. Lifli kompozit malzeme, genellikle lif ve matriks olmak üzere, en az iki malzemedен oluşur (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Lifli Kompoziti Oluşturan Fiber ve Reçine

Kompozit malzemeyi oluşturan matriks malzemeler yükün iletilmesini, bağ oluşumunu sağlarlar ve lifli malzemelere göre daha az dayanıma sahiptirler. Lif malzemeleri ise yük taşıyan bileşenlerdir ve yüksek mukavemet değerlerine sahiptir. Lifli polimerlerde, liflerin dayanımı matrikslerden daha fazla olmalıdır. Arzulanan dayanımı elde etmek için lif ve matriks arasında yapışma mükemmel olmalıdır. Liflerin mutlaka zararlı dış etkilerden korunması sağlanmalıdır. Güçlendirme uygulamalarında laminat tipi kompozitler daha çok kullanılmaktadır. Arzu edilen kalınlıkta laminat oluşturulması için istenilen sayıda liflerden katmanlar oluşturup matriks emdirilmelidir. Oluşturulan bu yeni malzemenin mukavemet değerlerini farklı kılan unsurlar ise şöyle sıralanabilir;

- Liflerin doğrultusu
- Lif ve matriksin (reçine) mekanik özellikleri
- Lif ve reçine arasındaki yapışma kuvveti
- Fiberlerin uzunluğu

Matriks Malzemeler: Lifli kompozitlerde ikinci bileşen Matrikstir. Yüksek dayanımlı matriks kullanımı liflerin dayanımına katkısı çok önemlidir. Matriksin işlevleri şunlardır;

- Oluşan kuvvetleri sağlıklı bir şekilde liflere aktarmak,
- Lifleri, zararlı dış etkilere korumak (fiziki ve kimyasal)

Şekil 2.1’ te lif(fiber), matriks (reçine) bileşenleri ile elde edilen kompozit malzeme oluşumu şematik olarak gösterilmiştir.

Tablo 2.1 de kompozit malzemelerin bileşen malzemeleri türlerine ve yapı şekline göre sınıflandırılması gösterilmektedir.

Tablo 2.1. Matriks, Takviye Elemanı ve Kompozit Yapı Tipleri

Matriks Malzemeleri	Takviye Elemanları	Kompozit Yapı Şekli
Polimerler	Lifler	Tabakalar
Metaller	Whiskers	Film / Folye
Seramikler	Pudra	Honey / Combs
	Yonga	Flament Sarılmış Yapılar
	Granül	Kaplamalar

Polimer esaslı kompozit malzemeler hammadmesine göre genel olarak üç sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar; karbon lifli polimerler, cam lifli polimerler ve aramid lifli polimerlerdir. Bu liflerin mekanik özellikleri sırası ile Tablo 2.2, 2.3 ve 2.4 verilmiştir.

Tablo 2.2. Karbon Fiberlerin Mekanik Özellikleri

Elastisite Modülü	290-400 GPa
Çekme Dayanımı	2400-5700 MPa
Kopma Dayanımı	%0,3-%1,8

Tablo 2.3. Cam Fiberlerin Mekanik Özellikleri

Elastisite Modülü	72-78 GPa
Çekme Dayanımı	3300-4500 MPa
Kopma Dayanımı	%4,8-%5

Tablo 2.4. Aramid Fiberlerin Mekanik Özellikleri

Elastisite Modülü	62-142 GPa
Çekme Dayanımı	2410-3150 MPa
Kopma Dayanımı	%1,5-%4,4

2.3. Kompozitlerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler, teknolojiadaki hızlı gelişme ve üretim maliyeti fiyatlarındaki düşüşlerden dolayı son yıllarda özellikle inşaat sektöründe onarım ve güçlendirme alanında önemli ölçüde kullanılmaya başlanılmıştır. Bu kullanım alanlarından en yaygın olanları aşağıdaki gibidir.

- Betonarme, çelik, ahşap elemanların (kolon, kiriş, döşeme) basınç ve/veya eğilme, kesme dayanımlarının arttırılmasında
- Silo, tank ve bacaların güçlendirilmesinde
- Köprü ve viyadüklerin kolon, kiriş ve tabliyelerinin onarım/güçlendirilmesinde
- Dinamik ve mekanik titreşime maruz özellikli yapılarda
- Tarihi yapı yapılarında
- Kıyı ve iskele ayaklarının güçlendirilmesinde
- Tünel ve alt geçitlerde
- Altyapı boru tesislerinde rahatlıkla kullanılabilir.

Kompozit malzeme kullanımı avantajlı kılan sebepler aşağıda ki gibi ifade edilebilmektedir.

- Estetik görünümlüdür.
- Hafiftir, dolayısıyla uygulamada fiziki bir güç gerektirmez.

- Kolay işlenebilir.
- Düşük yoğunlukludur.
- Antikorroziftir.
- Kullanım alanı geniştir.
- Yüksek mukavemetlidir.
- Kimyasal dirençleri yüksektir.
- Yorulma davranışı metallere göre daha iyidir.

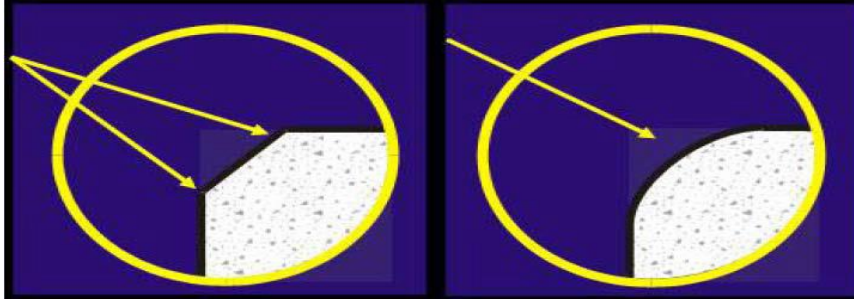
Kompozit malzeme kullanımının bazı dezavantajı olduğu durumlar ise aşağıda ki gibi ifade edilebilmektedir.

- Aşırı ısıya karşı dirençsizdirler.
- Kısmen maliyetlidirler.
- Uygulama yapacak tecrübeli/egitimli eleman azlığı vardır.
- Liflere dik doğrultuda dayanımları sınırlıdır.
- Nitelikli teknik eleman ve tecrübeli işçilik gerektirmektedir.
- UV ışınlarına karşı zayıflık

2.4 Kompozit Malzemelerin Uygulanması

Kompozitlerin uygulanması öncesinde ve sırasında dikkat edilmesi gereken durumlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Pürüzlü yüzey olması durumunda tamir harcı ile pürüzler giderilmelidir.
2. Mevcut kesit donatılarında varsa paslanmış donatılar iyice zımparalanmalıdır.,,
3. Donatı yüzeyleri antikorrozif malzemeler sürülerek paslanma sonucu oluşacak kesit, kayıpları engellenmelidir.
4. Kesit köşelerine min $r=3\text{cm}$ yarıçapında ovallık verilerek karbon fiberin sargı etkisi artırılmalı (Yapılan deneylerde karbon fiberler dairesel kesitler, dikdörtgen veya kare kesitlerde daha etkili olduğu görülmüştür. (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Köşelerin Yuvarlatılması

5. Yüzeylerde kesinlikle aderansı engelleyici herhangi bir malzeme bulunmamalı, kumlama yöntemi ile varsa yüzeydeki toz, kir ve diğer engelleyici maddeler çıkarılmalı.

6. Karbon fiberler nemden ve sıcaklıktan etkilendikleri için uygulamada ortam nem oranı max %5, sıcaklığının 5°C-30°C arasında olması önerilmektedir.

7. Uygulanan yüzeye ve karbon fibere boşluksuz bir şekilde astar epoksi uygulanır. Kuruması için 10-15dk beklenir. Daha sonra yüzeye gergili bir şekilde rulo yardımı ile yapıştırılır.

8. Uygulayıcıların sağlık problemlerinin önüne geçilmesi için yeterli koruma ve güvenlik sağlanmalı

9. Lifli polimer ile yapılan sargılamalarda sargı eklerinde en az 200 mm bindirme yapılmalıdır.

2.5. Lifli Kompozitlerin Uygulama Projesinin Detaylandırılması

Hazırlanan güçlendirme projesinde önerilen karbon fiberlere ait hesaplarda bulunması gerekenler aşağıda verilmiştir.

- Kullanılan karbon fiberin mekanik ve geometrik özellikleri
- Hangi eleman için ne tür bir kapasite artışının hesaplandığı ve hangi tür frp önerildiği
- İhtiyaç duyulacak frp katman sayısı
- Uygulama şartları ve kısıtları
- Kullanılacak katkı maddeleri, bu katkı maddelerinin mekanik ve kimyasal özellikleri

- Uygulama prosedürü, şekli ve kürleme detayları
- Varsa kullanılan frp sistemleri ile karşılaştırmalı laboratuvar test sonuçları
- Uygulama detay çizimlerinin uygulayıcıları şüphede bırakmayacak şekilde açık ve anlaşılır olmalı.
- Çizimlerde uygulanan eleman isimleri, geometrik özellikleri, ihtiyaç duyulan frp katman sayısı, frp bindirme boyları ve ankraj detayları mutlaka olmalı.

3.MATERYAL VE METOT

Materyal

Bu tez için yapılan çalışmada, birbirinden farklı malzeme özelliğine sahip farklı yapı elemanlarının temel statik ve mukavemet bağıntıları çerçevesinde analitik yöntemler kullanılarak lifli polimerler ile güçlendirilmesi ve literatürdeki deney sonuçları ile karşılaştırılarak yöntemin sapma oranlarının belirlenmesi hedeflenmektedir.

Metot

Çalışmada, 2007 Deprem yönetmeliği ve TS500 tasarım kriterleri doğrultusunda betonarme kirişler için eğilme ve kesme, kolonlar için bindirme boyu yetersizliği, ve aksenal basınç dayanımının ve sünekliliğin artışı hesabı yapılarak istenen kapasite düzeyine ulaşmak için gerekli karbon fiber uygulama miktarı hesaplanmaktadır.

Bu hesaplamalar analitik yöntemle hazırlanmış sonuçları kontrol amacıyla literatürde yer alan bazı deneysel çalışmalar ve sonlu eleman modellemeleri ile karşılaştırılmıştır.

3.1. Betonarme Kirişler

Betonarme yapılar içinde kirişler iki ana başlıkta toparlanabilecek önemli görevleri yerine getirmektedir. Bunlar:

- Düşey doğrultuda kalıcı ve hareketli yüklerden gelen etkileri perde veya kolonlara aktarmak,
- Deprem ve rüzgâr gibi yatay kuvvetleri perde ve kolonlara aktarmak.

Kirişler, statik sistemde yeri ve mesnetlenme şekline bağlı olarak birçok etkilere maruz kalırlar. Bu etkiler eğilme, burulma, kesme ve aksenal kuvvetler şeklinde olabilmektedir. Kesit boyutlarına göre uzunlukları çok fazla olan kirişlerde, genellikle eğilme etkileri önem kazanmaktadır. Bu açıdan yönetmeliğimizde eğilme elemanı olan kirişler için aksenal kuvvetler $N_d \leq 0.1f_{ck}A_c$ ile sınırlandırılmaktadır. Aksi durumda kesit için basit eğilme elemanı varsayımı geçerli olmayacaktır.

Kiriş gibi eğilme elemanlarında eğilme sırasında kesit eğrilikleri artan yük altında iteratif yöntemlerle hesaplanabilmektedir. Artan eğilme momentlerine paralel olarak kesit iç deformasyonlarında doğrusal olmayan basınç gerilmeleri oluşmaktadır. Böylece beton alt lifindeki donatılar çekmeye çalışacak ve beton üst lifinde ezilmeler oluşacaktır. Beton basınç lifindeki birim kısalma maksimum değerini aldığı anda $\varepsilon_o = \varepsilon_{cu} = 0.003$ alt donatılardaki birim uzamanın maksimum birim uzamaya ulaştığı $\varepsilon_s = \varepsilon_{sy} = \frac{E_s}{f_{yd}}$ özel bir sınır durum vardır. (Doğangün, 2009). Buna dengeli kırılma adı verilmekte ve betonarme elemanların tasarımında belirleyici bir rol oynamaktadır. Burada yapılan tüm hesaplar denge denklemleri kullanılarak dengeli kırılma teorisine göre hesaplanacaktır. Betonarme kesitlerin tasarımı iki kategoride incelenmektedir. (Berktaş, 1995).

1. Kullanılabilirlik limit durumuna göre tasarım:

Yapının veya yapı elemanlarının işletme yükleri altında titreşim veya aşırı yükleme sonucu ileri deformasyona uğraması, çatlama ve kullanılabilirliğini yitirmesidir.

Güçlendirme çalışmasında betonarme kesitin önce TS500'e göre işletme yükleri altında kullanılabilirlik durumu hesaplanmalıdır. Bu hesaplarda elastik teoriye göre kabuller yapılır. Elastik teoriye göre yapılan kabuller aşağıdaki gibidir;

- Bernouilli-Navier hipotezi kuralları geçerlidir.
- Kullanılan malzemenin doğrusal elastik davrandığı kabul edilir.
- Beton çekme gerilmesi almaz.
- Çelik ve beton elastisite modülleri arasındaki oranın sabit olduğu kabul edilir.(Kullanılabilir limit durum için)

2. Nihai limit durumuna göre tasarım:

Malzeme mukavemet değerlerinin aşılabileceği olasılığı göz önüne alınarak, var olan yüklerin yük katsayıları ile çarpılarak bulunan hesap yüklerine göre malzeme karakteristik mukavemetlerinin bir güvenlik katsayısına bölünmesi sonucu varılan karşılaştırmayı temel alan yaklaşımdır.

Eğilme etkisindeki betonarme kirişin doğrusal olmayan davranışını hesaplayabilmek için basınç bölgesi derinliği, ortalama 0.85 katsayı (C25 ve altı betonlar için) ile çarpılarak dikdörtgen gerilme bloğuna dönüştürülmektedir. (Berktaş, 1995).

Güçlendirilen betonarme kirişte oluşabilecek göçme mekanizmasının aşağıdaki şekilde olması istenir.

- Önce lifli polimer esaslı kompozitlerin kopması sağlanmalı
- Daha sonra çekme bölgesi donatısı akmalı
- En sonunda basınç bölgesi betonu birim kısalma değerine ulaşmalı

Ayrıca uygulanan lifli polimer esaslı kompozitler ile ve betonarme kesit arasında tam aderans sağlanmaması sonucunda da göçme oluşabilmektedir. Bu tür sonuçları doğuran durumlar arasında:

- Lifli polimer esaslı kompozitlerin, kesitte oluşan maksimum eğilme bölgesine tam uygulanamaması veya etkili lifler doğrultusunda uygulanmaması
- Kimyasal yapıştırıcıların (reçinelerin) mukavemet kaybına bağlı olarak gerçekleşen sıyrılmalar
- Kimyasal yapıştırıcılar ile betonarme kesit veya kimyasal yapıştırıcılar ile lifli polimer arasındaki oluşan adezyon kuvvet kayıpları
- Liflerinin kendi aralarında oluşabilecek kohezyon kayıpları sayılabilir.

3.1.1 Betonarme Kiriş Taşıma Kapasitesi Hesabı

Çatlamış Kesit Hesabı:

Güçlendirilmiş kesit kapasitesi hesaplanmadan önce kesitin mevcut yükler altındaki durumu önem arz etmektedir. Kesite etki eden M_o servis momenti ile elastik teoriye göre hesaplanacak kesit alt lifindeki birim uzama güçlendirilmiş kesit kapasitesini ve kullanılacak FRP miktarını etkilemektedir. TS500 de tanımlı kesit çatlama momenti aşağıda ki Denk. (3.1) ile hesaplanacaktır.

$$M_{cr} = 2.5f_{ctd} b \frac{h^2}{6} \quad (3.1)$$

M_o ve M_{cr} karşılaştırılması yapılarak kesitin çatlayıp çatlamadığı kontrol edilecek ve böylece güçlendirme hesaplarının çatlamış kesit veya brüt kesit üzerinden gidileceği konusu belirleyici olmaktadır.

$M_o < M_{cr}$ ise mevcut kesit çatlamamış kabul edilecek,

$M_o > M_{cr}$ ise mevcut kesit çatlamış kabul edilecek

Burada yapılacak hesaplar detaylı ve karmaşık olmasından dolayı bilgilendirici olması açısından çatlamış kesit örneği Şekil.3.1'de gösterilen betonarme kesit üzerinde açıklanacaktır.

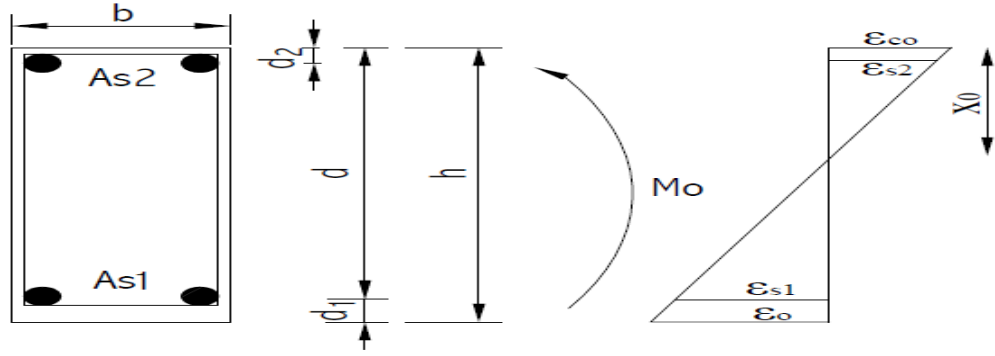
Çatlamış kesit atalet momenti hesabında beton ve çelik malzeme elastisite modülleri arasında dönüştürülmüş alan hesabı yapılmalıdır. Daha sonra kesit iç kuvvet denge denklemleri eşitliğinden çatlamış kesite ait tarafsız eksen derinliği x_o aşağıdaki Denk. (3.2) verilen eşitlikten hesaplanır.

$$0.5 b x_o^2 + (\alpha_s - 1) A_{s2} (x_o - d_2) = \alpha_s A_{s1} (d - x_o) \quad (3.2)$$

Burada $\alpha_s = \frac{E_s}{E_c}$ çelik ve beton malzeme elastisite modülleri oranı ifade etmektedir.

Tarafsız eksen derinliği bulunduktan sonra çift donatılı çatlamış kirişin atalet momenti aşağıdaki Denk. (3.3) ile hesaplanır.

$$I_{cr} = \frac{b x_o^3}{3} + (\alpha_s - 1) A_{s2} (x_o - d_2)^2 + \alpha_s A_{s1} (d - x_o)^2 \quad (3.3)$$



Şekil 3.1. Eğilme etkisinde betonarme kiriş ve donatılarda oluşan birim uzamalar

Betonarme kesit üst lifinde (basınç bölgesi) oluşan birim kısalma aşağıdaki Denk. (3.4) ile hesaplanacaktır.

$$\varepsilon_{co} = \frac{M_o x_o}{E_c I_{cr}} \quad (3.4)$$

Kesite ait uygunluk denklemleri ile beton alt lifinde hesaplanacak uzama değeri ise aşağıdaki Denk. (3.5) ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon_o = \varepsilon_{co} \frac{h - x_o}{x_o} \quad (3.5)$$

Betonarme kirişin alt lifinde hesaplanan bu uzama güçlendirme öncesi mevcut kirişin alt lifinde olduğu kabul edilen uzama değeridir. Bu uzama değerinin hesaplanması çok önemlidir. (ISIS EC Module 4, (2004), hesaplanan bu uzama uygulanacak FRP miktarını doğrudan etkilemektedir. ISIS' e göre betonda oluşan maksimum birim kısalma TS500' den farklı olarak $\varepsilon_{co}=0,0035$ olduğunu hatırlamakta fayda vardır.

3.1.2. Nihai Taşıma Kapasitesi Hesabı

Betonarme kirişin nihai taşıma kapasitesi hesabında, uygulanan FRP ile betonarme kiriş davranışının bir bütün olarak kompozit şeklinde davrandığı kabul edilmektedir. Şekil 3.2' te gösterilen bu kompozit kesitin davranışında aşağıdaki davranış modelleri görülebilmektedir. Bu tez içerisinde yapılan hesaplarda denge kırılması kuralına göre hesaplar yapılmaktadır.

2-FRP' de oluşan uzama kontrolü(ϵ_f):

$$\epsilon_f = 0.003 \left(\frac{h-x}{x} - \epsilon_o \right) \leq \epsilon_{f_{limit}} \quad (3.8)$$

şartları mutlaka sağlanmalıdır.

k_1 =Eşdeğer basınç bloğu derinliği katsayısı olmak üzere ($k_1=0,85$ alınmıştır.)

Moment Taşıma Kapasitesi Hesabı

Bu hesaplamalarda öncelikle M_{rd1} 'in M_d tasarım momentinde büyük olup olmadığı kontrol edilmelidir. M_{rd1} ' in M_d ' den büyük olması durumunda güçlendirmeye ihtiyaç duyulmadığı kanaatine varılacak, aksi durumda ise M_{rd2} hesaplanacak ve M_d tasarım momenti ile karşılaştırılacaktır. Mevcut FRP ile hesaplanan güçlendirilmiş moment kapasitesinin tasarım momentinden büyük olması sağlanana kadar FRP miktarı artırılarak hesaplar tekrar edilecektir. Kullanılacak FRP katman sayısının literatürde 4'ten az olması önerilmektedir. (FIB, 2001).

