

T.C  
NIĞDE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

FRP DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN  
EĞİLME VE KESME ETKİSİ ALTINDAKİ ANALİZİ

FATİH CULLAZOĞLU

Eylül 2014



**T.C**  
**NİĞDE ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**FRP DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN**  
**EĞİLME VE KESME ETKİSİ ALTINDAKİ ANALİZİ**

**FATİH CULLAZOĞLU**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Danışman**

**Doç. Dr. İlker Fatih KARA**

**Eylül 2014**

Fatih CULLAZOĞLU tarafından Doç. Dr. İlker Fatih KARA danışmanlığında hazırlanan “FRP Donatılı Betonarme Kirişlerin Eğilme ve Kesme Etkisi Altındaki Analizi” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. İlker Fatih KARA, Niğde Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Metin Hakan SEVERCAN, Niğde Üniversitesi

Üye : Doç. Dr. Cahit BİLİM, Mersin Üniversitesi

**ONAY:**

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından .../.../20... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun .../.../20... tarih ve ..... sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

**Doç. Dr. Murat BARUT**

**MÜDÜR**

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Fatih CULLAZOĞLU

## ÖZET

### FRP DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME VE KESME ETKİSİ ALTINDAKİ ANALİZİ

CULLAZOĞLU, Fatih

Niğde Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. İlker Fatih KARA

Eylül 2014, 84 sayfa

Bu çalışmada, ilk etapta FRP donatılı betonarme kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışı ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir. Bu amaçla deneysel çalışmaları daha önceden yapılmış FRP donatılı betonarme kiriş örnekleri daha önceden geliştirilen bir bilgisayar programı aracılığı ile analiz edilmiş ve FRP donatısının kirişlerde oluşan deplasmanlar ve taşıma gücü momentleri üzerine olan etkisi ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. FRP donatısı tipi ve miktarının deplasmanlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Çalışmada ayrıca, hibrit FRP-Çelik donatılı kirişlerin eğilme etkisi altındaki analizi irdelenmiş ve çelik ve FRP donatısı oranı ve FRP donatısı tipi gibi farklı değişkenlerin hibrit betonarme kirişlerin davranışları üzerine olan etkisi araştırılmıştır. FRP donatılı kiriş içerisine çelik donatı eklenmesiyle hem kirişlerin sünekliliğinin hem de rijitliğinin arttığı sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmada en son olarak FRP donatısı içeren betonarme kirişlerin kesme dayanımları farklı ülke yönetmelikleri tarafından önerilen modeller aracılığı ile elde edilerek bu modellerin karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca, FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı için denklem önerilmiş ve bu denklem aracılığı ile elde edilen sonuçların diğer yönetmelikler tarafından önerilen modellerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması yapılmıştır.

*Anahtar Sözcükler:* Lifli polimer donatı, beton, çelik, deplasman, moment kapasitesi, kesme dayanımı

## SUMMARY

### ANALYSIS OF FLEXURAL AND SHEAR BEHAVIOUR OF FRP-REINFORCED CONCRETE BEAMS

CULLAZOĞLU, Fatih

Niğde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. İlker Fatih KARA

September 2014, 84 pages

In the present study, firstly the behavior of FRP reinforced concrete beams has been investigated in detail. Experimental FRP concrete beam examples available in the literature have been analyzed using the computer program developed previously and the effect of FRP bars on the deflection and moment capacity of reinforced concrete beams have been examined. The effect of type and amount of FRP bars on the displacement of FRP concrete beams have been found to be significant. A parametric study has been carried out to consider different parameters on the behavior of FRP reinforced concrete beams. In this work, the behavior of hybrid FRP/steel reinforced concrete beams has also been analyzed, and the effect of the reinforcement ratio for FRP and steel bars on the behavior of hybrid concrete beams has been investigated. The results indicated that the beam ductility and stiffness are improved when steel reinforcement is added to FRP reinforced concrete beams. Finally, the equations of existing design standards for shear capacity of FRP reinforced concrete beams have been evaluated using the large database collected. A shear equation has also been proposed for the shear strength of FRP reinforced concrete beams.