M_{rd1} mevcut kesit moment kapasitesi olarak ifade edilirse, (FRP' siz) hesabı aşağıdaki formül ile hesaplanabilir;

$$M_{rd1} = A_{s1} f_{yd} (d - 0,4x) + A_{s2} E_s \epsilon_{s2} (0,4x - d_2) \quad (3.9)$$

Eşitlik (3.9) ile hesaplan FRP siz mevcut kesit moment kapasitesi, M_{rd1} , tasarım moneti M_d ile karşılaştırılır. Eğer $M_{rd1} > M_d$ ise kesit mevcut hali ile tasarım momentini karşılayabildiği kanaatine varılır. Eğer $M_{rd1} < M_d$ ise kesit mevcut moment kapasitesinin yetersiz olduğuna ve FRP ile güçlendirilmesi gerektiğine karar verilir. FRP' li moment kapasitesi hesabı, Şekil 3.2 de gösterilen kesit üzerindeki kuvvetlerin tarafsız eksene göre moment dengesi kullanılır aşağıdaki denklem (3.10) ile hesaplanır.

$$M_{rd2} = A_{s1} f_{yd} (d - 0,4x) + A_f E_f \epsilon_f (h - 0,4x) + A_{s2} E_s \epsilon_{s2} (0,4x - d_2) \quad (3.10)$$

Verilen bu eşitlikler ve denklemlerin doğruluğunun sağlanması için güçlendirilmiş kesit moment kapasitesi hesabından sonra mutlaka aşağıdaki kontrollerin yapılması gerekmektedir.

1-Çekme donatısındaki birim uzama sınırı:

$$\varepsilon_{sl} = \varepsilon_{cu} \frac{d-x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (3.11)$$

2-FRP ‘ de oluşan birim uzamasını

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h-x}{x} - \varepsilon_o \leq \varepsilon_{fu} \quad (3.12)$$

3.2. Kirişlerin Kesme Dayanımlarının Arttırılması

Lifli polimer sargılı kolon ve kirişlerin kesme dayanımının, TDY 2007'nin bilgilendirme ekinde aşağıdaki formülle hesaplanması önerilmiştir. (TDY 2007):

$$V_r = V_c + V_w + V_f \leq V_{max} \quad (3.13)$$

Burada; V_c , beton kesitin kesme dayanımı, V_w : betonarme kesitin kesme donatısının kesmeye ve V_f , betonarme kesitte kullanılacak fiberin kesme katkısını ifade etmektedir. V_{max} ise betonun basınç gerilmeleri altında ezilmesinin önlemek için önerilen maksimum kesme kuvvetini ifade eder ve aşağıdaki eşitlikle tanımlanır.

$$V_{max} \leq 0,22f_{cd}bd \quad (3.14)$$

Betonarme kesit kesme katkısı (V_c) ise ;

$$V_c = 0,52f_{ctd}bd \quad (3.15)$$

Kiriş etriyelerin kesme katkısı (V_w) ise,

$$V_w = 2A_d f_{yd} \frac{d}{s} \quad (3.16)$$

V_f ise karbon fiber kompozit sargı malzemesinin çekme gerilmeleri altında ezilmesini önlemek için önerilen maksimum kesme kuvvetini ifade eder ve aşağıdaki gibi hesaplanır

$$V_f = \frac{2n_f w_f E_f \varepsilon_f d}{s_f} \quad (3.17)$$

Burda n_f , kirişin tek yüzünde bulunan fiber sayısını, w_f : fiber kalınlığını, s_f , fiber şeritler arası eksenden eksene olan mesafeyi göstermektedir. Fiber sargılamasının şeritler halinde değil de bütün olarak yapılması durumunda $w_f = s_f$ alınmalıdır. (TDY2007).

Güçlendirilen kiriş için ihtiyaç duyulan lifli polimer alanı (A_f) ise,

$$A_f = \frac{s_f V_f}{2n_f E_f \epsilon_f d} \quad (3.18)$$

Liflerde oluşacak uzama için iki ayrı sınır değeri getirilmiştir. (TDY2007 7E.3) göre tanımlanmış sınır değerler $\epsilon_f \leq 0,004$ ve $\epsilon_f \leq 0,5\epsilon_{fu}$ şeklinde alınmıştır.

TDY2007 yönetmeliğine göre, liflerin şeritler halinde olması durumunda şerit aralıkları için; $s_f \leq \frac{d}{4} + w_f$ sınırlaması getirmektedir.

3.3. Kolonların Eksenel Basınç Dayanımlarının Arttırılması

TDY2007’de fiber kullanılarak eksenel yük kapasitelerinin arttırılması sağlanacak kolon elemanlar için kesit boyutları oranının ikiden fazla olmaması önerilmektedir. Eliptik kesitlerde bu oran üç olabilmektedir. Kolon eksenel basınç dayanımının arttırılması için aşağıdaki Denk. (3.19) kullanılmaktadır.

$$f_{cc} = f_{cm} \left(1 + 2,4 \left(\frac{f_l}{f_{cm}} \right) \right) \geq 1,2 f_{cm} \quad (3.19)$$

Eşitlik (3.16) da, f_{cc} , sargılama sonucu iyileştirilen kesitin tasarım basınç dayanımı ve f_{cm} , sarılmamış beton basınç dayanımı ifade eder. f_l ise fiberin sağladığı yanal basınç dayanımı tanımlar ve aşağıdaki Denk. (3.20) ile hesap edilir.

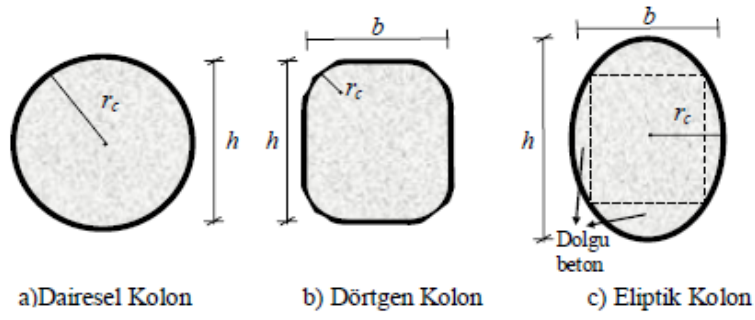
$$f_l = \frac{1}{2} K_a \delta_f \epsilon_f E_f \quad (3.20)$$

Denklem (3.17) görülen δ_f , Lifli polimerin hacimsel oranıdır ve aşağıdaki Denk. (3.21) ile hesaplanır.

$$\delta_f = N_k \frac{w_f(b+h)2t_f}{b h s_f} \quad (3.21)$$

Denklem (3.17) görülen K_a ise kesit şekil etkinlik katsayısı olup farklı şekiller için farklı değerler almaktadır. Şekil 3.4 de gösterilen farklı geometrilerdeki kesitler için K_a değeri aşağıda verilen Denk. (3.22) ile bulunur.

$$K_a = \begin{cases} 1 & \text{Dairesel kesit} \\ (b/h) & \text{Elips kesit} \\ 1 - \frac{(b-2r_c)^2 + (b-2r_c)^2}{3 b h} & \text{Dikdörgen Kesit} \end{cases} \quad (3.22)$$



Şekil 3.4. Farklı kesitler için dikkate alınacak köşe yuvarlatma yarıçapları

3.4. Kolonların Sünekliliğinin Arttırılması

TDY 2007’ de doğrusal ve doğrusal olmayan hesap yöntemleri için iki farklı süneklilik hesabı yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında sadece doğrusal hesap yöntemlerinin uygulanması durumu dikkate alınmıştır.

Ayrıca FRP ile sargılamada kolonların sünekliliğinin arttırılabilmesi için, kolon kesitinin uzun boyutunun kısa boyutuna oranı ikiden fazla olmaması şartı getirilmiştir. Eliptik kesitlerde uzun boyutun kısa boyuta oranı en fazla üç olabilir. FRP ile sargılanmış bir kolonda sargılanmış beton basınç dayanımına karşı gelen birim kısalma ε_{cc} aşağıdaki denklem ile belirlenir.

$$\varepsilon_{cc} = 0,002 \left(1 + 15 \left(\frac{f_l}{f_{cm}} \right)^{0,75} \right) \quad (3.23)$$

3.5. Kolonlarda Yetersiz Bindirme Boyu İçin Sargılama

TDY 2007’de bu uygulama için iki önemli bağımlı şart getirilmiştir.

1. Kesit boyut oranı ikiden büyük olan ($\frac{h}{b} > 2$) veya boyuna donatıları düz yüzeyli olan kolonlar için sargı etkisi yetersiz olacağından bindirme bölgelerinin güçlendirmesi FRP sargısı ile yapılamaz denilmektedir. Boyuna donatıları nervürlü olan kolonlarda bindirme boyu yetersizliğini gidermek üzere gereken LP kalınlığı Denk.(3.24)’e göre hesaplanır. Yönetmelikte f_{hs} hesabında formulasyon hatası olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu tezde f_{hs} nın hesabında Washington Karayolları Müdürlüğü’ne verilmek üzere hazırlanmış ve Chicago üniversitesince hazırlanmış bir teknik rapordan faydalanılmıştır. (Endeshaw ve ark, 2008)

$$t_f = \frac{500b(f_k - f_{hs})}{E_f} \quad (3.24)$$

$$f_k = \frac{A_s f_{ym}}{\left[\frac{P}{2n} + 2(\phi + d') \right] L_s} \quad (3.25)$$

Burada f_k donatı bindirmelerinin oluşturduğu kenetlenmenin sağlayacağı basınç dayanımı olarak ifade edilebilir. (The Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation-2008). Burada etriye hacimsel oranı, ρ_f

$$\rho_f = \frac{A_w}{S_{etriye} [(h-2R_c) + (b-2R_c)]} \quad (3.26)$$

ve enine donatıda oluşan gerilme, f_{hs}

$$f_{hs} = 0.5K_a \rho_f 0.001 E_s \quad (3.27)$$

$$P = 2 \left[\left(b - 2d' + \frac{\phi_{boyuna}}{2} + \phi_{etriye} \right) + \left(h - 2d' + \frac{\phi_{boyuna}}{2} + \phi_{etriye} \right) \right] \quad (3.28)$$

S_{etriye} : Etriye aralığı, b : kesit genişliği, f_{hs} : enine donatıda 0.001 birim uzamaya karşılık gelen gerilme, A_s , kolon donatı alanı (tek çubuk için), f_{ym} mevcut donatı akma

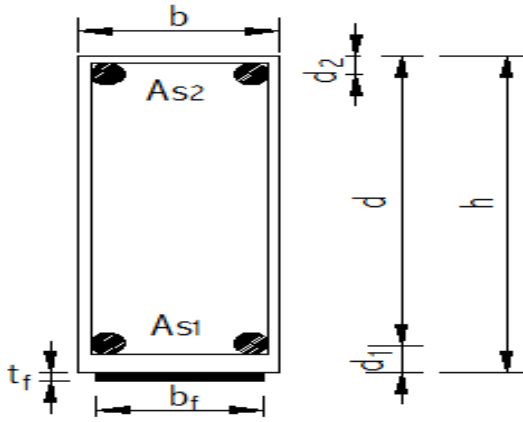
dayanımı, p çekirdek kesiti çevresi, n bindirme yapılmış donatı sayısı, ϕ donatı çapı, d' pas payı kalınlığı ve L_s varolan bindirme boyudur.

4. ANALİTİK DENKELEMLER İLE KAPASİTE HESAPLARI

Bölüm 3 de geliştirilen analitik denklemler bu bölümde sırası ile lifli polimer kompozit sargılı kirişlerin moment taşıma kapasitesi, kiriş kesme dayanımının artırılması, kolon aksenal basınç dayanımının artırılması, kolon sünekliliğinin artırılması ve kolon yetersiz bindirme boyu için sargılama hesaplamalarında kullanılacaktır.

4.1. Lifli Polimer Sargılı Kirişin Moment Taşıma Kapasitesi Hesabı

Lifli polimeri kompozit sargılı kirişlerin moment taşıma kapasitesinin hesabı için kesit geometrik özellikleri ve donatı detayları Şekil 4.1 de gösterilen kiriş kullanıldı.



Şekil 4.1. Eğilme hesabı için mevcut betonarme kiriş geometrik özellikleri, yüklemesi ve donatı detayları

Bu hesaplamalarda servis yükünden dolayı oluşan moment, $M_o=20$ kNm ve tasarım yükü momenti, $M_d=50$ kNm olarak alındı. Kullanılan betonarme kiriş geometrik özellikleri Tablo 4.1 de, beton malzeme özellikleri Tablo 4.2, çelik donatı malzeme özellikleri, Tablo 4.3 de ve sargı malzemesi olarak kullanılan lifli polimer kompozit malzemenin özellikleri ise Tablo 4.4 de verildi.

Tablo 4.1. Betonarme Kiriş Geometrik Özellikleri

Kiriş Genişliği (b)	250 mm
Kiriş Derinliği (h)	500 mm
Basınç Bölgesi Paspayı (d_2)	25 mm
Çekme Bölgesi Paspayı (d_1)	25 mm

Tablo 4.2. Betonarme Kiriş Mukavemet Özellikleri

Elastisite Modülü (E_c)	21961 MPa
Karakteristik Basınç Dayanımı (f_{ck})	6 MPa
Hesap Basınç Dayanımı (f_{cd})	4 MPa
Maksimum Birim Ezilme Kısılması (ϵ_{cu})	0.003
Tasarım Çekme Dayanımı (f_{ctd})	0.57 MPa

Tablo 4.3. Çelik Donatısı Mukavemet Özellikleri

Elastisite Modülü (E_s)	200000 MPa
Karakteristik Çekme Dayanımı(f_{yk})	220 MPa
Hesap Çekme Dayanımı(f_{yd})	191.3 MPa
Çekme Bölgesi Donatısı Alanı(A_{s1})	157.08 mm ²
Basınç Bölgesi Donatısı Alanı(A_{s2})	157.08 mm ²

Tablo 4.4. Karbon Fiber Mukavemet Özellikleri

Elastisite Modülü (E_s)	130000 MPa
Fiber Genişliği (b_f)	250 mm
Fiber Kalınlığı (t_f)	1 mm
Kopma Uzaması ϵ_{fu}	0.0176
Limit Uzama(ϵ_{fl})	0.006
Enkesit Alanı (A_f)	250 mm ²

Öncelikle mevcut kirişin servis yükleri altında çatlayıp çatlamadığı Denk.(3.1) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$M_{cr}=2,5*0,57*\frac{250*500^2}{6}=14,88 kN \quad (4.1)$$

Yukarıda elde edilen sonuç servis yükünden dolayı oluşan moment, M_o ile karşılaştırıldığında $M_{cr} < M_o$ olduğundan kesit çatlamıştır. Bu durumda çatlamış kesit derinliği hesaplanacaktır. Çatlamış kesit atalet momenti hesabından önce dönüştürülmüş

enkesit hesabı yapılır. Bunun için donatının bulunduğu düzeylerde çelik ve betondaki birim deformasyonlar eşit olarak alındı. ‘Modüler Oran’ olarak çelik ve beton elastisite oranları $n = E_s/E_c$ şeklinde alınır ve Denk (3.2) kullanılarak çift donatılı dikdörtgen kesitin çatlama kesit tarafsız eksen derinliği, $n=E_s/E_c=200000 / 21961=9,11$ alınarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$0.5*250*x_o^2+(9.11-1)*157.08*(x_o-25)=9.11*157.08*(475-x_o) \quad (4.2)$$

$$x_o=65,4 \text{ mm}$$

Yukarıda hesaplan çatlama kesit derinliği, x_o Denk. (3.3) de kullanılarak, çatlama kesit atalet momentini aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$I_{cr}=\frac{250*65,4^3}{3}+(9,11-1)*157,08*(65,4-25)^2+9,11*157,08*(475-65,4)^2 \quad (4.3)$$

$$I_{cr}=2,65*10^8 \text{ mm}^4$$

Çatlama kesit derinliği ve atalet momentini kullanarak mevcut kesit üst lifinde oluşan birim deformasyon miktarı ϵ_{co} Denk. (3.4) kullanılarak aşağıdaki gibi bulunur.

$$\epsilon_{co}=\frac{2*10^7*65,4}{21961*2,65*10^8}=0,0002 \quad (4.4)$$

Kesit alt lifinde oluşan betondaki birim deformasyon ϵ_o ise uygunluk denkleminde aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\epsilon_o=0,00022*\frac{500-65,4}{65,4}=0,0015 \quad (4.5)$$

Denk (4.1) ‘ de elde edilen sonuca göre mevcut kiriş çatladığından FRP ile sargılanmış kiriş kesitinin Denk (3.6) kullanılarak taşıma kapasite hesapları yapılır. Bu hesaplamada çekme donatısının aktığını ve beton üst lifinin maksimum birim kısalmaya ulaştığı kabulü yapılır. İlk olarak Denk. (3.6) kullanılarak kompozit kesite ait x tarafsız eksen derinliği aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$0,85^2 * x * 4 * 250 + 157,08 * 200000 * \left(0,003 * \frac{x-25}{x}\right) - 157,08 * 191,3 - 250 * 130000 * \left(0,003 * \left(\frac{500-x}{x}\right) - 0,0015\right) \quad (4.5)$$

$$x = 157,7$$

Denk. (4.4)'de elde edilen değer Denk (3.7) kullanılarak basınç donatısı birim uzama kontrolü aşağıdaki gibi yapıldı:

$$\varepsilon_s = 0,003 * \frac{157,7-25}{157,7} = 0,0025 \leq \frac{191}{200000} = 0,00096 \quad (4.6)$$

Denk.(4.6) sonucuna bakıldığında şartın sağlanmadığı görülmektedir. Basınç donatısında oluşan birim uzama akma birim uzamasından büyük olduğundan Denk (3.9) ve Denk (3.10) 'da verilen moment kapasitesi hesabında, $E_s \varepsilon_s = f_{yd}$ ve fiber için izin verilen uzama değeri $\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h-x}{x} - \varepsilon_o$ alınarak FRP' siz Moment Kapasitesi

$$M_{rd1} = 157,08 * 191,3 * (475 - 0,4 * 157,7) + 157,08 * 191,3 * (0,4 * 157,7 - 25) = 13,52 \quad (4.7)$$

olarak hesaplandı. Bulunan M_{rd1} kiriş için istenen tasarım momenti M_d ile karşılaştırılır. $M_{rd1} < M_d$ 'den küçük olduğundan FRP' li kesitin moment kapasitesi M_{rd2} hesaplanmalıdır. FRP li Kesit Moment Kapasitesi Hesabı için ise Denk (3.10) kullanıldığında

$$M_{rd2} = 157,08 * 191,3 * (475 - 0,4 * 157,7) + 250 * 130000 * 0,003 * \frac{(500 - 157,7)}{157,7} + 157,08 * 200000 * (0,4 * 157,7 - 25) = 86,7 \text{ kNm} \quad (4.8)$$

$$157,08 * 200000 * (0,4 * 157,7 - 25) = 86,7 \text{ kNm}$$

olarak hesaplandı. Hesaplanan M_{rd2} kiriş için istenen tasarım momenti $M_d = 50 \text{ Nm}$ ' den büyük olduğundan yapılan güçlendirme yeterlidir. Verilen lifli malzeme özelliklerine göre güçlendirilen betonarme kirişin moment kapasitesinin hesabından sonra çekme donatısının aktığı ve lifli polimerde oluşan birim uzamanın limit değerler içerisinde kaldığı kontrol edilmelidir.

İlk olarak çekme donatısı akma kontrolü Denk.(3.11)' e göre (ε_{s1}) birim şekil değiştirmesi üzerinden aşağıdaki eşitsizliğin sağlanıp sağlanmadığına bakılarak yapılır.

$$\varepsilon_{sl} = \varepsilon_{cu} \frac{d-x}{x} \geq \frac{f_{yd}}{E_s} \quad (4.9)$$

$\frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{191,3}{200000} = 0,00096$ olarak hesaplandığından

$$\varepsilon_{sl} = 0,003 * \frac{475-157,7}{157,7} = 0,006 \quad (4.10)$$

Şeklinde hesaplanır ve $0,006 > 0,00096$ çekme donatısı akmıştır.

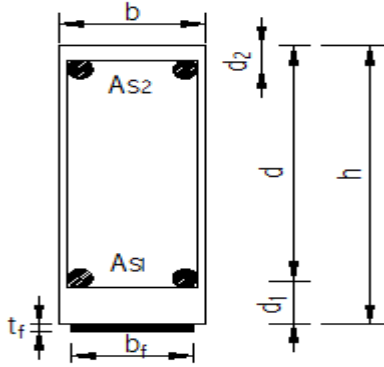
Lifli polimer limit uzama kontrolü Denk. (3.8)' e göre ($\varepsilon_f \leq \varepsilon_{flimit}$) eşitsizliği kontrol edilerek $\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \frac{h-x}{x} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon_{flimit}$ şartını sağlamalıdır. Burada $\varepsilon_{flimit} = 0,006$ kullanılacak lifli polimer için izin verilen emniyetli uzama değeridir. Bu eşitsizlik kontrolü yapıldığında

$$\varepsilon_f = 0,003 * \frac{500-157,7}{157,7} - 0,0015 = 0,005 \quad (4.11)$$

Lifli polimer birim limit uzaması hesaplanır ve eşitsizlik $0,006 > 0,00096$ olarak bulunduğu için çekme donatısı akmıştır. Eşitsizliğin $0,005 < 0,006$ olması durumunda lifli polimer uzaması sınır değerler içerisinde kalmıştır.

4.2. Kiriş Kesme Dayanımının Arttırılması Hesabı

Aşağıda kiriş için geometrik özellikler ve malzeme bilgileri verilmiştir. Bu hesaplamalarda kiriş için istenen tasarım kuvveti, $V_d=500$ kN olarak alındı. Kullanılan betonarme kiriş geometrik özellikleri ve donatı detayı Şekil 4.2. ve Tablo 4.5.'te, beton malzemesi özellikleri Tablo 4.6 da, çelik donatı malzeme özellikleri Tablo 4.7'de ve sargı malzemesi olarak kullanılan lifli polimer kompozit malzemenin özellikleri ise Tablo 4.8 de verildi.



Şekil 4.2. Kesme hesabı için mevcut betonarme kiriş geometrik özellikleri ve donatı detayları

Tablo 4.5. Kiriş geometrik özellikleri

Kiriş genişliği (b)	300mm
Kiriş derinliği (h)	750mm
Basınç bölgesi paspayı (d_2)	48mm
Çekme bölgesi paspayı (d_1)	73mm

Tablo 4.6. Betonarme kiriş mukavemet özellikleri

Elastisite modülü (E_c)	26000 MPa
Karakteristik basınç dayanımı (f_{ck})	33 MPa
Hesap basınç dayanımı (f_{cd})	22 MPa
Maksimum ezilme kısalması (ϵ_u)	0.003
Tasarım çekme dayanımı (f_{ctd})	2 MPa

Tablo 4.7.Çelik Donatısı Mukavemet Özellikleri

Elastisite modülü (E_s)	200000 MPa
Karakteristik çekme dayanımı(f_{yk})	570 MPa
Hesap çekme dayanımı(f_{yd})	496 MPa
Çekme bölgesi donatısı alanı(A_{s1})	1257 mm ²
Basınç bölgesi donatısı alanı(A_{s2})	2513 mm ²
Etriye donatısı: $\Phi 8/150$	

Tablo 4.8.Karbon Fiber Mukavemet Özellikleri

Elastisite modülü (E_s)	160000 MPa
Fiber genişliği (b_f)	150 mm
Fiber kalınlığı (t_f)	0.4 mm
Kopma uzaması ε_{fu}	0.0176
Limit uzama(ε_{fl})	0.006
Enkesit alanı (A_f)	60 mm ²

Öncelikle TS500'e göre betonarme bir kesitin kesmede çatlama dayanımı (V_{cr}) için daha kesin hesap yapılamadığı durumlar için aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$V_{cr}=0,65f_{ctd}bd\left(1+\gamma\frac{N_d}{A_c}\right) \quad (4.12)$$

Burada f_{ctd} beton hesap çekme dayanımını, b kiriş genişliğini, d kesit faydalı yüksekliğini, N_d kirişe gelen eksenel yükü ve A_c ise kesit alanını göstermektedir. γ için ise eksenel basınç ve çekme durumu için farklı katsayılar önerilmiştir. Fakat burada yapacağımız hesaplamalar için kirişin eksenel yük durumu ihmal edildi ve sadece betonun kesme dayanımına katkısı $0.8V_{cr}$ alınarak Denk. (3.15) ile aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$V_c=0,52*2*300*677*10^{-3}=211,22 \text{ kN} \quad (4.13)$$

Kiriş etriyelerinin kesme katkısı (V_w) Denk. (3.16) ile aşağıdaki gibi bulunur,

$$V_w = 2 * 50 * 496 * 677 * \frac{10^{-3}}{150} = 225 \text{ kN} \quad (4.14)$$

Verilen kirişin toplam kesme kapasitesi (V_r) ise beton ve etriyelerin toplam kesme dayanımı olarak aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$V_r = V_c + V_w \text{ ise } V_r = 211.22 + 225 = 436.22 \text{ kN} \quad (4.15)$$

(V_r) kesme kapasitesi hesaplanan mevcut kirişin (V_d) tasarım kesme kuvvetinden düşük olduğu görülmektedir. Aradaki yük farkı (FRP) lifli polimer kullanılarak kesmeye karşı güçlendirilecektir.

$$V_f = V_d - V_r \text{ ise } V_f = 500 - 436.22 = 63.78 \text{ kN} \quad (4.16)$$

İhtiyaç duyulan lifli polimer alanı (A_f), Denk.(3.18) kullanılarak aşağıdaki gibi bulunabilir,

$$A_f = \frac{200 * 63780}{2 * 1 * 160000 * 0,006 * 677} = 9,82 \text{ mm}^2 \quad (4.17)$$

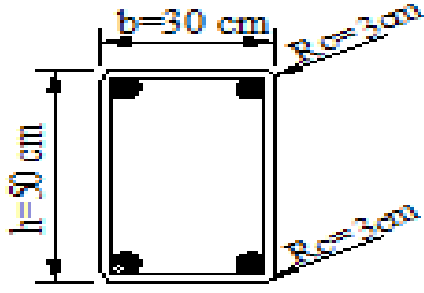
Kesit alanı bulunan lifli polimerin kalınlığı (t_f) aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir.

$$t_f = \frac{A_f}{w_f} = \frac{9,82}{150} = 0,065 < 0,4 \cong 1 \quad (4.18)$$

Denk. (4.18) 1 kat fiber kullanımının yeterli olduğu bulunmuştur.

4.3. Kolonların Eksenel Basınç Dayanımlarının Arttırılması

Aşağıda geometrik ve malzeme özellikleri verilen betonarme kolonun basınç dayanımının lifli polimer kullanarak arttırılması hesabını yapalım. Söz konusu kolonun hesap basınç dayanımı $f_{cm} = 8 \text{ MPa}$ olsun. Söz konusu betonarme kolonun geometrik özellikleri Şekil 4.3.'te, ve sargı malzemesi olarak kullanılan lifli polimer kompozit malzemenin özellikleri ise Tablo 4.9' ta verildi. Kullanılacak lifli polimer (CFRP) katman (tabaka) sayısı $N_k = 1$ olsun.



Şekil 4.3. Mevcut Betonarme Kolon Geometrik Özellikleri

Tablo 4.9. Karbon fiber mukavemet özellikleri

Elastisite Modülü (E_s)	160000 MPa
Fiber Genişliği (w_f)	150 mm
Fiber Kalınlığı (t_f)	0.4 mm
Fiber aralıkları (s_f)	200 mm
Limit Uzama (ϵ_{fl})	0.004
Enkesit Alanı (A_f)	60 mm ²

İlk olarak verilen kesitin TDY2007' ye göre (Mad.7E.2.) boyut tahkiki yapıldı. Burada sağlanması gereken koşul $\left(\frac{h}{b}\right) \leq 2$ olması gerekir. Buna göre yapılan kontrolde $\left(\frac{50}{30}\right) = 1.67 \leq 2$ olarak bulunduğundan koşul sağlanmıştır. Bu koşul sağlandıktan sonra bölüm 3 de geliştirilen denklemler kullanılarak sırası ile aşağıda belirtilen hesaplamalar yapıldı. Denk.(3.21) kullanılarak lifli polimer hacimsel oranı,

$$\delta_f = 1 * \frac{150 * (300 + 500) * 2.0.4}{300 * 500 * 200} = 0,0032 \quad (4.19)$$

Verilen kolonun şekil etkinlik katsayısı (K_a) Denk.(3.22) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$K_a = 1 - \frac{(30 - 2 * 3)^2 + (50 - 2 * 3)^2}{3 * 50 * 30} = 0,163 \quad (4.20)$$

Denk.(3.20) yardımı ile kullanılan lifli polimerin sağladığı yanal basınç dayanımı (f_1)

$$f_1 = \frac{1}{2} * 0,163 * 0,0032 * 0,004 * 160000 = 0,17 \quad (4.21)$$

ve Denk.(3.19) yardımı ile sargılanmış kolonun aksenal basınç dayanımını (f_{cc})

$$f_{cc} = 8 * \left(1 + 2,4 * \left(\frac{0,17}{8} \right) \right) = 8,4 \text{ MPa} \quad (4.22)$$

Hesaplandı. Fakat yapılan güçlendirme $1,2f_{cm} = (1,2 * 8 = 9,6)$ 'den küçük olduğundan yapılan güçlendirme yetersiz kalmaktadır. Lifli polimer miktarı arttırılmak sureti ile en az istenen değere ulaşıncaya kadar hesaplamalar aynı yol islenerek devam edilmelidir.

4.4. Kolonların Sünekliliğinin Arttırılması

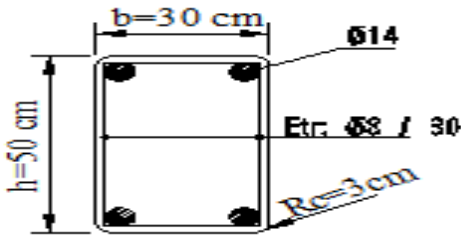
Sünekliliğin hesabı için Şekil 4.3.'te geometrik ve malzeme özellikleri verilen betonarme kolonun sargılanması durumunda sağlayacağı birim kısalma değeri hesaplandı. Bu hesaplamalar için verilenler; kesit mevcut basınç dayanımı $f_{cm} = 8$ MPa ve kullanılacak FRP katman sayısı $N_k = 1$ olarak alındı. Denk. (3.21) kullanılarak basınç dayanımına karşı gelen birim kısalma ϵ_{cc} , aynı kesite ait lifli polimerin sağladığı yanal basınç dayanımı ($f_1 = 0,17$) alınarak, aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$\epsilon_{cc} = 0,002 * \left(1 + 15 * \left(\frac{0,17}{8} \right)^{0,75} \right) = 0,0037 \geq 0,0018 \quad (4.23)$$

Bu hesaplamada TD72007 7E.3 (a) göre verilen koşulun sağlandığı görüldüğünden doğrusal elastik hesap yöntemine göre örnek kolonun sargılanmış olduğu kabul edilebilir.

4.5. Kolonların Yetersiz Bindirme Boyu İçin Sargılama

Kolonların yetersiz bindirme boyu hesabı için geometrik özellikleri Şekil 4.4' te verilen betonarme kolon kullanıldı.



Şekil 4.4. Mevcut betonarme kolonun donatı detayı ve geometrik özellikleri

Betonarme kolonda var olan donatının mekanik özellikleri ile güçlendirme için kullanılacak FRP malzemesinin özellikleri Tablo 4.10' da verildi

Tablo 4.10. Kullanılan malzeme ve kesit geometrik özellikleri

Fiber elastisite modülü (E_f)	160000 MPa
Donatı çeliği elastisite modülü	200000 MPa
S420 Mevcut donatı çeliğin tasarım akma dayanımı (f_y)	365 MPa
Boyuna donat çapı ve adedi	4 Φ 14
Etriye çapı ve aralığı	8/300 mm
Var olan bindirme boyu	150 mm
Kesit derinliği (h)	500 mm
Kesit genişliği (b)	300 mm
Paspayı (d')	25 mm

Verilen bu kesite ait bindirme boyu hesabı için sırası ile aşağıdaki hesaplamalar yapıldı
Boyuna donatı alanı tek çubuk için (A_s),.

$$A_s = \frac{\pi \cdot 14^2}{4} = 153,94 \text{ mm}^2 \quad (4.24)$$

Etriye alanı (A_w),

$$A_w = \frac{\pi \cdot 8^2}{4} = 100,5 \text{ mm}^2 \quad (4.25)$$

Denk.(3.26) yardımı ile kesitte var olan etriyelerin hacimsel oranını (ρ_f),

$$\rho_f = \frac{100,5}{300 \cdot [(300 - 2 \cdot 30) + (500 - 2 \cdot 30)]} = 0,00049 \quad (4.26)$$

Denk.(3.22) kullanılarak Kesit şekil faktörü K_a ,

$$Ka=1-\frac{(500-2*30)^2+(300-2*30)^2}{3*300*500}=0,44 \quad (4.27)$$

Denk.(3.28) yardımı ile kesite ait çekirdek çevresi (p) kesitin paspayı ($d' = 2,5 \text{ cm}$) çıkarılmış ve etriye dışından itibaren hesaplan etkili çevresi,

$$P=2*\left[\left(b-2*d'+\frac{\phi_{boyuna}}{2}+\phi_{etriye}\right)+\left(h-2*d'+\frac{\phi_{boyuna}}{2}+\phi_{etriye}\right)\right]=1460 \text{ mm} \quad (4.28)$$

Denk.(3.25) kullanılarak f_{ym} : mevcut donatı akma dayanımı olmak üzere tek donatı çubuğu bindirmelerinin oluşturduğu kenetlenmenin sağlayacağı basınç dayanımı f_k ,

$$f_k=\frac{153,94*365}{\left[\frac{1460}{2*4}+2*(14+25)\right]*150}=1,48 \quad (4.29)$$

Denk.(3.27) yardımı ile kolon etriyelerin 0.001 lik birim uzamaya karşı gelen gerilme f_{hs}

$$f_{hs}=0.5*0,44*0,00049*0,001*200000=0,0216 \text{ MPa} \quad (4.30)$$

ve Denk.(3.24) yardımı ile ihtiyaç duyulan FRP kalınlığı (t_f)

$$t_f=\frac{500*300*(1,48-0,0216)}{160000}=1.36 \text{ mm} \quad (4.30)$$

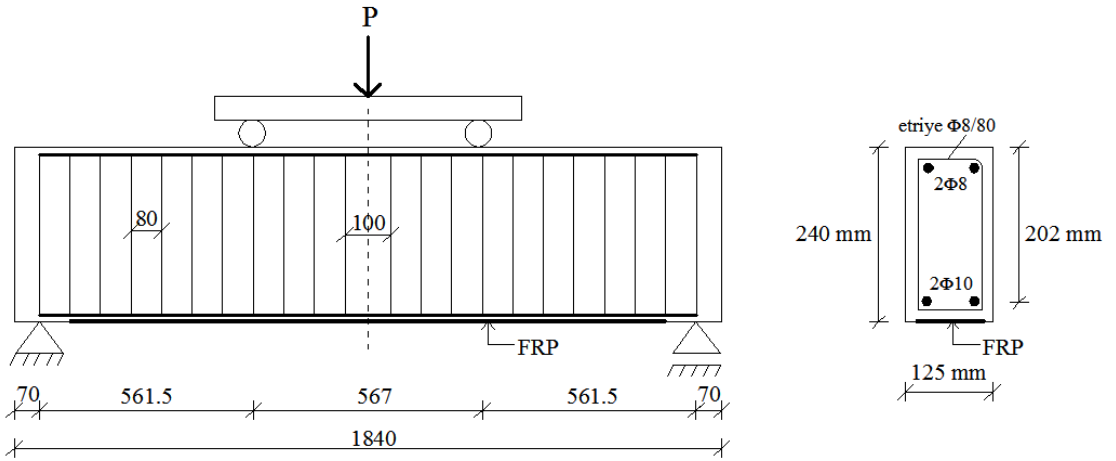
hesaplamaları yapıldı.

5.DENEYSEL VE ANALİTİK SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde tez çalışması kapsamında mevcut yönetmelikler temel alınarak geliştirilen analitik model, literatürde yer alan deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak uygulanabilirlik açısından kontrol edilecektir. 4. bölümde diğer iyileştirme yöntemleri için örnek hesap adımları açıklandığı için ayrıca burada tekrarlanmaya ihtiyaç duyulmamıştır. Ancak betonarme kirişlerin doğrusal olmayan sonlu eleman yöntemi ile modellenmesi ve bu modellemenin sonuçları da karşılaştırmada kullanılmıştır. Sonlu eleman analizi ve sonuçları Aktan ve ark (2014)'nin ACE 2014'e sunduğu bildiri çalışmasından alınmıştır.

5.1.Betonarme Deney Kirişi Eğilme Test Sonuçları ile Nümerik Sonuçların Karşılaştırılması

Bu bölümde, Hawileh ve ark. (2014) tarafından yapılan çalışmanın kapsamında bulunan ve aşağıda geometrik ölçüleri, donatı detayları ve kullanılan güçlendirme malzemeleri özellikleri tanımlanan kirişin eğilme deney test sonuçları ile analitik hesap sonucu bulunan moment kapasiteleri karşılaştırılacaktır. Hawileh ve ark. (2014) deneysel çalışmasında, 1 tanesi kontrol numunesi olmak üzere 5 farklı betonarme kirişi test etmişlerdir. 1840 mm uzunluğunda, 120 mm genişliğinde, 240 mm derinliğindeki deney kirişlerinde, 25 mm beton örtüsü bulunmaktadır. Kirişlerde kullanılan betonun 28 günlük silindirik dayanımı 50 MPa olarak bulunmuştur. Betonarme kirişin eğilme donatıları; 2Φ10 ($A=154 \text{ mm}^2$) çekme donatısı ve 2Φ8 ($A=98 \text{ mm}^2$) basınç donatısı olarak düzenlenmiştir. Kesme göçmesini önlemek amaçlı yerleştirilen etriyeler, Φ8 çapında ve 80 mm aralıkta bulunmaktadır. Donatıların elastisite modülü ve çekme dayanım değerleri sırasıyla, 202 GPa ve 540 MPa'dır. Kirişler, 2500 kN kapasiteli test cihazı ile 4 noktadan yüklemeye tabi tutulmuşlardır. Deneyde kullanılan kirişlerin geometrik özellikleri, yükleme durumu ve donatı özellikleri Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1. Betonarme Deneş Kirişinin Donatı Detayı Ve Geometrik Özellikleri

Farklı FRP sargı şekilleriyle güçlendirilmiş olan kirişlerin isimleri ve açıklamaları Tablo 5.1’ de görölmektedir. Bu deneş çalışmasında kullanılan karbon lifli polimer (CFRP) malzemesinin elastisite modülü 119250 MPa, cam lifli polimer (GFRP) malzemesinin elastisite modülü ise, 34130 MPa olarak ölçölmüştür. FRP şeritler, 112,5 mm genişliğinde ve 1520 mm uzunluğunda (kiriş açıklığının % 90’ı) boyunca uygulanmıştır. FRP,donatı ve kiriş malzemelerine ait diğere özellikler Tablo 5.2’de görölmektedir.

Aşağıda B, BC, BG, BGC ve BGCG kirişlerine ait nümerik model sonuçları ve moment hesap kapasitesi sonuçları değerelendirilmiştir.

Tablo 5.1. Betonarme Deneş Kirişinin Güçlendirme Şekilleri

Kiriş İsmi	Açıklama
B	Kontrol Kiriş (Tablasız, çift donatılı ve güçlendirmesiz)
BC	Tek tabaka CFRP ile güçlendirilmiş kiriş
BG	Tek tabaka GFRP ile güçlendirilmiş kiriş
BGC	Sırasıyla bir tabaka CFRP ve bir tabaka GFRP ile güçlendirilmiş kiriş
BGCG	Sırasıyla birer tabaka GFRP+CFRP+GFRP ile güçlendirilmiş kiriş

Tablo 5.2. Betonarme Deney Kirişinin Ve Güçlendirme Malzemelerinin Özellikleri

	Malzeme Cinsi			
	Beton	Karbon Fiber	Cam Fiber	Donatı
f_{cd} (MPa)	50			
f_{yd} (MPa)				540
E (MPa)	36980	119250	34130	202000
t_f (mm)		0,348	0,352	
ϵ_{flimit} (%)		1,7	3,5	
b_f (mm)		112,5	112,5	
A_s (mm ²)				2Ø10
$A_{s'}$ (mm ²)				2Ø8



Şekil 5.2. B Kirişinin Yük Altında Deformasyonu (Hawileh ve ark. 2014)



Şekil 5.3. BC Kirişinin Yük Altında Deformasyonu (Hawileh ve ark. 2014)



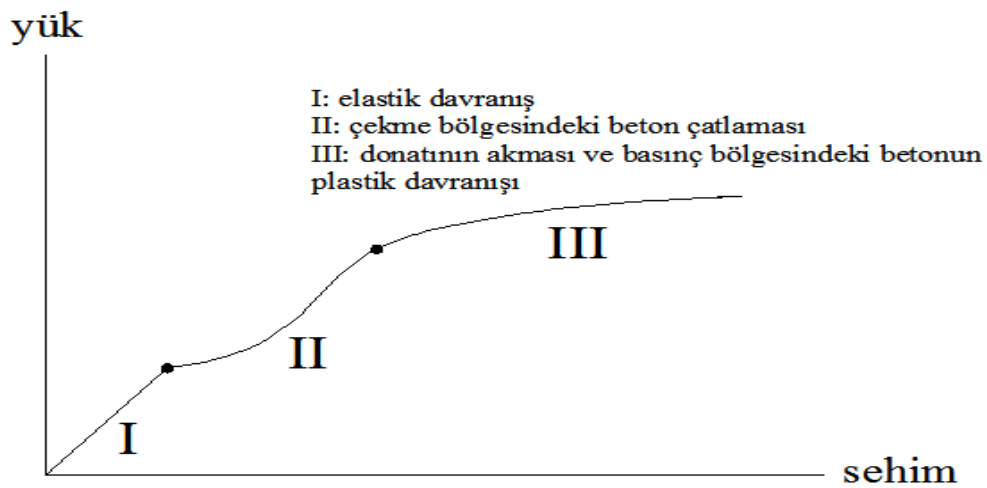
Şekil 5.4. BG Kirişinin Yük Altında Deformasyonu (Hawileh ark., 2014)

Bu deney sonuçlarına göre elde edilen maksimum eksenel yükler aşağıdaki Tablo 5.3'te görülmektedir.