*Keywords:* Fiber reinforced polymer bar, concrete, steel, deflection, moment capacity, shear strength

## ÖN SÖZ

Bu günlere gelmemde sınırsız emeği olan ve hiçbir zaman haklarını ödeyemeyeceğim saygıdeğer anneme ve babama, mesleğimi daha çok sevmeme vesile olan, bana açtıkları ufuk ve verdikleri kıymetli bilgiler ışığında çalışmalarım süresince benden desteğini hiç esirgemeyen muhterem hocalarıma, özellikle Sayın Doç. Dr. İlker Fatih KARA'ya ve emeği geçen tüm hocalarıma en içten duygularıyla teşekkür eder, kendilerinin sağlıklı, huzurlu, mutlu ve başarılı bir ömür geçirmelerini temenni ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
SUMMARY .....	v
ÖN SÖZ .....	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xi
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiii
BÖLÜM I GİRİŞ .....	1
BÖLÜM II ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR .....	4
BÖLÜM III FRP MALZEMESİ VE DONATISININ ÖZELLİKLERİ .....	9
3.1 FRP'nin İç Yapısı .....	9
3.1.1 Cam lifler .....	10
3.1.2 Karbon lifler .....	10
3.1.3 Polimer lifler .....	10
3.1.4 Matris .....	11
3.2 FRP Donatısının Özellikleri .....	11
BÖLÜM IV FRP DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME ETKİSİ ALTINDAKİ ANALİZİ .....	16
4.1 FRP Donatılı Betonarme Kirişlerin Analizi için Kullanılan Yöntemler .....	17
4.1.1 FRP donatılı betonarme kirişlerin moment-eğrilik ilişkisi ve taşıma gücü momentinin elde edilebilmesi için kullanılan yöntem .....	17
4.1.1.1 Beton ve FRP malzemesi için gerilme şekil değiştirme ilişkisi .....	17
4.1.1.2 FRP donatılı betonarme kesit için moment eğrilik ilişkisi ve taşıma gücü momenti .....	19
4.1.1.3 FRP donatılı kirişte oluşan deplasmanlar .....	22
4.1.2 ACI Yöntemi .....	23
4.1.2.1 Taşıma gücü momenti .....	23
4.1.2.2 Etkili atalet momenti .....	24
4.1.3 Etkili atalet momenti için diğer modeller .....	24
4.2 Hibrit FRP-Çelik Donatılı Betonarme Kirişler .....	25

4.2.1 Analizde kullanılan yöntem.....	26
4.3 Hibrit Betonarme Kesit İçin Moment Eğrilik İlişkisi ve Taşıma Gücü Momenti.....	26
<b>BÖLÜM V FRP DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN KESME ETKİSİ</b>	
<b>ALTINDAKİ DAYANIMI VE ANALİZİ .....</b>	<b>30</b>
5.1 Çelik Donatılı Betonarme Kirişlerin Kesme Davranışı.....	30
5.1.1 Kesme donatısı bulunmayan elemanların davranışı .....	32
5.1.2 Kesme donatılı kirişlerin davranışı .....	34
5.2 FRP Donatılı Betonarme Kirişlerin Kesme Dayanımı .....	36
5.2.1 FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı için farklı yönetmelikler tarafından önerilen denklemler.....	38
5.2.1.1 ACI 440.1R-06 Yönetmeliği.....	38
5.2.1.2 CAN/CSA S806-02 Yönetmeliği.....	39
5.2.1.3 ISIS-M03-07 Yönetmeliği .....	40
5.2.1.4 BISE-99 Yönetmeliği .....	41
5.2.1.5 JSCE-97 Yönetmeliği.....	42
<b>BÖLÜM VI ARAŞTIRMA BULGULARI .....</b>	<b>44</b>
6.1 FRP Donatılı Betonarme Kirişlerin Eğilme Etkisi Altındaki Analizi .....	44
6.1.1 Eğilme momenti kapasitesi .....	44
6.1.1.1 FRP donatısı oranının kirişin eğilme kapasitesi üzerine olan etkisi ....	49
6.1.2 Yük/moment-deplasman ilişkisi .....	51
6.1.2.1 Teorik sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.....	51
6.1.2.2 FRP donatısı oranının deplasmanlar üzerine olan etkisi .....	54
6.1.2.3 FRP donatısı tipinin deplasmanlar üzerine olan etkisi .....	55
6.2 FRP-Çelik Donatı İçeren Hibrit Betonarme Kirişlerin Eğilme Etkisi Altındaki Analizi .....	55
6.2.1 Moment-eğrilik ilişkisi.....	56
6.2.2 FRP ve çelik donatı oranlarının moment-eğrilik ilişkisi üzerine olan etkisi....	57
6.2.3 FRP donatısı tipinin moment-eğrilik ilişkisi üzerine olan etkisi .....	60
6.3 FRP Donatılı Betonarme Kirişlerin Kesme Dayanımı .....	61
6.3.1 Deneysel veriler .....	61
6.3.2 Çalışma kapsamında önerilen denklem.....	63
6.3.3 Teorik modellerin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması.....	64
6.3.3.1 Kayma donatısız kirişler .....	64
6.3.3.2 Kayma donatılı betonarme kirişler .....	70