Tablo 5.3. Deney Kirişinde Elde Edilen Göçme Kuvvetleri ve Göçme Modları

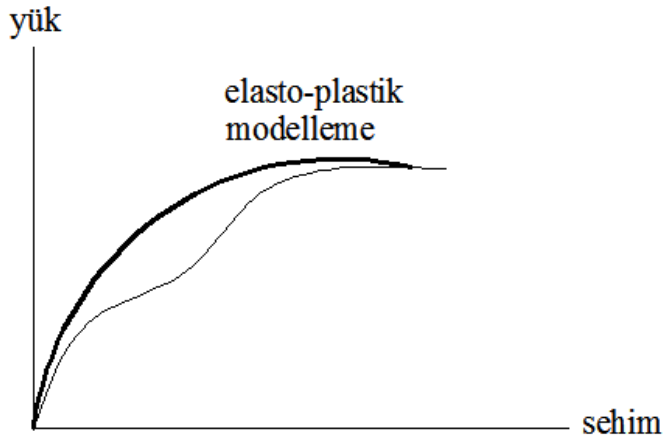
Deney Kirişinin Adı	Göçme Yükü (kN)	Göçme Türü / Sırası
B (Kontrol Kirişi)	58.78	Çekme Donatı akması+Beton Kırılması
BC (Tek tabaka CFRP)	92.44	Çekme Donatı akması+CFRP Kopması
BG (Tek tabaka GFRP)	76.84	Çekme Donatı akması+Bölgesel GFRP sıyrılması+Mesnette beton ezilmesi
BGC (Birer tabaka GFRP ve CFRP)	107.59	Çekme Donatı akması+Kısmi FRP sıyrılması+Eğilme çatlakları+Mesnette beton ezilmesi
BGCG (Birer tabaka GFRP, CFRP ve GFRP)	116.41	Çekme Donatı akması+Beton Kırılması

Aktan ve ark. (2014) çalışmasında söz konusu kirişlerin sonlu eleman modellemeleri yapılmıştır. Betonarme bir kirişin doğrusal olmayan davranışını 3 kısma ayırmak mümkündür. İlki çekme bölgesindeki betonun çatlaması, ikincisi çekme donatısının akması, üçüncüsü ise basınç bölgesindeki betonun plastik davranış göstermesidir. Çatlak boyunca oluşan agrega kenetlenmesi, donatının kendini çevreleyen betonadan sıyrılması ve çatlağa dik olarak gelişen kaldıraç etkisi gibi interfaz davranışlar da ayrıca modellemede düşünülmesi gereken diğer etkenlerdir. Aktan ve diğ. (2014) nin betonarme kirişlerin modellenmesinde için seçtikleri yaklaşım, elasto-plastik hasar modelinin kullanılmasıdır. Önceki çalışmalardan Köksal ve ark. (2012, 2013); basınç ve/veya kesme etkisindeki FRP ile güçlendirilmiş yığma kolon ve duvarların elasto-plastik malzeme yaklaşımıyla sonlu eleman analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Burada elasto-plastik yaklaşımın kullanılmasındaki temel neden, etkin olan yük etkisinin basınç olması ve basınç altındaki yarı gevrek malzemenin gösterdiği elasto-plastik davranıştır. Turgay ve ark. (2007), Köksal ve ark. (2009), Doran (2009) yalın ve FRP ile güçlendirilmiş betonarme kolonların elasto-plastik malzeme ve izotropik hasar yaklaşımı ile ayrı ayrı modellemelerini gerçekleştirmişlerdir. Betonarme kolon analizlerinde, Oliver ve ark. (1990) izotropik hasar modeli kullanılırken yüksek hasar eşiği değerleri kullanılmıştır. Kolon ve duvarların genel olarak yük-deplasman ilişkilerinde oldukça rijit bir davranış gözlenmektedir. Bunun nedeni de basınç altında oluşan çatlakların temel olarak kesme çatlağı biçiminde olmasıdır.



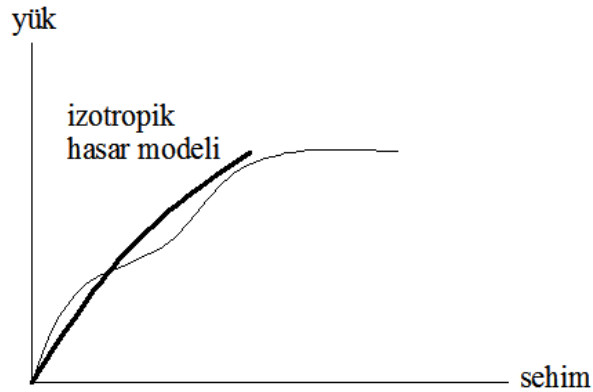
Şekil 5.5. Tipik Bir Betonarme Kirişin Yük-Sehim Eğrisi

Şekil 5.6'da görüldüğü gibi betonarme kirişlerde basınç etkisindeki kolon ve basınç-kesme etkisindeki yığma duvarlardan farklı olarak çekme çatlaklarının gelişmesi davranışta belirleyici rol oynamaktadır. Bu nedenle daha önceki çalışmalarda Drucker-Prager kırılma teoremini kullanan ve kohezyon ile içsel sürtünme açısının kalibrasyonunu temel alan elasto-plastik yaklaşımın kullanılması durumunda çekme çatlakları sonucunda oluşacak rijitlik kaybının analizlere yansıtılmasında problem oluşacaktır.



Şekil 5.6. Betonarme Kiriş Modellemesinde Elasto-Plastik Model Yaklaşımı

Buna karşılık izotropik hasar yaklaşımının (Oliver ark., 1990) kullanılması durumunda ise, hasar eşiği aşıldığı andan itibaren, beton gereğinden zayıf davranış gösterecek ve donatı çeliğinin plastik davranışının analizlere gerçekçi bir şekilde yansımını engelleyecektir. Bunu önlemek için hasar eşiğinin yüksek seçilmesi durumunda ise, daha güçlü bir kiriş davranışı ortaya çıkacaktır.



Şekil 5.7. Betonarme Kiriş Modellemesinde İzotropik Model Yaklaşımı (Oliver ark., 1990)

Elasto-plastik teorisinin beton ve betonarme gibi gevrek/yarı gevrek bir malzeme için seçilmesinin başlıca amacı uygulama kolaylığı ve yapı analiz programlarındaki yaygınlığıdır. FRP gibi güçlü kuşatma ve sargı mekanizmalarıyla daha da plastik hale getirilen davranışın özellikle Drucker-Prager akma/kırılma kriterini kullanan plastisite yaklaşımlarıyla çözümü sayısal açıdan avantaj sağlamaktadır. Ayrıca incelenen eleman ağırlıklı olarak basınç etkisinde ise çekme gerilmelerinin etkinliğinin az olduğu kabulü ile yapılan çözümlerden oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Çekme davranışının etkisini arttırmasıyla beraber sonlu eleman analizleri yük-deplasman eğrileri için daha rijit bir davranış öngörerek gerçekte olduğundan daha düşük deplasman değerleri tahmin etmeye başlamaktadırlar. Bu durum özellikle betonarme kirişler söz konusu olduğunda daha açık olarak gözlenmektedir. Bu nedenle tek başına elasto-plastik teori gerçek davranışın tahmin edilmesinde yetersiz kalmaktadır. Ancak, malzeme parametrelerinin uygun kalibrasyonlarının yapılması ile kirişlerin taşıma gücü değerleri doğru olarak tahmin edilebilir. Ancak, bu yük değerlerine karşılık gelen deplasmanlar gerçekte ölçülen değerlerden daha küçük olacaktır. Bunun nedeni betonarme kirişlerde davranışı çekme çatlaklarının oluşması ve bunun sonucunda oluşan çekme donatısının akmasının belirlemesidir. Bir başka deyişle betonarme kiriş modellenmesinde hem plastik davranışın sağlıklı bir şekilde gelişmesi hem de betondaki çekme çatlakları dolayısıyla oluşan rijitlik kaybının analizlere gerçekçi bir şekilde yansıtılması gerekmektedir. Ana davranış biçimlerinin yanında yer alan enterfaz davranışlarının etkisinin de bu modellerinde için yer alması en pratik ve uygulanabilir yaklaşım olacaktır.

Aktan ve ark. (2014) çalışmasında yalın ve FRP ile iyileştirilmiş betonarme kirişlerin modellenmesinde elasto-plastik hasar teorisi kullanılmıştır. İzotropik hasar modeli olarak beton için Oliver ve ark. (1990)' nin önerdikleri model temel alınmıştır. Bu model daha önce betonarme ve yığma kolonlarda kullanılmıştır (Köksal ve ark. 2009, Doran, 2009, Köksal ve ark., 2004a). Bu modelde gerekli parametrelerin ilki başlangıç hasar eşiği τ^* dır ve:

$$\tau^* = \frac{f_t}{\sqrt{E_o}} \quad (5.1)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Bu bağıntıda yer alan eksenel çekme dayanımı f_t , TS 500'de önerilen bağıntı yardımıyla bulunabilir:

$$f_t = 0,35 \sqrt{f_c}$$

Burada f_c , betonun deneysel olarak ölçülen eksenel basınç dayanımı değerini göstermektedir. Başlangıç hasar eşiği değeri, betonun çekme etkisinde elastik davranışının sonlandığı ve çekme çatlaklarının oluşmaya başladığı durumu ifade eder. f_t için literatürde önerilen farklı bağıntıların kullanılması bu değeri önemli oranda değiştirirken, analiz sonuçlarını da büyük ölçüde etkilemektedir. Hasar modelinin ihtiyaç duyduğu ikinci parametre olan A ; sonlu eleman analizleri için seçilen farklı ağ boyutlarından bağımsız sonuçlar elde edilmesi için önerilmiştir. Bu nedenle, betonun çekme altındaki kırılma enerjisi değerinden doğrudan etkilenmektedir:

$$A = \left(\frac{G_f E_0}{h f_t^2} - \frac{1}{2} \right)^1 \geq 0 \quad (5.2)$$

E_0 betonun tek eksenli basınç altındaki elastisite mdülünü göstermektedir. Bu değer yaklaşık olarak yüksek dayanımlı betonlar için:

$$E_0 = 3750 \sqrt{f_c} \quad (5.3)$$

şeklinde dikkate alınmıştır. (Ashtiani ve ark. 2013).

Bu bağıntıda G_f betonun kırılma enerjisini, h ise sonlu eleman ağının karakteristik uzunluğunu göstermektedir. G_f için Köksal ve Karakoç (1999) tarafından önerilen bağıntı aşağıdadır:

$$G_f = 15,48 d_{max} \frac{f_t^2}{E_0} \quad (5.4)$$

Burada d_{max} , beton karışımındaki en büyük agrega boyutudur ve karışımın heterojenliğinin en büyük ölçüsüdür. G_f için verilen bağıntı, Denk. (5.2)' de yerine konduğunda ve $\frac{1}{2}$ terimi ihmal edildiğinde, A için yaklaşık olarak;

$$A = \frac{h}{310} \quad (5.5)$$

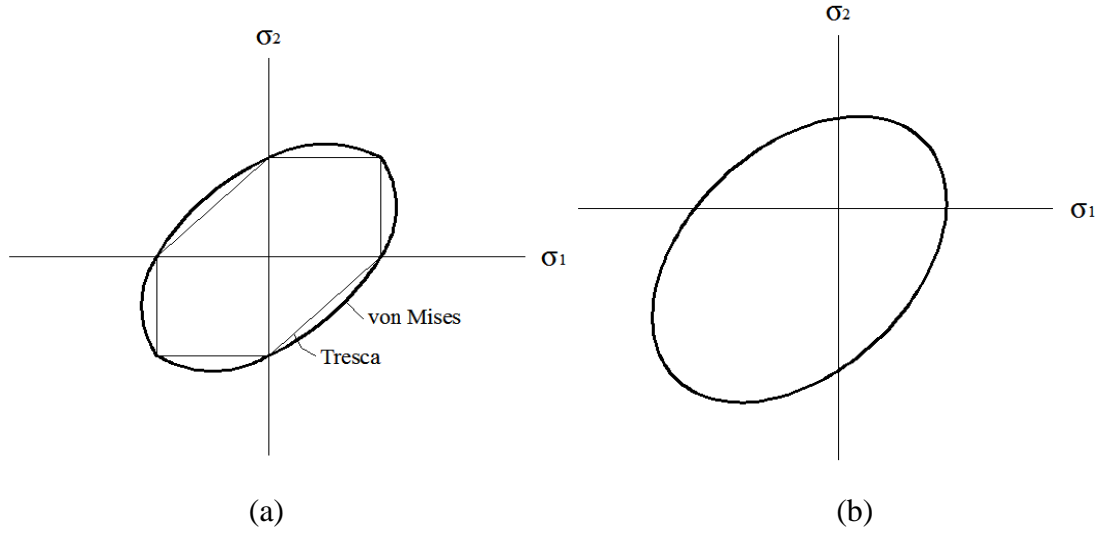
değerine ulaşılmaktadır. Burada, üç boyutlu sonlu eleman analizlerinde h için, h_x , h_y ve h_z sekiz düğüm noktalı katı elemanın boyutları olmak üzere,

$$h = \sqrt[3]{h_x h_y h_z} \quad (5.6)$$

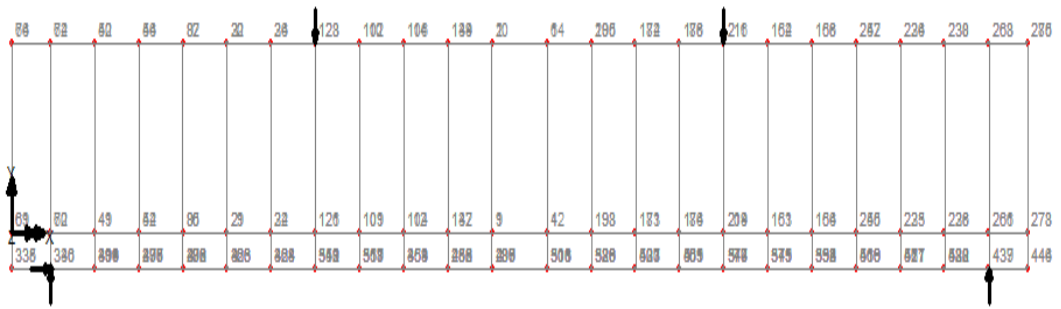
bağıntısı önerilmiştir (Bazant ve Oh 1983).

h için önerilen basitleştirilmiş bağıntı her ne kadar boyut bağımlılığından kurtarma amaçlı türetilmiş olsa da analizlerde bu etkiden tam olarak kurtulmanın mümkün olmadığı görülmüştür. Bu nedenle, bu tür analizlerde bir optimum boyut kullanılması tercih edilen yol olmalıdır (Köksal ve ark. 2004b). Bu ise, beton karışımında kullanılan en büyük agrega çapının 3 katından büyük ağ boyutu kullanmaktır. Bu seçim yapıldıktan sonra basitleştirilmiş A bağıntısının geçerliği söz konusu olacaktır. Kiriş analizlerinde bu bağıntı, sonlu eleman boyutunun 100 mm' den küçük olması durumunda geçerli olmaktadır.

Elasto-plastik analizlerde ise değiştirilmiş Von Mises teorisi kullanılmıştır. Özellikle donatı çeliği vb. metallerin davranışlarının modellenmesinde Tresca ve Von Mises kriterleri sıklıkla tercih edilmektedir. Bu modeller çekme ve basınç dayanımı aynı kabul edilecek derecede yakın olan metaller için geliştirilmiştir. Hidrostatik basınç etkisinin de davranışa yansıtılması amacıyla Şekil 5.8b'de gösterilen değiştirilmiş von Mises kriteri, yarı gevrek malzemelerde kullanılabilir. Burada tek eksenli çekme ve basınç dayanımlarının farklı tanımlanması ile betonun çekme altındaki davranışı daha gerçekçi modellenebilmektedir. Analizlerde beton basınç dayanım değeri deneysel olarak ölçülen değer seçilmiş, çekme dayanımı ise TS 500 bağıntısı ile bulunmuştur.

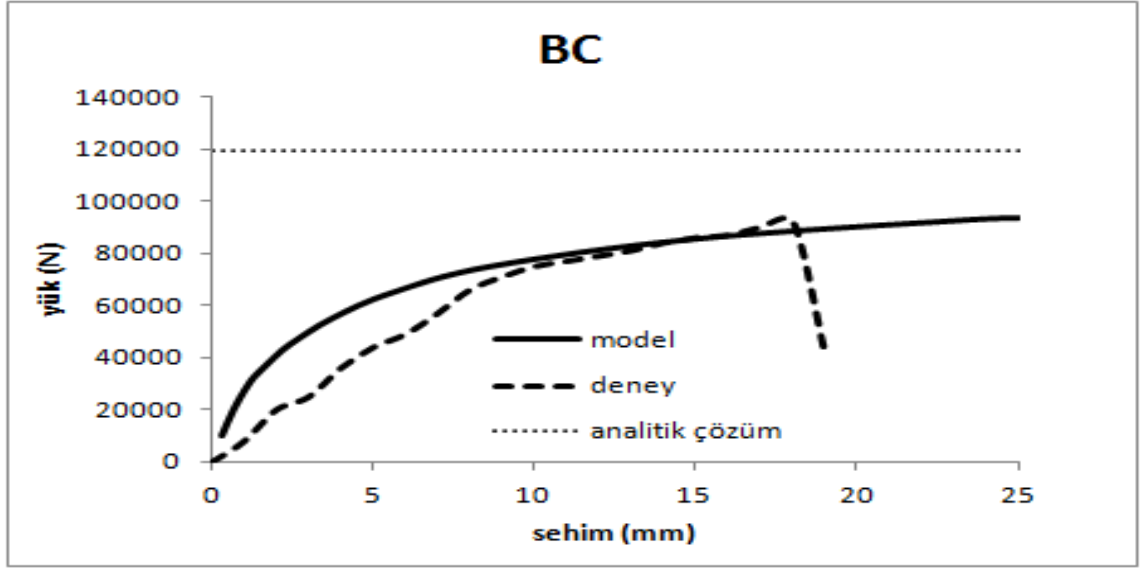


Şekil 5.8. Tresca, von Mises,değiştirilmiş von Mises akma kriteri

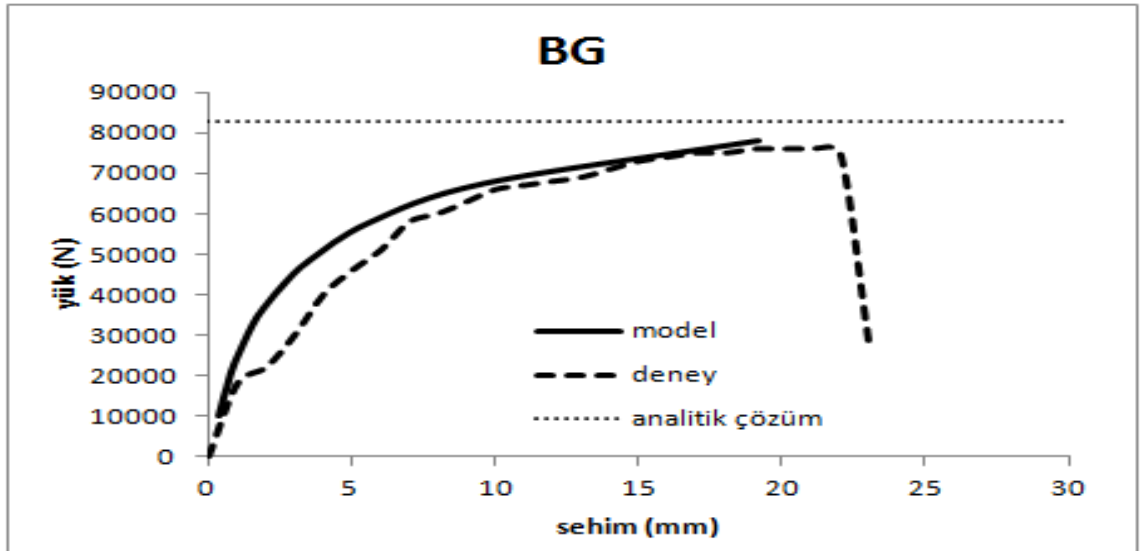


Şekil 5.9. Deney Kirişinin Nümerik Modeli

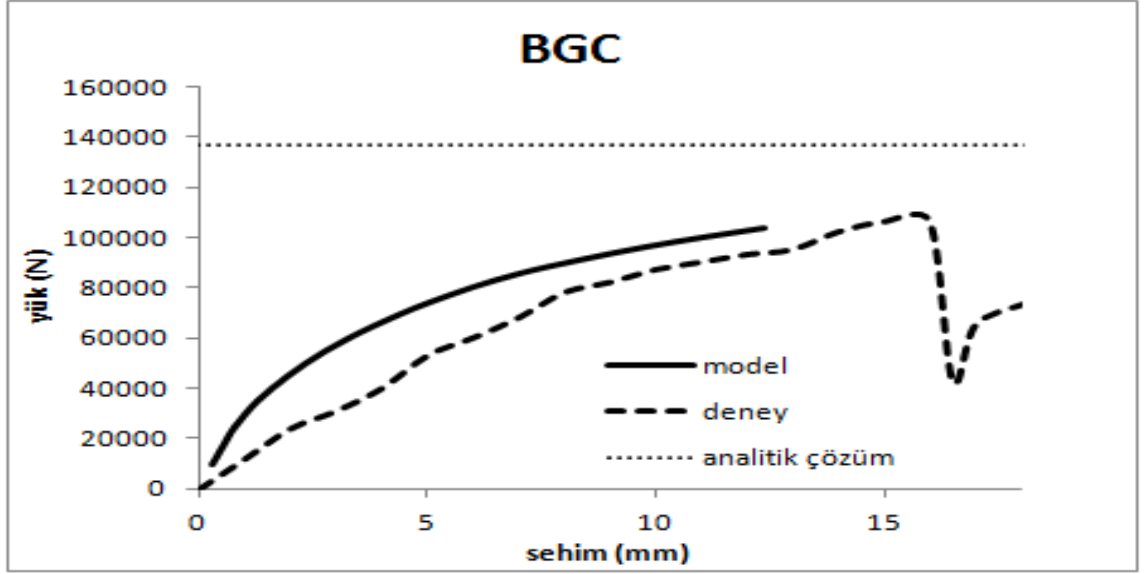
Şekil 5.9’ da verilen model dikkatle incelendiğinde basınç donatısının üzerinde kalan ince beton örtüsünün ihmal edildiği ve modellemeye basınç donatısından başlandığı görülebilir. Ancak aynı durum çekme bölgesi için mümkün olamamaktadır. Bunun başlıca nedeni, bu bölgedeki betonun elemanın rijitlik kaybındaki belirleyici rolüdür. FRP malzemesi de bu örtünün altına yerleştirilmiştir. Bu nedenle kirişin bu kısmının modellenmesi kaçınılmazdır. Ancak, kirişin yük-sehim eğrisi yaklaşık olarak tahmin edebilmek bu bölge için uygun malzeme parametrelerinin kullanılmasına bağlıdır. Kirişin bu kısmının yüklemeye beraber son derece küçük yüklerde çatlayacağı ve son derece zayıf bir malzeme olarak davranacağı açıktır. Düzgün yayılı çatlak varsayımında bu bölgenin çekme yönünde elastisite modülünün tamamen ihmal edilmesi bile söz konusu olabilmektedir. Bu çalışmada deneysel eğriler tahmin edilirken bu bölge için betonun sahip olduğu elastisite modülünden çok daha küçük değerler kullanılması gerektiği tespit edilmiştir. Benzer yaklaşım bu bölgede kullanılacak çekme dayanımı,



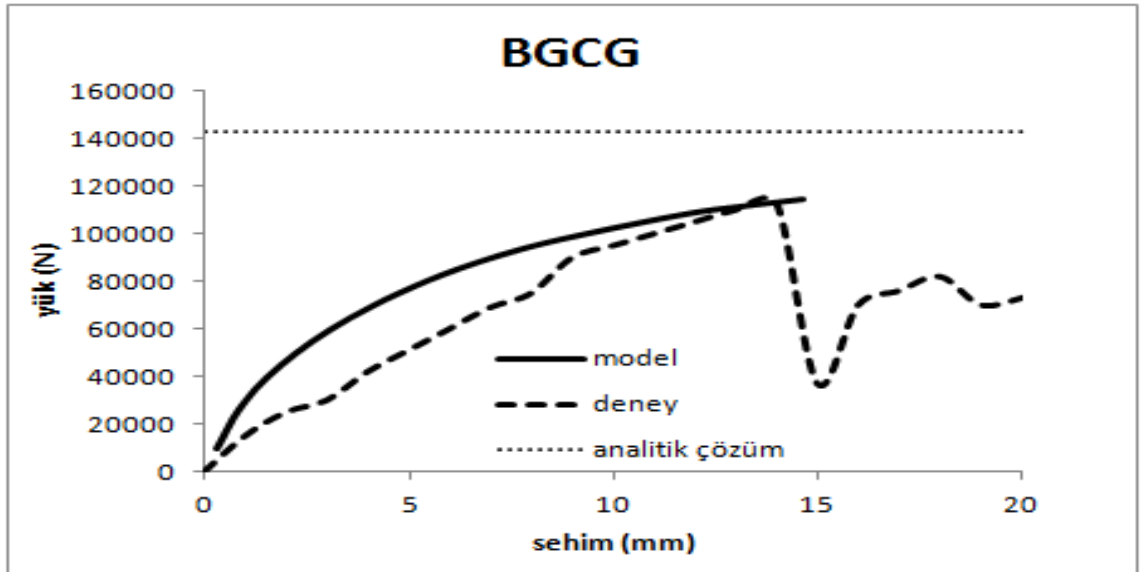
b) Tek kat CFRP kaplı betonarme kiriş



c) Tek kat GFRP katlı betonarme kiriş



d) Birer kar GFRP ile CFRP kaplı betonarme kiriş

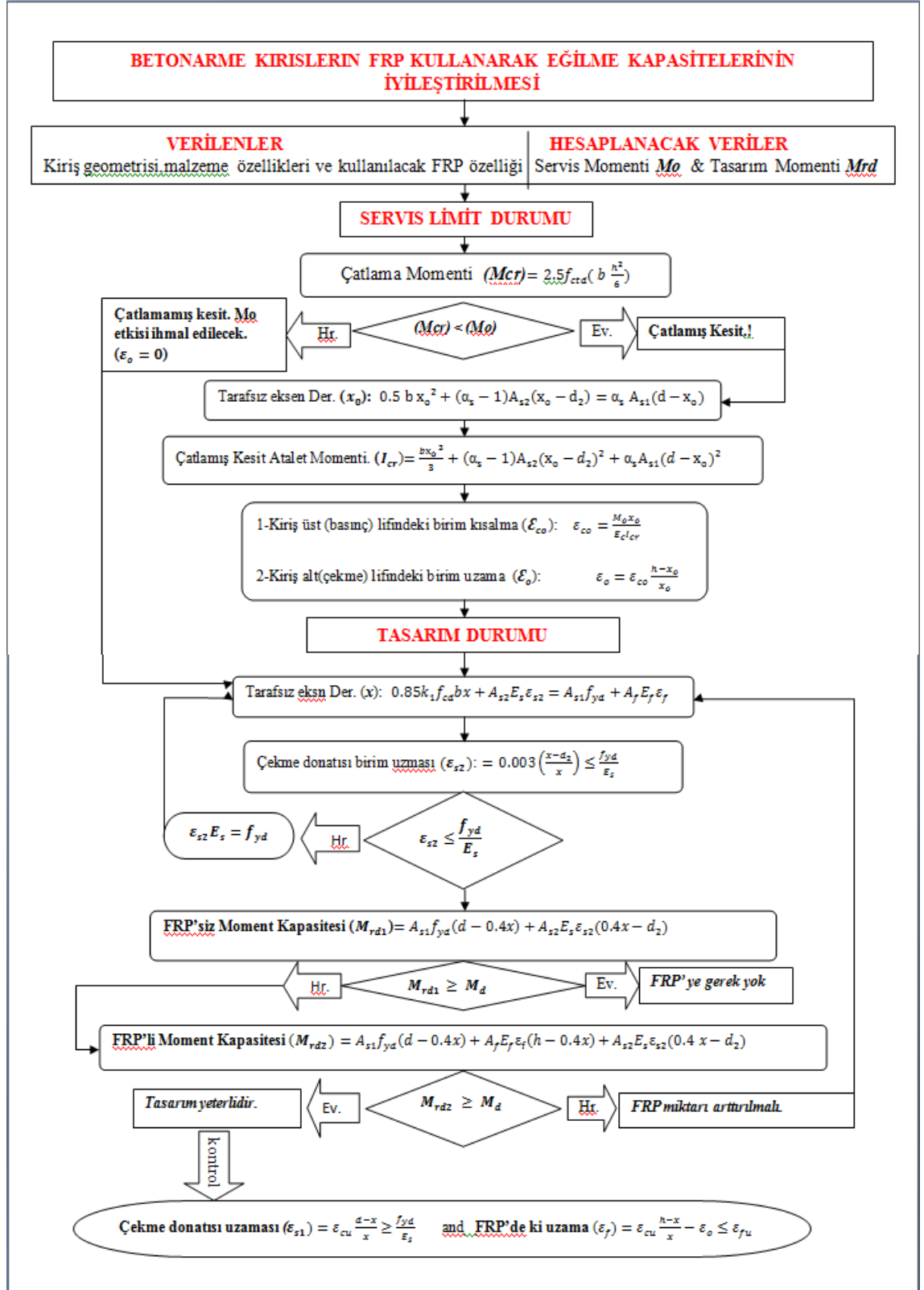


e) İki kat GFRP ile tek kat CFRP uygulanan betonarme kiriş

Şekil 5.11. Nümerik modellemeleri sonucu elde edilen yük-sehim grafikleri

5.2.Betonarme Deney Kirişi Eğilme Test Sonuçları ile Analitik Sonuçların Karşılaştırılması

Bölüm 5.1 de deneysel ve nümerik sonuçları verilen B, BC, BG, BGC ve BGCG kirişlerinin moment hesap kapasitesi hesapları bu tez çalışmasında geliştirilen analitik yöntemlerle hesaplanarak deney sonuçları birlikte değerlendirildi. Analitik hesaplamalar kullanılan adımlar Şekil 5.12.' de verilen akış diyagramına göre yapıldı.



Şekil 5.12. Betonarme kirişin Lifli Polimer kullanarak eğilme kapasitesi hesabı akış diyagramı

1) B (Mevcut Kiriş) Moment Kapasitesi Hesabı

Öncelikle mevcut (sargısız) kirişin moment ve kesme kapasitelerini denge ve uygunluk denklemleri yardımı ile aşağıdaki gibi hesaplandı. Denge denklemleri kullanılarak kesite ait tarafsız eksen derinliğinin bulunması için sırası ile aşağıdaki işlemler yapıldı.

X: tarafsız eksen derinliği olmak üzere denge denklemi çözümünden aşağıdaki eşitlik kullanılarak

$$0.85k_1x f_{cd} b + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} = A_{s1} f_{yd}$$

ve basınç bölgesindeki paspayı, $d_2=3.7$ cm ve çekme bölgesindeki paspayı, $d_1=3.8$ cm alınarak yapılan hesaplamada tarafsız eksen derinliği aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$0,85^2 * x * 50 * 125 + 157,08 * 202000 * \left(0,003 * \frac{x-37}{x}\right) - 157,08 * 540 = 0$$

Tarafsız eksen derinliği $x=26.8$ mm $< d_2$ olduğundan basınç donatısı çekme bölgesinde kalmıştır.

Basınç donatısı birim uzama kontrolünü Denk.(3.7) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$\varepsilon_{s2} = 0,003 * \frac{37-26,8}{26,8} = 0,00114 \leq \frac{540}{202000} = 0,0027$$

Kesitin mevcut donatıya göre moment kapasitesi ise Denk. (3.9) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$M_{rd1} = 157,08 * 540 * (202 - 0,4 * 26,8) + 100,5 * 202000 * 0,00114 * (37 - 0,4 * 26,8) = 17,06 \text{ kNm}$$

Hesaplanan M_{rd1} momentinden, statik denge formülleri kullanılarak kesitin aksenal yük kapasitesi yapılan hesaplarla aşağıdaki gibi bulundu.

$$\frac{2M}{0,5615} = P1 \text{ ise } P1 = \frac{2 * 17,06}{0,5615} = 60,77 \text{ kN}$$

Denk. (3.11) kullanılarak kesitin çekme bölgesi donatısının akıp akmadığı aşağıdaki gibi kontrol edildi.

$$\varepsilon_{s1} = 0,003 * \frac{202-26,8}{26,8} = 0,0196 \geq \frac{540}{202000} = 0,0027$$

Bu hesaplama sonucunda çekme donatısının aktığı görüldü.

2) BC (CFRP' li) Kesit Moment Kapasitesi Hesabı

BC kirişinde ise kiriş alt yüzeyine tek kat karbon lifli polimer yapıştırılarak kapasite hesabı yapıldı. Öncelikle tek kat karbon lifli polimer sargılı kirişin moment ve kesme kapasitelerini denge ve uygunluk denklemleri yardımı ile aşağıdaki gibi hesaplandı. Denge denklemleri kullanılarak kesite ait tarafsız eksen derinliğini bulundu.

x : tarafsız eksen derinliği olmak üzere aşağıdaki hesaplamalar yapılarak

$$0,85k_1x f_{cd} b + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} = A_s l f_{yd} + A_f E_f \varepsilon_f$$

$$\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \frac{x-d_2}{x} \leq \frac{f_{yd}}{E_s}$$

$$0,85^2 * x * 50 * 125 + 157,08 * 202000 * (0,003 * \frac{x-37}{37}) - 157,08 * 540$$

$$- 0,348 * 112,5 * 119250 * (0,003 * (\frac{240-x}{x}))$$

tarafsız eksen derinliği $x=36,43$ mm olarak bulundu. Tarafsız eksen derinliği bulunduktan sonra sırası ile basınç donatısı birim uzama kontrolünü, moment kapasitesi hesabı, birim uzama kontrolü, çekme bölgesi donatısının akıp akmadığının kontrolü ve eksenel yük kapasite hesapları yapıldı.

Basınç donatısı birim uzama kontrolünü Denk.(3.7) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$\varepsilon_{s2} = 0,003 * \frac{37-36,43}{36,43} = 0,000047 \leq \frac{540}{202000} = 0,0027$$

Kesitin tek kat karbon lifli polimer sargılı olması sonucu ulaştığı moment kapasitesi M_{rd} ise Denk. (3.10) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$M_{rd} = 157,08 * 540 * (202 - 0,4 * 36,43) + 100,5 * 202000 * 0,000047 * (37 - 0,4 * 36,43)$$

$$+0.348*112.5*119250*(0.003*(240-36.43))/36.43*(240-0.4*36.43)=33.6kNm$$

Denk. (3.11) kullanılarak kesitin çekme bölgesi donatısının akıp akmadığı aşağıdaki gibi kontrol edildi.

$$\varepsilon_{s1}=0,003*\frac{202-36,43}{36,43}=0,0136 \geq \frac{540}{202000}=0,0027$$

Çekme donatısı akmıştır.

Denk. (3.12) kullanılarak karbon esaslı lifli polimerin maksimum birim uzamayı geçip geçmediği aşağıdaki gibi kontrol edildi

$$\varepsilon_f = 0,003 * \frac{240 - 36,43}{36,43} = \%1.67 \leq \varepsilon_{f_{limit}} = \%1,7$$

CFRP' de oluşan birim uzama limit birim uzamaya yaklaşmıştır.

M_{rd} momentinden, statik denge formülleri kullanılarak kesitin CFRP sargılı olması sonucu eksenel yük kapasitesi aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$\frac{2M}{0,5615}=P2 \text{ ise } P2=\frac{2*33,6}{0,5615}=119,7kN$$

3) BG (GFRP' li) Kesit Moment Kapasitesi Hesabı

BG kirişinde ise kiriş alt yüzeyine tek kat cam lifli polimer yapıştırılarak kapasite hesabı yapıldı. Tek kat cam lifli polimer sargılı kirişin moment ve kesme kapasitelerini denge ve uygunluk denklemleri yardımı ile aşağıdaki gibi hesaplandı. Denge denklemleri kullanılarak kesite ait tarafsız eksen derinliğini bulundu.

x : tarafsız eksen derinliği olmak üzere aşağıdaki hesaplamalar yapılarak

$$0.85k_1x f_{cd} b + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} = A_s l f_{yd} + A_f E_f \varepsilon_f$$

Yukarıda verilen eşitlikte basınç donatısı uzaması ε_{s2} yerine $\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \frac{x-d2}{x} \leq \frac{f_{yd}}{E_s}$ ifadesi kullanılarak aşağıda yapılan işlemler sonucu

$$0,85^2 * x * 50 * 125 + 157,08 * 202000 * (0,003 * \frac{x-37}{37}) - 157,08 * 540$$

$$-0,352*112,5*34130*(0,003*(\frac{240-x}{x}))$$

Tek kat CFRP li kesite ait tarafsız eksen derinliği $X=29.02$ mm olarak bulundu. Tarafsız eksen derinliği bulunduktan sonra sırası ile basınç donatısı akma kontrolünü, moment kapasitesi hesabı, çekme donatısının akma kontrolü, FRP'nin birim uzama kontrolü, ve eksenel yük kapasite hesapları yapıldı.

Basınç donatısı birim uzama kontrolü Denk.(3.7) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$\varepsilon_{s2}=0,003*\frac{37-29,02}{29,02}=0,00082\leq\frac{540}{202000}=0.0027 \checkmark$$

Kesitin tek kat cam lifli polimer sargılı olması sonucu ulaştığı moment kapasitesi M_{rd} ise Denk. (3.10) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$M_{rd}=157,08*540*(202-0,4*29,02)+100,5*202000*0,00082*(37-0,4*29,02)$$

$$+0,352*112,5*34130*\frac{0,003*(240-29,02)}{29,02}*(240-0,4*29,02)=23.31 \text{ kNm}$$

Denk. (3.11) kullanılarak kesitin çekme bölgesi donatısının akıp akmadığı aşağıdaki gibi kontrol edildi.

$$\varepsilon_{s1}=0,003*\frac{202-29,02}{29,02}=0,0179\geq\frac{540}{202000}=0,0027 \checkmark$$

Çekme donatısı akmıştır.

Denk. (3.12) kullanılarak cam esaslı lifli polimerin maksimum birim uzamayı geçip geçmediği aşağıdaki gibi kontrol edildi

$$\varepsilon_f=0,003*\frac{240-29,02}{29,02}=\%2,18\leq\varepsilon_{f\text{limit}}=\%3,5$$

GFRP limit birim uzamaya ulaşmamıştır.

M_{rd} momentinden, statik denge formülleri kullanılarak kesitin GFRP sargılı olması sonucu eksenel yük kapasitesi aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$\frac{2M}{0,5615} = P \text{ ise } P = \frac{2*23,31}{0,5615} = 83,03 \text{ kN}$$

4) BGC (GFRP+CFRP' li) Kesit Moment Kapasitesi Hesabı

BGC deney kirişinde ise kiriş alt yüzeyine sırasıyla önce tek kat cam lifli polimer ve onun üstüne tek kat karbon esaslı lifli polimer yapıştırılarak kapasite hesabı yapıldı. Tek kat cam ve karbon lifli polimer sargılı kirişin moment ve kesme kapasitelerini gene denge ve uygunluk denklemleri yardımı ile aşağıdaki gibi hesaplandı. Denge denklemleri kullanılarak kesite ait tarafsız eksen derinliğini bulalım. Aşağıda yapılan karbon ve cam esaslı kompozite ait malzeme mukavemet değerleri ise deneyde verilen kompozite ait değerlerdir.

X: tarafsız eksen derinliği olmak üzere, aşağıdaki denge denkleminde hesaplandı.

$$0,85k_1x f_{cd} b + A_{s2} E_s \varepsilon_{s2} = A_s l f_{yd} + A_f E_f \varepsilon_f$$

Yukarıda verilen eşitlikte basınç donatısı uzaması ε_{s2} yerine $\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \frac{x-d_2}{x} \leq \frac{f_{yd}}{E_s}$ ifadesi kullanılarak aşağıda yapılan işlemler sonucu

$$0,85^2 * x * 50 * 125 + 157,08 * 202000 * (0,003 * \frac{x-37}{37}) - 157,08 * 540$$

$$-0,7 * 112,5 * 86300 * (0,003 * (\frac{240-x}{x}))$$

Hesaplanan tarafsız eksen derinliği $x=40,18$ mm olarak bulundu. Tarafsız eksen derinliği bulunduktan sonra sırası ile basınç donatısı akma kontrolünü, moment kapasitesi hesabı, çekme donatısının akma kontrolü, birim uzama kontrolü, ve eksenel yük kapasite hesapları yapıldı.

Denk. (3.7) kullanılarak basınç donatısında oluşan birim uzama değeri ε_{s2} aşağıdaki gibi bulundu

$$\varepsilon_{s2} = 0,003 * \frac{40,18-37}{40,18} = 0,000237 \leq \frac{540}{202000} = 0,0027 \quad \checkmark$$

Cam ve karbon elyaf birlikte kullanılarak güçlendirilen kesite ait moment kapasitesi M_{rd} aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$M_{rd}=157,08*540*(202-0,4*40,18)+100,5*202000*0,000237*(37-0,4*40,18) \\ +0,7*112,5*86300*\frac{0,003*(240-40,18)}{40,18}*(240-0,4*40,18)=38,4 \text{ kNm}$$

Sonrasında hesaplanacak çekme donatısı akma kontrolü ε_{sl} ise;

$$\varepsilon_{sl}=0,003*\frac{202-40,18}{40,18}=0,0121 \geq \frac{540}{202000}=0,0027$$

Olarak bulunduğundan çekme donatısı akmıştır.

Cam ve karbon fiber için verilen maksimum birim uzama değeri ε_f 'nin aşılmış olup aşılmadığı kontrolü;

$$\varepsilon_f=0,003*\frac{240-40,18}{40,18}=\%1,2 \leq \varepsilon_{f\text{limit}}=\%2,6$$

Olarak hesaplandığından GFRP+CFRP limit birim uzamaya ulaşmamıştır.

Yukarıda hesaplanan M_{rd} momentinden, statik denge formülleri kullanılarak kesitin GFRP+CFRP sargılı olması sonucu eksenel yük kapasitesi aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$\frac{2M}{0,5615}=P \text{ ise } P=\frac{2*38,4}{0,5615}=136,78 \text{ kN}$$

5) BGCG (GFRP+CFRP+GFRP' li) Kesit Moment Kapasitesi Hesabı

BGCG deney kirişinde ise kiriş alt yüzeyine sırasıyla önce tek kat cam lifli polimer sonra tek kat karbon lifli polimer ve onun üstüne tekrar tek kat cam esaslı lifli polimer yapıştırılarak kapasite hesabı yapıldı. Sargılı kirişin moment ve kesme kapasitelerini gene denge ve uygunluk denklemleri yardımı ile aşağıdaki gibi hesaplandı. Önce denge denklemleri kullanılarak kesite ait tarafsız eksen derinliğini bulalım. Aşağıda yapılan hesaplarda kompozite ait malzeme mukavemet değerleri ise deneyden alınmıştır.

X: tarafsız eksen derinliği olmak üzere sırası ile aşağıdaki işlemler yapıldı

$$0,85k_1x_f cd b+A_{s2}E_s\varepsilon_{s2}=A_{sl}f_{yd}+A_fE_f\varepsilon_f$$

Yukarıda verilen eşitlikte basınç donatısı uzaması ε_{s2} yerine $\varepsilon_{s2} = \varepsilon_{cu} \frac{x-d2}{x} \leq \frac{f_{yd}}{E_s}$ ifadesi kullanılarak aşağıda yapılan işlemler sonucu

$$0.85^2 * x * 50 * 125 + 157.08 * 202000 * (0.003 * \frac{x-37}{37}) - 157.08 * 540$$

$-1.052 * 112.5 * 65250 * (0.003 * (\frac{240-x}{x}))$ tarafsız eksen derinliği $x=41,68$ mm olarak bulundu. Tarafsız eksen derinliği bulunduktan sonra sırası ile basınç donatısı akma kontrolünü, moment kapasitesi hesabı, çekme donatısının akma kontrolü, birim uzama kontrolü, ve eksenel yük kapasite hesapları yapıldı.

Denk. (3.7) kullanılarak basınç donatısında oluşan birim uzama değeri ε_{s2} aşağıdaki gibi bulundu

$$\varepsilon_{s2} = 0,003 * \frac{41,68-37}{41,68} = 0,000337 \leq \frac{540}{202000} = 0,0027$$

Cam, karbon ve tekrar cam elyaf birlikte kullanılarak güçlendirilen kesite ait moment kapasitesi M_{rd} aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$M_{rd} = 157,08 * 540 * (202 - 0,4 * 41,68) + 100,5 * 202000 * 0,000337 * (37 - 0,4 * 41,68) \\ + 1,052 * 112,5 * 65250 * \frac{0,003 * (240 - 41,68)}{41,68} * (240 - 0,4 * 41,68) = 40,02 \text{ kNm}$$

Sonrasında hesaplanacak çekme donatısı akma kontrolü ε_{s1} ise;

$$\varepsilon_{s1} = 0,003 * \frac{202-41,68}{41,68} = 0,0115 \geq \frac{540}{202000} = 0,0027$$

olarak bulunduğundan çekme donatısı akmıştır.

Cam, karbon ve cam fiberin birlikte kullanılması durumu için verilen maksimum birim uzama değeri ε_f 'nin aşılp aşılmadığı kontrolü;

$$\varepsilon_f = 0,003 * \frac{240-41,68}{41,68} = \%1,4 \leq \varepsilon_{f\text{limit}} = \%2,8$$

İşlemi ile hesaplandığında GFRP+CFRP+GFRP limit birim uzamaya ulaşmadığı görülmüştür.

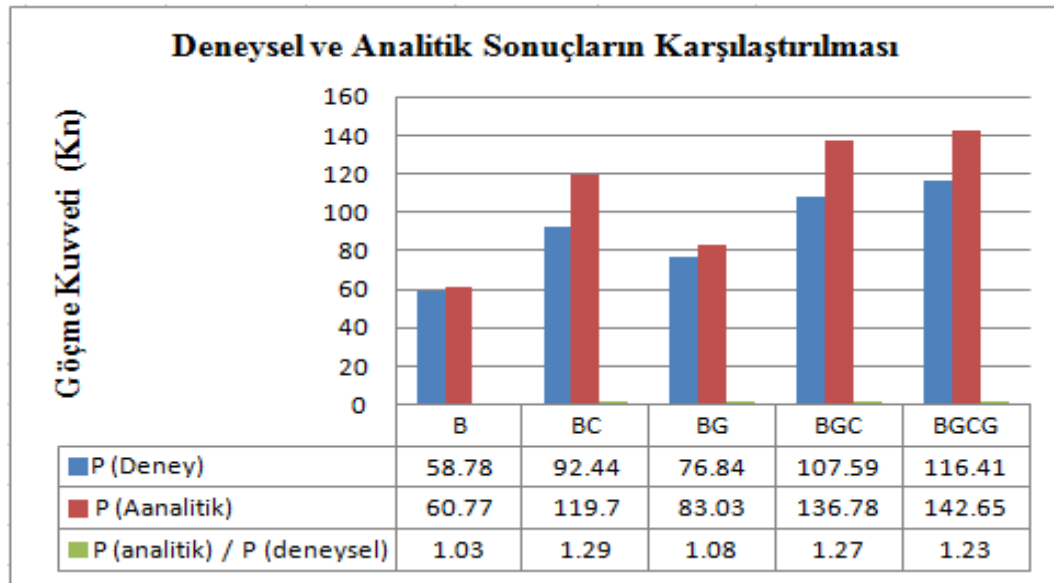
Yukarıda hesaplanan M_{rd} momentinden, statik denge formülleri kullanılarak kesitin GFRP+CFRP+GFRP sargılı olması sonucu eksenel yük kapasitesi aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$\frac{2M}{0,5615} = P \text{ ise } P = \frac{2*40,02}{0,5615} = 142.65 \text{ kN}$$

Sonuçlara ait değerler toplu olarak Tablo 5.4 ve Şekil 5.12 de verildi. **P (Analitik)** ve deneyden elde edilen değerler ise **P Deney)** başlığı altında verilmektedir.

Tablo 5.4. Deneysel ve Analitik Kuvvet Sonuçlar

Deney Kirişi	P (Deney)	P (Analitik)	P(analitik) / P(deney)
B	58.78	60.77	1.03
BC	92.44	119.7	1.29
BG	76.84	83.03	1.08
BGC	107.59	136.78	1.27
BGCG	116.41	142.65	1.23



Şekil 5.13. Deneysel ve Analitik Sonuçların Grafikselsel Karşılaştırılması

Çeşitli araştırmalar ve tasarım kodlarında sünek kırılmanın gerçekleştirilmesi için farklı güvenlik katsayıları uygulanmaktadır. Bu araştırmaların en dikkat çeken ikisi ACI ve FIB 2001 teknik araştırmalar dergisidir.

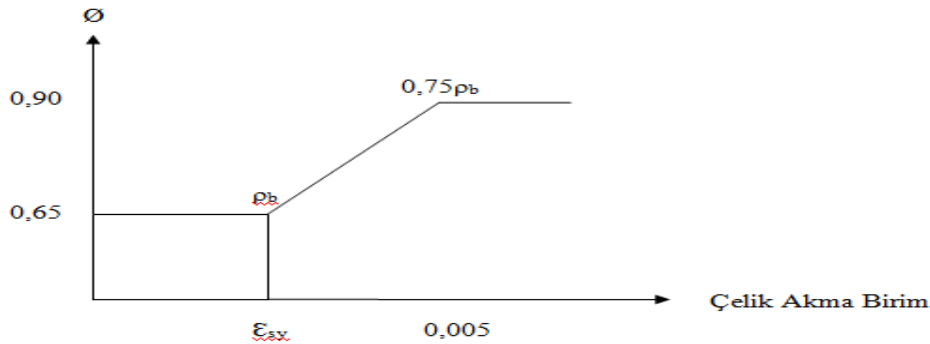
FIB2001, farklı beton sınıfları için FRP' de oluşmasına izin verilen nihai uzama (ϵ_{fu}) değerini aşağıdaki şekilde sınırlandırmıştır.

FIB2001 tarafından önerilen ϵ_{fu} değeri

$$\epsilon_{fu} \geq \begin{cases} 0,005 - \epsilon_0 & C35 \text{ ve daha küçük betonlar için} \\ 0,0075 - \epsilon_0 & C35 \text{ ten daha büyük betonlar için} \end{cases}$$

ACI 440.R2-08' de ise güçlendirilmiş kesit moment kapasitesi ve FRP için izin verilen nihai uzama değerleri için ayrı ayrı katsayılar önerilmektedir.

Moment kapasitesi için önerilen katsayı (ϕ) aşağıda da görüleceği gibi çekme donatısında bulunan birim uzama değerine bağlı olarak değişiklik gösterirken;



Şekil 5.14. Güçlendirilmiş Kiriş Eğilme Moment Kapasitesi Azaltma Katsayısı Değişimi (ACI 440.R2)

$$\phi = \begin{cases} 0,9 & \text{için} & \epsilon_f \geq 0,005 \\ 0,65 + \frac{0,25(\epsilon_t - \epsilon_{sy})}{0,005 - \epsilon_{sy}} & \text{için} & \epsilon_{sy} < \epsilon_t < 0,005 \\ 0,65 & \text{için} & \epsilon_t \leq \epsilon_{sy} \end{cases}$$

FRP' nin sağlayacağı çekme kuvvetini $\psi = 0.85$ gibi sabit bir katsayı ile sınırlandırmaktadır. Moment kapasitesinin azaltılmasındaki amaç kirişte sünek kırılmanın gerçekleştirilmesini sağlamak, FRP' den dolayı oluşan çekme kuvvetinin

azaltılmasında ise amaç istatistiksel olarak FRP çekme kuvvetinin çekme donatısı kadar kesin ve güvenilir sonuçlar oluşturmadığı kanaatidir.

Burada;

\emptyset : Güçlendirilmiş kesit moment kapasitesi azaltma katsayısı

ϵ_{sy} : Donatı çeliği akma gerilmesi

ϵ_t : Çekme donatısında oluşan birim uzama değeri

Yukarıda beş adet farklı deney kirişi (B,BC,BG,BGC,BGCG) için yapılan analitik hesapta bulunan güçlendirme moment kapasitesi ve FRP' de oluşan çekme kuvvetleri ACI 440.R2-08' de verilen katsayılar kullanılarak kiriş yük kapasiteleri yeniden hesaplanarak aşağıdaki değerler ve grafik elde edildi

$\emptyset M=0.9M_{rd}$ ve FRP' de oluşan kuvvet azaltma katsayısı $\psi= 0.85$ alınarak yeniden kapasiteler hesaplanırsa;

1-) B (Mevcut Kiriş) Moment Kapasitesi Hesabı

Mevcut kesit için herhangi bir moment kapasitesi azaltması yapılmayarak olduğu gibi aşağıda bM_{rd1} olarak hesaplandı.

$$M_{rd1} = A_{s1}f_{yd}(d-0,4x) + A_{s2}E_s\epsilon_{s2}(d-0,4x)$$

$$M_{rd1} = 157,08*540*(202-0,4*26,8) + 100,5*202000*0,00114*(37-0,4*26,8) = 17.06 \text{ kNm}$$

Hesaplanan momentin tekil yüke dönüştürülmesi ise aşağıdaki şekilde hesaplandı.

$$\frac{2M}{0,5615} = Pb \text{ ise } Pb = \frac{2*17,06}{0,5615} = 60,77 \text{ kN}$$

2-) BC Azaltılmış Moment Kapasitesi Hesabı

Bu deney kirişine ait moment kapasite hesabında ise karbon lifli polimerde oluşan iç kuvvet 0.85 katsayısı ile çarpıldı, oluşan moment kapasitesi ise çekme donatısı aktığı için 0.9 katsayısı ile azaltılarak aşağıda $\emptyset M_{rd}$ olarak hesaplandı.

$$0,9M_{rd} = \emptyset(A_{s1}f_{yd}(d - 0,4x) + A_{s2}E_s\epsilon_{s2}(d_2 - 0,4x) + \psi A_f E_f \epsilon_f * (h - 0,4x))$$

$$\emptyset M_{rd}=0,9*\left(157,08*540*(202-0,4*36,43)+100,5*202000*0,000047*(37-0,4*36,43)+0,85*0,348*112,5*119250*\frac{0,003*(240-36,43)}{36,43}*(240-0,4*36,43)\right)$$

$$\emptyset M_{rd}=27,83 \text{ kNm}$$

Azaltılmış moment değeri olan $\emptyset M_{rd}$ ' ye karşılık gelen eksenel yük kapasitesi ise aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$\frac{2M}{0,5615}=P_c \text{ ise } P_c=\frac{2*27,83}{0,5615}=99,13 \text{ kN}$$

3) BG (GFRP' li) Kesit Azaltılmış Moment Kapasitesi Hesabı

Bu deney kirişine ait moment kapasite hesabında da cam lifli polimerde oluşan iç kuvvet 0.85 katsayısı ile çarpıldı, oluşan moment kapasitesi ise çekme donatısı aktığı için 0.9 katsayısı ile azaltılarak aşağıda $\emptyset M_{rd}$ olarak hesaplandı.

$$\emptyset M_{rd}=\emptyset(A_{s1}f_{yd}(d-0,4x)+A_{s2}E_sE_{s2}(d2-0,4x)+\psi A_fE_fE_f(h-0,4x))$$

$$\emptyset M_{rd}=0,9*(157,08*540*(202-0,4*29,02)+100,5*202000*0,00082*(37-0,4*29,02)+0,85*0,352*112,5*34130*\frac{0,003*(240-29,02)}{29,02}*(240-0,4*29,02))=20,1 \text{ kNm}$$

Azaltılmış moment değeri olan $\emptyset M_{rd}$ ' ye karşılık gelen eksenel yük kapasitesi ise aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$\frac{2M}{0,5615}=P_g \text{ ise } P_g=\frac{2*20,1}{0,5615}=71,6 \text{ kN}$$

4) BGC (GFRP+CFRP' li) Kesit Azaltılmış Moment Kapasitesi Hesabı

Bu deney kirişine ait moment kapasite hesabında da cam ve karbon lifli polimer tek bir kompozit malzeme olarak ele alındı ve bu kompozitte oluşan iç kuvvet 0.85 katsayısı ile çarpıldı, oluşan moment kapasitesi ise çekme donatısı aktığı için 0.9 katsayısı ile azaltılarak aşağıda $\emptyset M_{rd}$ olarak hesaplandı.

$$\emptyset M_{rd}=\emptyset(A_{s1}f_{yd}(d-0,4x)+A_{s2}E_sE_{s2}(d2-0,4x)+\psi A_fE_fE_f(h-0,4x))$$

$$\begin{aligned} \emptyset M_{rd} &= 0,9 * \left(157,08 * 540 * (202 - 0,4 * 40,18) + 100,5 * 202000 * 0,000237 * (37 - 0,4 * 40,18) \right) \\ &\quad + 0,85 * 0,7 * 112,5 * 86300 * \frac{0,003 * (240 - 40,18)}{40,18} * (240 - 0,4 * 40,18) \\ &= 31,65 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Azaltılmış moment değeri olan $\emptyset M_{rd}$ ' ye karşılık gelen eksenel yük kapasitesi ise aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$\frac{2M}{0,5615} = P_{gc} \text{ ise } P_{gc} = \frac{2 * 31,65}{0,5615} = 112,73 \text{ kN}$$

5) BGCG (GFRP+CFRP+GFRP' li) Kesit Azaltılmış Moment Kapasitesi Hesabı

Bu deney kirişine ait moment kapasite hesabında da cam, karbon ve cam lifli polimer tek bir kompozit malzeme olarak ele alındı ve bu kompozitte oluşan iç kuvvet 0.85 katsayısı ile çarpıldı, oluşan moment kapasitesi ise çekme donatsı aktığı için 0.9 katsayısı ile azaltılarak aşağıda $\emptyset M_{rd}$ olarak hesaplandı.

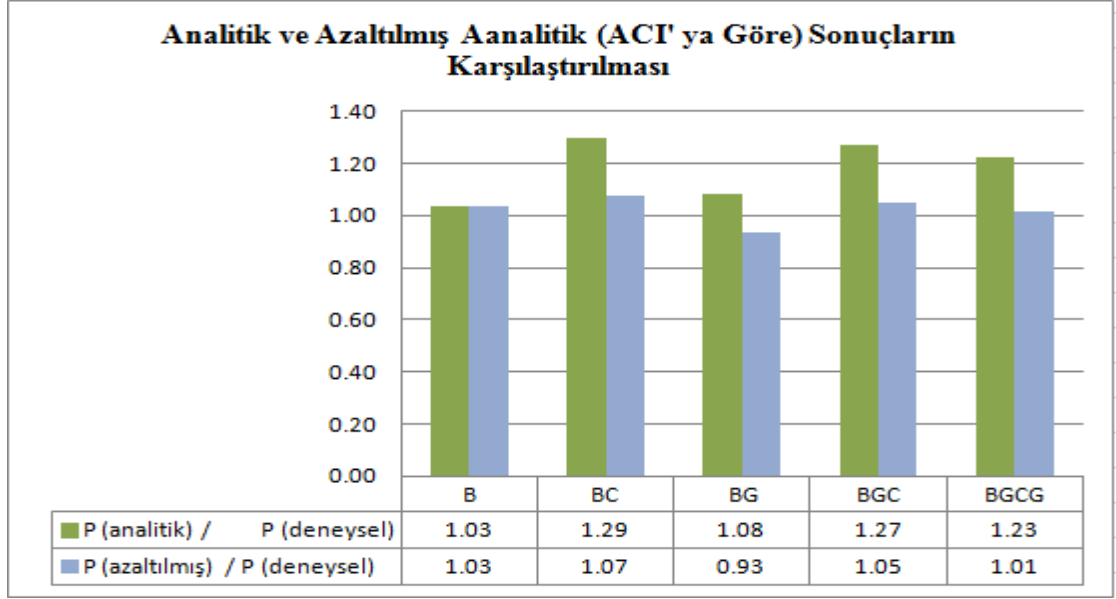
$$\emptyset M_{rd} = \emptyset (A_{s1} f_{yd} (d - 0,4x) + A_{s2} E_s \epsilon_{s2} (d - 0,4x) + \psi A_f E_f \epsilon_f (h - 0,4x))$$

$$\begin{aligned} \emptyset M_{rd} &= 0,9 * \left(157,08 * 540 * (202 - 0,4 * 41,68) + 100,5 * 202000 * 0,000337 * (37 - 0,4 * 41,68) \right) \\ &\quad + 0,85 * 1,052 * 112,5 * 65250 * \frac{0,003 * (240 - 41,68)}{41,68} * (240 - 0,4 * 41,68) \\ &= 33,1 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Azaltılmış moment değeri olan $\emptyset M_{rd}$ ' ye karşılık gelen eksenel yük kapasitesi ise aşağıdaki gibi hesaplandı.

$$\frac{2M}{0,5615} = P_{gc} \text{ ise } P_{gc} = \frac{2 * 33,1}{0,5615} = 117,9 \text{ kN}$$

Sonuçlara ait değerler toplu olarak Şekil 5.14 de verildi.



Şekil 5.15. Deneysel Ve Analitik Sonuçların Grafikselsel Karşılaştırılması

5.3.Betonarme Deney Kolonu Basınç Test Sonuçlarının Analitik Sonuçlar İle Karşılaştırılması

Deneysel çalışma olarak ise, kolonlar için yapılan çalışmalarda basınç ve kesme durumu için lifli polimerdeki maksimum birim şekil değıştirme 0.004 olarak alınmaktadır (Mander ark., 1998). Kolonların sadece eksenel yük altındaki davranışlarını inceleyen bir diğersel çalışmada ise ACI 2002 ile benzer bir şekilde 0.008 değeri önerilmiştir (Köksal ve Doran 2011). Kirişlerdeki kesmeli eğilme düşünöldüğünde bu değersel arasında kalan 0.006 değersel kabul edilebilir bir varsayım olduğusel düşünölebilir.

Deneysel çalışma için kullanılan betonarme kolonun geometrik özellikleri Tablo 5.5 verildi.

Tablo 5.5. 'te Lam ve Tang (2003), Haraji ve ark.(2006) ve Turgay (2006) tarafından yapılan deney numunelerine ait geometrik ve malzeme özellikleri bulunmaktadır. Deneylerde kullanılan her bir numuneye ait değersel analitik hesaplarda dikkate alınarak aşğıdaki hesap adımları izlendi. Bu hesaplar için ayrıca bir Excel tablosu oluşturuldu, bu tabloda, yapılan deneylerde bulunan sonuçlar ve analitik hesap sonuçları her bir deney için ayrı ayrı olarak aşğıda şekiller üzerinde gösterildi. (Şekil.5.16, Şekil.5.17, Şekil.5.18, Şekil.5.19, Şekil.5.20, Şekil.5.21, Şekil.5.20). Örnek olması açısından

analitik hesap, Lam ve Teng (2003) tarafından yapılan S1R15 deney kolonu için yapıldı. Bu hesaplamalarda sırası ile şekil etkinlik katsayısı K_a , ve FRP' nin sağladığı yanal basınç dayanımı hesapları aşağıdaki işlemler yapılarak bulundu.

Şekil etkinlik katsayısı (K_a) hesabı:

$$K_a = 1 - \frac{(15-2*1,5)^2 + (15-2*1,5)^2}{3*15*15} = 0,57$$

ve CFRP' nin sağladığı yanal basınç dayanımı f_l ;

$$f_l = \frac{1}{2} * 0,57 * 0,004 * 0,004 * 257000 = 1,17 \text{ MPa}$$

FRP sargılı betonun ulaştığı basınç dayanımı f_{cc} ise,

$$f_{cc} = 33,7 * \left(1 + 2,4 * \left(\frac{1,17}{33,7} \right) \right) = 36,5 \text{ MPa}$$

Diğer deney numuneleri için hesaplanan basınç dayanımları aynı yöntemi izlendi ve sonuçlar aşağıdaki şekillerde (Şekil.5.16, Şekil.5.17, Şekil.5.18, Şekil.5.19, Şekil.5.20, Şekil.5.21, Şekil.5.20) TDY 2007 başlığı altında verildi. Verilen şekillerde σ' , FRP ile güçlendirilmiş deney numunelerinin basınç dayanımını, f'_{c0} ise deney numunelerine ait mevcut basınç dayanımlarını göstermektedir. Böylece analitik yöntem kullanılarak hesaplanan FRP ile güçlendirilmiş basınç dayanımları mevcut basınç dayanımları ve güçlendirilmiş numune basınç dayanımları ile karşılaştırılarak yaklaşıklıkları oransal olarak gösterildi.

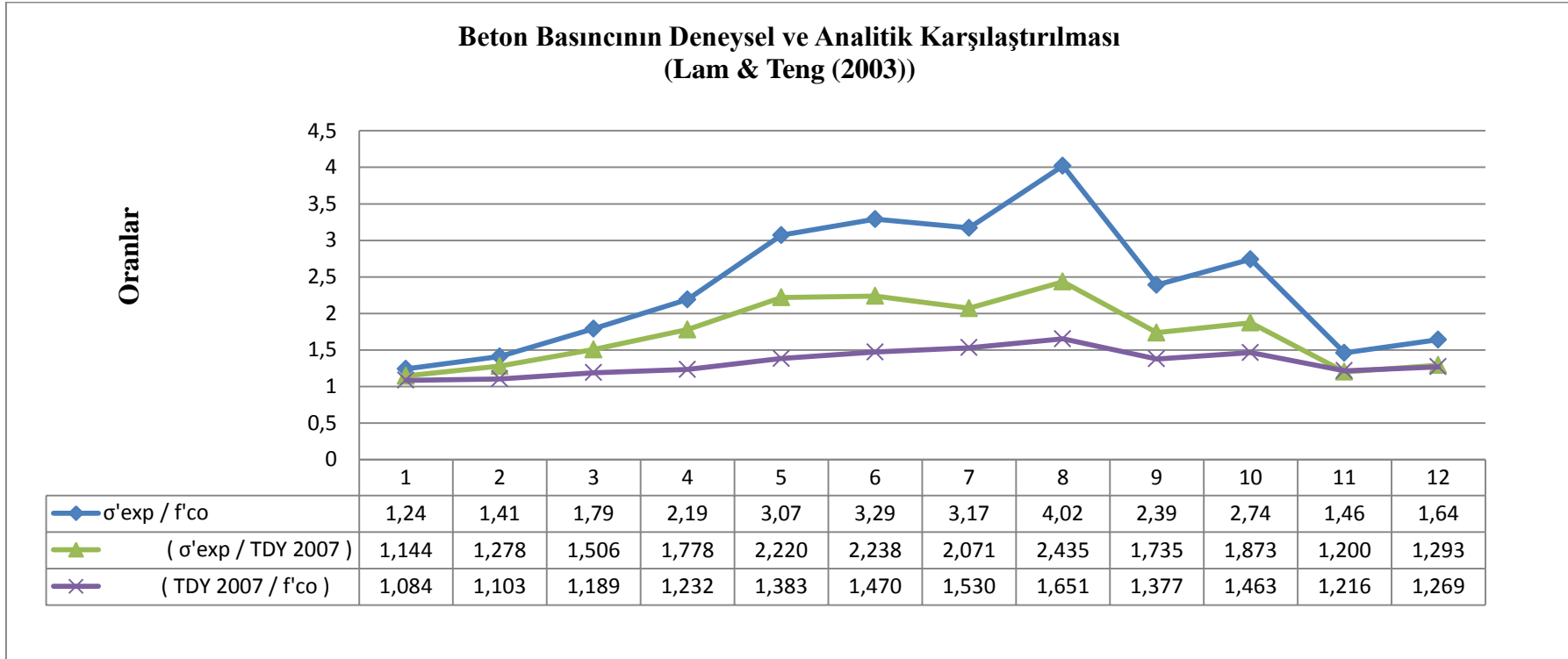
Tablo 5.5. Deney kolon numunelerine ait özellikler ve basınç dayanımları

Numune Adı	Ölçüleri		r_c	t_f	E_f	f_{co}	pf	σ	$\sigma_{Deneysel} / f_{co}$
	(mm)								
	b	h							
Lam and Teng (2003)-Deney Numuneleri									
S1R15	150	150	15	0.165	257000	33.7	0.004	41.79	1.24
S1R25	150	150	25	0.165	257000	33.7	0.004	47.52	1.41
S2R15	150	150	15	0.33	257000	33.7	0.009	60.32	1.79
S2R25	150	150	25	0.33	257000	33.7	0.009	73.8	2.19
S3R15	150	150	15	0.495	257000	24	0.013	73.68	3.07
S3R25	150	150	25	0.495	257000	24	0.0013	78.96	3.29
S4R15	150	150	15	0.66	257000	24	0.018	76.08	3.17
S4R25	150	150	25	0.66	257000	24	0.018	96.48	4.02
S5R15	150	150	15	0.825	257000	41.5	0.022	99.2	2.39
S5R25	150	150	25	0.825	257000	41.5	0.022	113.7	2.74
R4R15	150	225	15	0.66	257000	41.5	0.015	60.6	1.46
R4R25	150	225	25	0.66	257000	41.5	0.015	68.06	1.64
Numune Adı	Ölçüleri		r_c	t_f	E_f	f_{co}	pf	σ	$\sigma_{Deneysel} / f_{co}$
	(mm)								
	b	h							
Harajili et al.(2006) -Deney Numuneleri									
C1FP1	132	132	15	0.13	230000	18.3	0.004	28.18	1.54
C1FP2	132	132	15	0.26	230000	18.3	0.008	38.98	2.13
C1FP3	132	132	15	0.39	230000	18.3	0.012	42.09	2.3
C2FP1	102	176	15	0.13	230000	18.3	0.004	22.51	1.23
C2FP2	102	176	15	0.26	230000	18.3	0.008	29.65	1.62
C3FP3	102	176	15	0.39	230000	18.3	0.012	34.95	1.91
C3FP1	79	214	15	0.13	230000	18.3	0.005	24.34	1.33
C3FP2	79	214	15	0.26	230000	18.3	0.009	24.34	1.33
C3FP3	79	214	15	0.39	230000	18.3	0.014	26.17	1.43
C1SFP1	132	132	15	0.13	230000	15.2	0.004	28.58	1.88
C1SFP2	132	132	15	0.26	230000	15.2	0.008	38.61	2.54
C1SFP3	132	132	15	0.39	230000	15.2	0.012	47.73	3.14
C2SFP1	102	176	15	0.13	230000	15.2	0.004	25.08	1.65
C2SFP2	102	176	15	0.26	230000	15.2	0.008	30.7	2.02
C2SFP3	102	176	15	0.39	230000	15.2	0.012	38.3	2.52
C3SFP1	79	214	15	0.13	230000	15.2	0.005	20.67	1.36
C3SFP2	79	214	15	0.26	230000	15.2	0.009	23.56	1.55
C3SFP3	79	214	15	0.39	230000	15.2	0.014	29.03	1.91
Numune Adı	Ölçüleri		r_c	t_f	E_f	f_{co}	pf	σ	$\sigma_{Deneysel} / f_{co}$
	(mm)								
	b	h							
Turgay (2007) -Deney Numuneleri									
C3L4S8	200	200	20	0.165	230000	19.36	0.003	28.65	1.48
C3L4S12	200	200	20	0.165	230000	19.36	0.003	29.23	1.51
C3L8S8	200	200	20	0.165	230000	19.36	0.003	31.75	1.64
C3L8S12	200	200	20	0.165	230000	19.36	0.003	33.88	1.7
C5L4S8	200	200	20	0.33	230000	19.36	0.007	29.23	1.51
C5L4S12	200	200	20	0.33	230000	19.36	0.007	30.2	1.56
C5L8S8	200	200	20	0.33	230000	19.36	0.007	32.33	1.67
C5L8S12	200	200	20	0.33	230000	19.36	0.007	35.43	1.83

Ef : (CFRP İçin Limit Uzama) TDY 2007 DE DENK.7E.3 İÇİN 0.004 ALINMIŞTIR.

Referans Örnek Adı	Deney Ölçüleri		Re(mm) (Köşe Yarıçapı)	FRP Kalınlığı (mm) (tf)	Efrp (Mpa)	FRP Hac.Oran (ρf)	Material fco (Mpa)	σ^{exp} / f'_{co}	σ^{exp} (MPa)	$(\sigma^{exp} / TDY 2007)$	$(TDY 2007 / f'_{co})$	(TDY 2007) f _{cc} =f _{cm} *(1+2.4*(f _l /f _{cm}))	Ka= 1-((b-2*Rc) ² +(h-2*Rc) ²)/3*b*h	f _l = 0.5*Ka*ρ ² *E*E _f	
	b (mm)	h (mm)													
Lam & Teng (2003)															
S1R15	150	150	15	0.165	3E+05	0.004	33.7	1.24	41.79	1.14	1.08	36.5	0.57	1.18	
S1R25	150	150	25	0.165	3E+05	0.004	33.7	1.41	47.52	1.28	1.10	37.2	0.70	1.45	
S2R15	150	150	15	0.33	3E+05	0.009	33.7	1.79	60.32	1.51	1.19	40.1	0.57	2.65	
S2R25	150	150	25	0.33	3E+05	0.009	33.7	2.19	73.8	1.78	1.23	41.5	0.70	3.26	
S3R15	150	150	15	0.495	3E+05	0.013	24	3.07	73.68	2.22	1.38	33.2	0.57	3.83	
S3R25	150	150	25	0.495	3E+05	0.013	24	3.29	78.96	2.24	1.47	35.3	0.70	4.70	
S4R15	150	150	15	0.66	3E+05	0.018	24	3.17	76.08	2.07	1.53	36.7	0.57	5.30	
S4R25	150	150	25	0.66	3E+05	0.018	24	4.02	96.48	2.43	1.65	39.6	0.70	6.51	
S5R15	150	150	15	0.825	3E+05	0.022	41.25	2.39	98.59	1.74	1.38	56.8	0.57	6.48	
S5R25	150	150	25	0.825	3E+05	0.022	41.25	2.74	113	1.87	1.46	60.3	0.70	7.96	
R4R15	150	225	15	0.66	3E+05	0.015	41.25	1.46	60.23	1.20	1.22	50.2	0.48	3.72	
R4R25	150	225	25	0.66	3E+05	0.015	41.25	1.64	67.65	1.29	1.27	52.3	0.60	4.62	

Şekil 5.16. Deneyi Basınç Sonuçları İle Analitik Hesap Sonuçları (Lam ve Teng (2003))



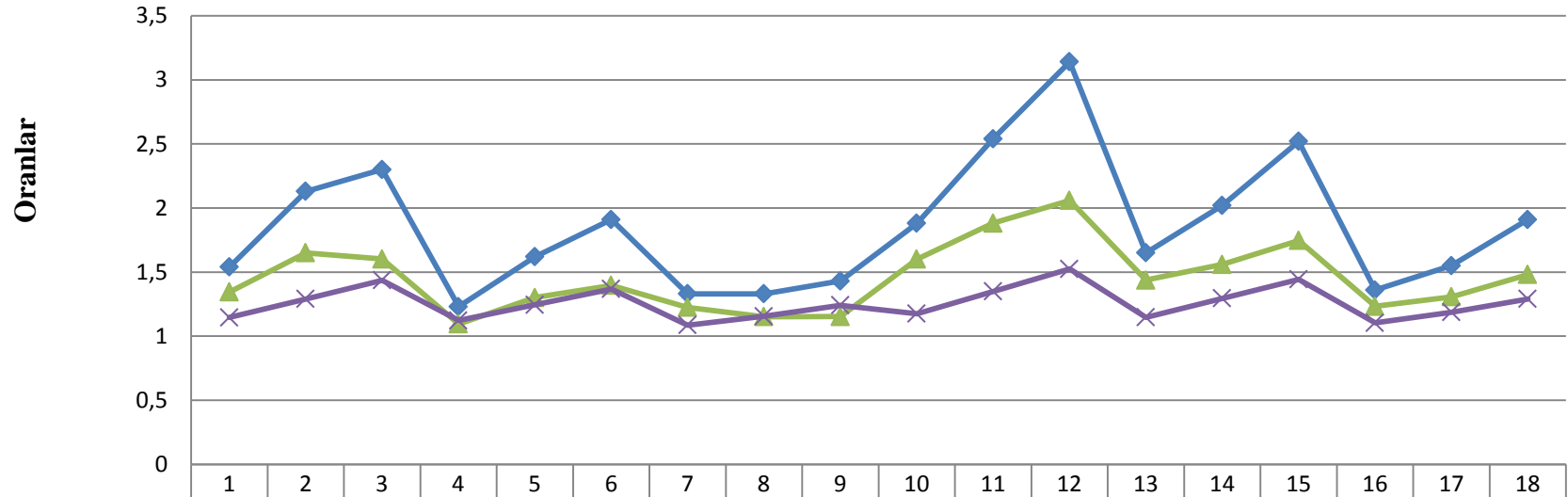
Şekil 5.17. Lam & Teng (2003) Deneyi Basınç Sonuçları İle Analitik Hesap Basınç Değerlerinin Grafikselsel Karşılaştırılması

Şif : (CFRP İçin Limit Uzama) TDY 2007 DE DENK.7E.3 İÇİN 0.004 ALINMIŞTIR.

Referans Örnek Adı	Deney Ölçüleri		Re(mm) (Köşe Yarı.Yarıçapı)	FRP Kalınlığı (mm) (t)	Efrp (Mpa)	FRP Hac.Oran (ρf)	Material fco (Mpa)	σ^{exp}/f_{co}	σ^{exp} (MPa)	$(\sigma^{exp}/TDY 2007)$	$(TDY 2007/f_{co})$	frc=fc _m *(1+2.4*(t/fc _m)) (TDY 2007)	Ka= 1-((b-2 ⁴ *Re) ² +(h-2 ⁴ *Rc) ²)/3 ⁴ *b ⁴ *h	ff= 0.5 ⁴ *Ka ⁴ *ρf ⁴ *E ⁴ *E ⁴	
	b (mm)	h (mm)													
Haraji et al.(2006)															
C1FP1	132	132	15	0.13	2E+05	0.004	18.3	1.54	28.18	1.34	1.15	21.0	0.60	1.11	
C1FP2	132	132	15	0.26	2E+05	0.008	18.3	2.13	38.98	1.65	1.29	23.6	0.60	2.22	
C1FP3	132	132	15	0.39	2E+05	0.012	18.3	2.3	42.09	1.60	1.44	26.3	0.60	3.32	
C2FP1	102	176	15	0.13	2E+05	0.004	18.3	1.23	22.51	1.10	1.12	20.5	0.51	0.93	
C2FP2	102	176	15	0.26	2E+05	0.008	18.3	1.62	29.65	1.30	1.25	22.8	0.51	1.87	
C2FP3	102	176	15	0.39	2E+05	0.012	18.3	1.91	34.95	1.40	1.37	25.0	0.51	2.80	
C3FP1	79	214	15	0.13	2E+05	0.005	18.3	1.33	24.34	1.22	1.09	19.9	0.29	0.66	
C3FP2	79	214	15	0.26	2E+05	0.009	18.3	1.33	24.34	1.15	1.15	21.1	0.29	1.18	
C3FP3	79	214	15	0.39	2E+05	0.014	18.3	1.43	26.17	1.15	1.24	22.7	0.29	1.84	
C1SFP1	132	132	15	0.13	2E+05	0.004	15.2	1.88	28.58	1.60	1.17	17.9	0.60	1.11	
C1SFP2	132	132	15	0.26	2E+05	0.008	15.2	2.54	38.61	1.88	1.35	20.5	0.60	2.22	
C1SFP3	132	132	15	0.39	2E+05	0.012	15.2	3.14	47.73	2.06	1.52	23.2	0.60	3.32	
C2SFP1	102	176	15	0.13	2E+05	0.004	15.2	1.65	25.08	1.44	1.15	17.4	0.51	0.93	
C2SFP2	102	176	15	0.26	2E+05	0.008	15.2	2.02	30.7	1.56	1.30	19.7	0.51	1.87	
C2SFP3	102	176	15	0.39	2E+05	0.012	15.2	2.52	38.3	1.75	1.44	21.9	0.51	2.80	
C3SFP1	79	214	15	0.13	2E+05	0.005	15.2	1.36	20.67	1.23	1.10	16.8	0.29	0.66	
C3SFP2	79	214	15	0.26	2E+05	0.009	15.2	1.55	23.56	1.31	1.19	18.0	0.29	1.18	
C3SFP3	79	214	15	0.39	2E+05	0.014	15.2	1.91	29.03	1.48	1.29	19.6	0.29	1.84	

Şekil 5.18. Haraji at al. (2006) Deneyi Basınç Sonuçları İle Analitik Hesap Sonuçları

**Beton Basıncının Deneysel ve Analitik Karşılaştırılması
(Haraji at al.(2006))**



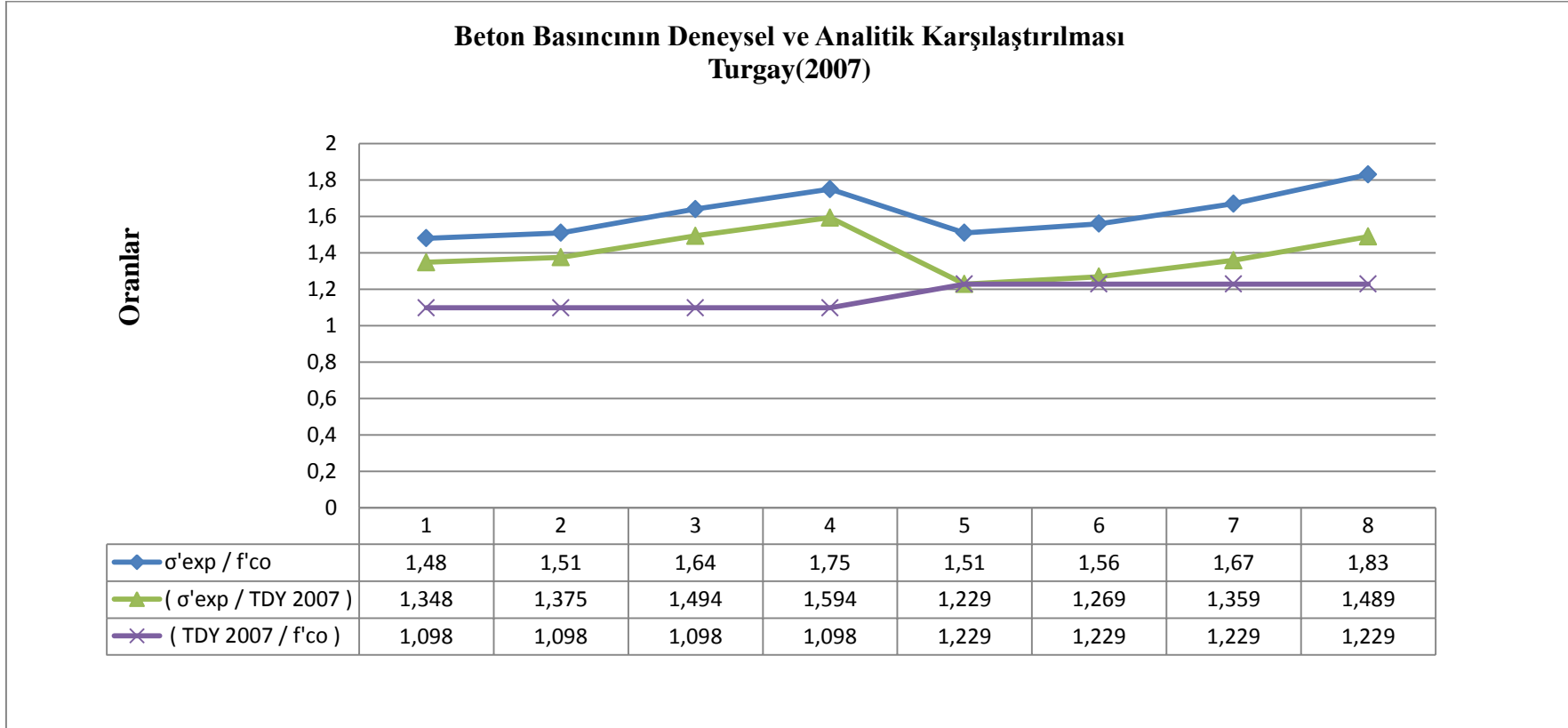
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
◆ σ'_{exp} / f'_{co}	1,54	2,13	2,3	1,23	1,62	1,91	1,33	1,33	1,43	1,88	2,54	3,14	1,65	2,02	2,52	1,36	1,55	1,91
▲ ($\sigma'_{exp} / TDY\ 2007$)	1,345	1,651	1,602	1,096	1,301	1,396	1,225	1,152	1,152	1,600	1,882	2,060	1,438	1,560	1,747	1,232	1,306	1,481
× (TDY 2007 / f'_{co})	1,145	1,291	1,436	1,123	1,245	1,368	1,086	1,155	1,241	1,175	1,350	1,525	1,148	1,295	1,443	1,104	1,186	1,290

Şekil 5.19. Haraji at al.(2006) Deneyi Basıncı Sonuçları İle Analitik Hesap Basıncı Değerlerinin Grafikselleştirilmesi

Ef : (CFRP İçin Limit Uzama) TDY 2007 DE DENK.7E.3 İÇİN 0.004 ALINMIŞTIR

Referans Ornek Adı	Deney Ölçüleri		Re(mm) (Köşe Yuv. Yarçapı)	FRP Kalınlığı (mm) (tf)	Efrp (Mpa)	ρf (FRP Hac. Oran)	Material fco (Mpa)	σ^{exp} / f_{co}		σ^{exp} (MPa)		$(\sigma^{exp} / TDY 2007)$	$(TDY 2007 / f_{co})$	(TDY 2007) f _{cc} =f _{cm} *(1+2.4*(ρf/f _{cm}))	Ka= 1-((b-2*Re) ² +(h-2*Re) ²)/3*b*h	fl= 0.5*Ka*ρf*Ef*Ef
	b (mm)	h (mm)						σ^{exp} / f_{co}	σ^{exp} (MPa)							
Turgay (2007)																
C3L4S8	200	200	20	0.165	2E+05	0.003	19.36	1.48	28.65	1.35	1.10	21.2589	0.57	0.79		
C3L4S12	200	200	20	0.165	2E+05	0.003	19.36	1.51	29.23	1.38	1.10	21.2589	0.57	0.79		
C3L8S8	200	200	20	0.165	2E+05	0.003	19.36	1.64	31.75	1.49	1.10	21.2589	0.57	0.79		
C3L8S12	200	200	20	0.165	2E+05	0.003	19.36	1.75	33.88	1.59	1.10	21.2589	0.57	0.79		
C5L4S8	200	200	20	0.33	2E+05	0.007	19.36	1.51	29.23	1.23	1.23	23.7907	0.57	1.85		
C5L4S12	200	200	20	0.33	2E+05	0.007	19.36	1.56	30.2	1.27	1.23	23.7907	0.57	1.85		
C5L8S8	200	200	20	0.33	2E+05	0.007	19.36	1.67	32.33	1.36	1.23	23.7907	0.57	1.85		
C5L8S12	200	200	20	0.33	2E+05	0.007	19.36	1.83	35.43	1.49	1.23	23.7907	0.57	1.85		

Şekil 5.20. Turgay (2007) Deneyi Basınç Sonuçları İle Analitik Hesap Sonuçları



Şekil 5.21. Turgay (2007) Deneyi Basınç Sonuçları İle Analitik Hesap Basınç Değerlerinin Grafıksel Karşılaştırılması

6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE ÖNERİLER

6.1 Betonarme Kiriş Eğilme Moment Kapasitesi İçin Sonuçların Değerlendirilmesi

B, BC, BG, BGC, BGCG kirişleri için analitik yöntem ile yapılmış olan eğilme moment kapasiteleri, deneysel çalışmada bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca hesaplanan bu eğilme momentleri, eksenel tekil yüke dönüştürülmüş ve sonlu eleman yöntemi kullanılarak yük-deplasman sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır.

Yaptığımız analitik hesaplara göre, B kirişi yük kapasitesi 60.77 kN iken,(BC) tek kat karbon fiber sargılaması durumun da yük kapasitesi 119,7 kN' a, (BG) sadece cam fiber sargılaması durumunda yük kapasitesi 83.03 kN'a, (BGC) tek kat cam ve tek kat karbon fiber birlikte sargılı iken yük kapasitesi 136.78 kN'a ve (BGCG) sırasıyla tek kat cam, karbon, cam birlikte sargılı iken yük kapasitesi 142.65 kN' çıkmıştır.

ACI 440.R2-08' e göre yapılan analitik hesaplar için ise; B kirişi yük kapasitesi 60.77 KN iken,(BC) tek kat karbon fiber sargılanması durumun da yük kapasitesi 99.13 kN'a, (BG) sadece cam fiber sargılaması durumunda yük kapasitesi 71.6 kN'a, (BGC) tek kat cam ve tek kat karbon fiber birlikte sargılı iken yük kapasitesi 112.93 kN'a ve (BGCG) sırasıyla tek kat cam, karbon, cam birlikte sargılı iken yük kapasitesi 117.9 kN' a çıkmıştır.

Deneysel veri sonuçları esas alınarak, her iki yöntemde bulunan yük kapasitelerinin deneysel verilere yaklaşıklığı incelendiğinde ACI 440.R2-08' e göre yapılan analitik hesaplar daha yakın değerler verdiği görülmektedir. Bu değerler sırası ile BC kirişi için 1.07 , BG kirişi için 0.93 , BGC kirişi için 1.05 ve BGCG kirişi için 1.01 olarak bulundu.

Ayrıca nümerik modelleme ile yapılan hesaplarda Şekil 5.11.' deki yük-sehim grafikleri elde edilmiştir. Verilen grafikler incelendiğinde verilerin birbirlerine yakınlıkları incelendiğinde tüm deney kirişlerinde yük-sehim grafikleri belirli bir noktaya kadar lineer davranış göstermekte daha sonra parabolik bir şekil oluşmaktadır. Tüm kirişlerin 10 mm'lik deplasman sınırına kadar olan davranışları lineer kabul edilerek taşıdıkları yük değerleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. Tablo 6.1 de görüldüğü gibi

güçlendirilen kirişin fiber oranı arttıkça eşit sehim için daha fazla yük taşıdığı gözlenmiştir. Ayrıca karbon fiber ile güçlendirilen kirişin taşıma kapasitesi cam fiber ile güçlendirilen kirişin taşıma kapasitesinden daha fazla olduğu görülmektedir.

Tablo 6.1. Eşit Deplasman İçin Kirişlerin Yük Taşıma Kapasiteleri

Deney Kirişi Adı	Deplasman Miktarı (mm)	Taşıdığı Kuvvet (kN)
B	10	52
BC	10	78
BG	10	68
BGC	10	90
BGCG	10	100

6.2 Betonarme Kolon Basınç Dayanım Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Analitik yöntem ile yapılmış olan aksenal basınç dayanımlarının iyileştirilmesi, üç farklı deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Baz alınan deney sonuçları ile hesaplanan FRP li kolonların basınç dayanım sonuçları ve aradaki fark miktarı karşılaştırmalı olarak aşağıdadır.

Tablo 6.2. Deney Sonuçları İle Analitik Sonuçların Mevcut Basınç Dayanıma Oranı Ve Artış Miktarı

		Haraji et al.(2006)																	
σ'_{exp} / f_{co}		1.54	2.13	2.3	1.23	1.62	1.91	1.33	1.33	1.43	1.88	2.54	3.14	1.65	2.02	2.52	1.36	1.55	1.91
(TDY 2007 / f_{co})		1.15	1.29	1.44	1.12	1.25	1.37	1.09	1.15	1.24	1.17	1.35	1.52	1.15	1.3	1.44	1.1	1.19	1.29
Fark (%)		25%	39%	37%	9%	23%	28%	18%	14%	13%	38%	47%	52%	30%	36%	43%	19%	23%	32%
Ortalama		29.3%																	
		Lam & Teng (2003)																	
σ'_{exp} / f_{co}		1.24	1.41	1.79	2.19	3.07	3.29	3.17	4.02	2.39	2.74	1.46	1.64						
(TDY 2007 / f_{co})		1.08	1.1	1.19	1.23	1.38	1.47	1.53	1.65	1.38	1.46	1.22	1.27						
Fark (%)		12.9%	22.0%	33.5%	43.8%	55.0%	55.3%	51.7%	59.0%	42.3%	46.7%	16.4%	22.6%						
Ortalama		38.4%																	
		Turgay (2007)																	
σ'_{exp} / f_{co}		1.48	1.51	1.64	1.75	1.51	1.56	1.67	1.83										
(TDY 2007 / f_{co})		1.1	1.1	1.1	1.1	1.23	1.23	1.23	1.23										
Fark (%)		26%	27%	33%	37%	19%	21%	26%	33%										
Ortalama		27.7%																	

Sonuç olarak; deney sonuçları ve analitik hesaplar bir bütün olarak incelendiğinde, lifli polimerler kullanılarak yapılacak iyileştirmeler ACI -440 R2 ve FIB tarafından önerilen azaltma katsayılarından birini kullanılarak daha güvenli tarafta kalınacağı ve arzu edilen güvenli güçlendirme kapasitelerine çok rahat ulaşılacağını göstermektedir. Kolonlar için de yapılacak FRP li güçlendirmelerde deneysel sonuçlara göre daha konservatif sonuçların elde edildiği dolayısıyla yönetmelik formüllerinin hiçbir azaltma katsayısı kullanılmadan kullanılabileceği görülmektedir. Betonarme kiriş eğilme moment kapasitesi hesabında bu katsayıların kullanılması muhtemel uygulama ve malzeme üretim hatalarından doğabilecek kusurlar ile proje safhasında öngörülemeyen hesap hatalarının asgariye indirilmesi açısından da önemli olduğu, bu şekilde yapılacak güçlendirmelerde lifli polimerlerin yapı elemanlarının güçlendirilmesinde rahatça kullanılabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Aktan, S., Polat, K., Köksal, H.O., Deliktaş, B. ve Doran, B. (2014). Numerical Modeling for the Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Sheets. ACE2014.

Ashtiani, M.S., Scott, A.N. ve Dhakal, R.P. (2013). Mechanical and fresh properties of high-strength self-compacting concrete containing class C fly ash. *Construction and Building Materials*, 47, 1217–1224.

Arın, A.,(2006). Fiber İle Güçlendirilmiş Betonarme Kiriş Ve Plakların Rijitlik Ve Kesme Tepkilerinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi , Ondokuz Mayıs Üniversitesi.

Almusallam, T.H., Al-Salloum, Y.A. Use Of Glass Frp Sheets As External Flexure Reinforcement In Rc Beams. *DERGİ ADI*.

Anıl, Ö., Altın, S. Kara, M.E. Koprıman, Y. Mertoğlu, Ç.,(2011). Kesmede Yetersiz Betonarme Kirişlerin CFRP İle Dayanım Ve Sünekliğinin Artırılması, 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-14 Ekim 2011, ODTÜ, Ankara.

Al-Saidy, A.H., Klaiber, F.W., and Wipf, T.J., (2007). Strengthening of Steel–Concrete Composite Girders Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Plates. Elsevier, *Construction and Building Materials*, 21, pp:295–302.

Akgüzel, U.,(2003). “Seismic Retrofit of Brick Infilled RC Frames with Lap Splice Problem In Columns”, M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, Bogazici University.

Anıl, Ö., Altın, S., Kara, M.E., Koprıman, Y., Mertoğlu, Ç., (2011). Kesmede Yetersiz Betonarme Kirişlerin CFRP ile Dayanım Ve Sünekliğinin Artırılması *1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 11-14 Ekim , ANKARA*

Bazant, Z.P. ve Oh, B.H. (1983). Crack band theory lor tracture of concrete, *MatStruct.* 16, 155-177.

Berkıay, İ, (1995). Betonarme I, Taşıma Gücü ve Kesit Hesapları, TMMOB İMO İstanbul.

Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, (2007). Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. Ankara.

Czaderski, C. (2012). Flexural strengthening of reinforced concrete.Fibre Composite Materials in Structural Engineering.

Coza, H.(2009). Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçevelerin Karbon Lifli Kompozitlerle Güçlendirilmesi, ÜNİVERSİTE ADI, Doktora Tezi.

Carolin A., Taljsten B., (2003). Carbon Fiber Reinforced Polymers For Strengthening Of Structural Elements, üniversite adı, Doctoral Thesis

Çetinkaya,N., Kaplan, H., Şenel, M. (2003). “**Betonarme Kirişlerin Lifli Polimer Malzemeler Kullanılarak Onarım Ve Güçlendirilmesi**”, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli.

Doran, B. (2009).“A Magnified Beam Algorithm to Determine the Coupling Ratios of R/C Coupled Shear Wall”Struct. Design Tall Spec. Build. 18 (8), 921-929.

Design of Externally Bonded FRP Systems For Strengthening Concrete Structures, ACI Document 440.2R-08

Doğangün A. (2002).Betonarme yapıların Hesap ve Tasarımı, Birsen Yayınevi.

Externally bonded FRP Reinforcement for RC Structures, CEB-FIP.

Endeshaw, M.A., ElGawady, M., Ronald L. Sack and David I. McLean, (2008), Retrofit Of Rectangular Bridge Columns Using CFRP Wrapping

Ersoy, U and S. Uzsoy,(1971). The Behavior and Strength of Infilled Frames, Report No. MAG 205 **Tubitak**, Ankara, Turkey.

Gambarova, P.G. ve Karakoç, C. (1983). A new approach to the analysis of the confinement role in regularly cracked concrete elements. Trans. 7th SMİRT Conf. II Paper H5/7, Chicago, 251-261.

Guan, G.X., Burgoyne, C.J., Unified Design Method for Flexure and Debonding in RC Beam Retrofitting, University of Cambridge,UK., dergi adı

Hawileh, R.A., Rasheed, H.A., Abdalla, J.A. ve Al-Tamimi, A.K. (2014). Behavior of reinforced concrete beams strengthened with externally bonded hybrid fiber reinforced polymer systems. *Materials and Design*, 53, 972–982.

Haroun, M.A., Mosallam, A.S., Feng, M.Q. and Elsanadedy, H.M.,(2001). Experimental Investigation of Seismic Repair and Retrofit of Bridge Columns by Composites Jackets. **FRP Composites in Civil Engineering**, 1, 838-857.

İlki, A., and Kumbasar, N.,(2003). Compressive Behaviour of Carbon Fibre Composite Jacketed Concrete with Circular and Non-circular Cross Sections. **Journal of Earthquake Engineering**, 7, No:3, 381-406.

Jayanath, B.C.R.,Lewangamage, C. S., Jayasinghe, M. T. R., Prakash, N., (2013). Ultimate Capacity Prediction Of Carbon Fiber Reinforced Polymers (Cfrp) Strengthened Reinforced Concrete Flexural Elements Based On Debonding Failure.

Köksal, H.O. ve Karakoç, C. (1999). An isotropic damage model for concrete. *Materials and Structures*. 32(222), 611-617.

Köksal, H.O., Doran, B., Ozsoy, A.E. ve Alacalı, S.N. (2004a), Nonlinear Modeling of Concentrically Loaded Reinforced Blockwork Masonry Columns, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(6), 1012-1023.

Köksal, H.O., Karakoç, C. ve Tokuç, M.O. (2004b). Damage Analyses of RC Members, ACE 2004, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.

Köksal, H.O, Doran, B. ve Turgay, T. (2009). A practical approach for modelling FRP wrapped concrete columns.*Construction and Building Materials* 23(3), 1429–1437.

Köksal, H.O., Aktan, S. ve Kuruşçu, A.O. (2012). “Elasto-Plastic Finite Element Analysis of FRP-Confined Masonry Columns”, *Journal of Composites for Construction*, 16(4), 407–417.

Kasimzade, A. A. , Tuhta, S. (2011). Analytical, Numerical And Experimental Examination Of Reinforced Composites Beams Covered With Carbon Fiber Reinforced Plastic, DERGİ ADI

Köksal, H.O., Jafarov, O., Doran, B, Aktan, S. ve Karakoç, C. (2013). "Computational material modeling of masonry walls strengthened with fiber reinforced polymers" *Structural Engineering and Mechanics*, 48(5), 737-755.

Lewangamage, C. S., Jayasinghe, M. T. R., Prakash, N. ,Ultimate Capacity Prediction Of Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) Strengthened Reinforced Concrete Flexural Elements Based On Debonding Failure , B.C.R Jayanath, University Of Moratuwa Sri Lanka.

Lee, H., Kage, T., Noguchi, T. and Tomosawa, F., (2003). An experimantel study on the Retrofing effects of Reinforced Concrete Columns Damaged by Rebar Corrosion Strengthened with CFRP sheets. *Cement and Concrete Research* 33, 563-570.

Mirmiran, A. and Shahawy, M., (1997). Behaviour of Concrete Columns Confined by Fiber Composites, **ASCE Journal of Structural Engineering**, 123, No:5, 583-590.

Maruyama, K., Jsce Recommendation For Application of Frp Laminates and Related Works in Other Codes Provisions, Nagaoka University Of Technology, Nagaoka, Japan.

Mesay A. Endeshaw, Mohamed ElGawady, Ronald L. Sack and David I. McLean, (2012). Retrofit Of Rectangular Bridge Columns Using Cfrp Wrapping. **Journal of Theoretical and Applied Mechanics**. Sofia, 2012, vol. 42, No. 1, pp. 55–70

Mert N., Elmas M ., (2007). Fiber Takviyeli Polimerle Güçlendirilen Betonarme, Kirişlerin Doğrusal Olmayan Analizi, *İnternational Earthquake Symposium*, Kocaeli

Norris,T., Saadatmanesh, H., Ehsani, M.R., (1997). Shear and flexurer strengthening of rc beams with carbon fiber sheets, *Journal of Structural Engineering*, July 1997, 911.

National Research Council, Advisory Committee on Technical Recomendations for Construction Guide For Design And Constrcution of Externally Bonded Frp Systems

for Strengthening Existing Structures Cnr Advisory Committee On Techninal
Recomendations For Constructions.

NISTIR 6288 (1998), NIST workshop on standart on standart development fort he use
of fiber reinforced polymers fort he rehabilitation of concrete and masonry structure
structures,Tuscon Arizona Proceedings

Oliver, J., Cervera, M., Oller, S. ve Lubliner, J. (1990). Isotropic damage models and
smeared crack analysis of concrete. *Proc. 2nd ICCAADCS (2)*, 945-958.

Özcan, Z., (2005). Betonarme Kirişlerin Kompozit Malzemeler ile
Güçlendirilmesi.Deprem Sempozyumu, Kocaeli.

Öncü, M.E., Karasın, A. , Yılmaz,S.,CFRP İle Güçlendirilmiş Kesitlerin Eksenel Yük
Altındaki Davranışı, DERGİ ADI

Peker, Ö., (2005). “Düşük Dayanımlı Betonarme Elemanların CFRP ile
Güçlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

**Papakonstantinou, C.G., Perumalsamy N. Balaguru and Michael F.
Petrou,**Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Composites
Subjected to Fatigue Loading, dergi adı

Structural Retrofitting of Concrete Beams Using Frp- Debonding Issues,*Doctoral
Thesis,Yasmeen Taleb Obaidat*

Sobuz, R. Ahmed, E., Hasan, S., Uddin, A., (2011).Use of carbon fiber laminates
for strengthening reinforced concrete beams in bending Habibur, **International
Journal Of Civil And Structural Engineering**, Volume 2, No 1

Souza, R.A., Ferrari, V.J., (2012). Automatic design of the flexural strengthening of
reinforcedconcrete beams using fiber reinforced polymers (FRP). *Acta Scientiarum.
Technology Maringá.v. 34, n. 2, p. 157-165, Apr.-June, 2012*

Sheikh, S.A. and Yau, G., (2002). Seismic Behaviour of Concrete Columns Confined
with Fiber-Retrofit Polimers. *ACI Structural Journal*. 99, 72-80.

Sobuz, H.R., Ahmed,E., Hasan, S., Uddin, A., (2011).Use of carbon fiber laminates for strengthening reinforced concrete beams in bending,*International Journal Of Civil And Structural Engineering*, Volume 2, No 1

Sim J., Kim G., Park C., Ju M., Shear Strengthening Effects with Varying Types of FRP Materials and Strengthening Methods

Saadatmanesh, B., Malek A.M., Desing Guidelines for Fleural Strengthening of RC Beams With FRP Plates

Turgay, T., Köksal, H.O., Polat, Z. ve Karakoç, C. (2007). Stress-strain Chracteristics of RC Columns Externally Confined with CFRP Jackets, International Association of Fracture Mechanics for Concrete and Concrete Structures, FraMCoS-6, 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, Catania, Italy, June 17-22 2007.

Teng, J.G., Behavior, Design And Monitoring Of Concrete Structures Strengthened With Fibre-Reinforced Polymer (Frp) Composites

Tan, K.H., (2002). Strength Enhancement of Rectangular Reinforced Concrete Columns using Fiber-Reinforced Polymer, ASCE Journal of Composites for Construction, 6, No:3, 175-183.

Tanarslan, H.M. Ertutar, Y., Altin, S. (2008). MAKALE ADIJournal of Reinforced Plastics and Composites, 2008 27: 1287

Yetgin, Ş. ve Çavdar, A., (2005). Polimer Lif Yastığı Yardımıyla Beton Kirişlerde Çekme Dayanımının Yükseltilmesine Yönelik Deneyler.Deprem Sempozyumu, Kocaeli.

Xiao, Y. and Wu, H., (2000). Compressive Behaviour of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets, Journal of Materials in Civil Engineering 12.No:2, 139-146.

Wang, Y.C. and Restrepo, J.,(2001). Investigation of Concentrically Loaded Reinforced Concrete Columns Confined wih Glass Fiber-Reinforced Polymer Jackets, ACI Structural Journal, 98 No:3, 337-385.

Wiley,J. Composites for Construction: Structural design with Frp materials, Lawrence C. Bank

Prof.Ph.D. Masoud Motavalli. ISIS EC Module 4 (2004). Externally Bonded FRP: Flexural Fibre Composites,

İNTERNET KAYNAKLARI

Rami A. Hawileh, Hayder A. Rasheed, Jamal A. Abdalla, Adil K. Al-Tamimi, (yıl), Behavior of reinforced concrete beams strengthened with externallybonded hybrid fiber reinforced polymer systems, Materials and Design Journal Homepage: www.elsevier.com/locate/matdes

Seismic Upgrade of Reinforced Concrete Columns With Frp Giorgio Monti Università La Sapienza Di Roma, Italy , *seismic upgrade of reinforced concrete columns with frp – giorgio monti - teheran, 22 july 2003*

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : KASIM POLAT
Doğum Yeri ve Tarihi : ERZURUM,1973
Yabancı Dili : İNGİLİZCE

Eğitim Durumu:

Lise : ERZURUM FEN LİSESİ,1993
Lisans : YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ, 1999

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Hazel Mühendislik Müşavirlik Proje

İletişim (e-posta) : polatkasim@yahoo.com.tr