BÖLÜM VII SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	74
KAYNAKLAR .....	77
ÖZ GEÇMİŞ .....	84

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. FRP donatılarının avantaj ve dezavantajları (ACI 440.1R-06-Yavuz 2011) .....	13
Çizelge 3.2. FRP donatı çubuklarının tipik çekme özellikleri (ACI 440.1R-06, 2006-Fico 2006).....	14
Çizelge 3.3. FRP donatı çubuklarının ısı genleşme katsayıları (Fico 2006) .....	15
Çizelge 6.1. Deneysel ve teorik moment taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması.....	46
Çizelge 6.2. Deneysel olarak yüklemeye tabi tutulmuş kirişlere ait malzeme ve kesit özellikleri.....	51
Çizelge 6.3. Deneysel olarak yüklemeye tabi tutulan hibrit çelik/betonarme kirişler.....	56
Çizelge 6.4. Kayma donatısız betonarme elemanlara ait kesme ile ilgili parametrelerin dağılımı .....	62
Çizelge 6.5. Kayma donatılı betonarme elemanlara ait kesme ile ilgili parametrelerin dağılımı .....	63
Çizelge 6.6. Kayma donatısız betonarme elemanlar için model ve önerilen denklemlere ait istatistiksel değerler.....	67
Çizelge 6.7. Kayma donatılı elemanlar için model ve önerilen denklemlere ait istatistiksel değerler.....	71

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. FRP donatısına ait örnekler (Fico 2006; Yavuz 2011).....	12
Şekil 3.2. FRP ve çelik donatıların gerilme şekil değiştirme ilişkisi (Abdalla 2002).....	14
Şekil 4.1. FRP donatısı ve beton için gerilme şekil değiştirme eğrisi.....	18
Şekil 4.2. FRP donatılı betonarme bir kesitte oluşan gerilme, şekil değiştirme ve iç kuvvetler .....	19
Şekil 4.3. Çelik için analizde kullanılan gerilme şekil değiştirme ilişkisi.....	26
Şekil 4.4. Hibrit betonarme bir kesitte oluşan gerilme, şekil değiştirme ve iç kuvvetler .....	27
Şekil 5.1. Basit kesme etkisi altında oluşan asal gerilmeler .....	30
Şekil 5.2. Ortasından tekil yüklü basit mesnetli kirişte oluşan asal gerilmelerin yönü...31	
Şekil 5.3. Betonarme kirişte eğik çatlakların oluşumu.....	33
Şekil 5.4. Kesme donatısız bir kirişte kesme etkisinin karşılanması .....	34
Şekil 5.5. Kesme donatılı bir kirişte kesme kuvvetlerinin karşılanması .....	35
Şekil 6.1. (a-b) FRP donatılı betonarme kirişlerin deneysel ve teorik taşıma gücü momentlerinin karşılaştırılması.....	45
Şekil 6.2. (a-b) FRP donatısının betonarme kesitin moment kapasitesi üzerine olan etkisi .....	50
Şekil 6.3. (a-e) FRP donatılı basit mesnetli kirişlerin deneysel ve teorik olarak elde edilen deplasman sonuçlarının karşılaştırılması .....	52
Şekil 6.4. (a-b) Çekme bölgesinde bulunan FRP donatıların betonarme kirişlerin deplasmanları üzerine olan etkisi.....	54
Şekil 6.5. Farklı tipteki FRP donatılarının betonarme kirişlerin deplasmanları üzerine olan etkisi .....	55
Şekil 6.6. Hibrit betonarme kesitlere ait deneysel ve teorik eğrilik sonuçlarının karşılaştırılması.....	56
Şekil 6.7. (a-c) Denge altı ve denge üstü kesitlere ait moment eğrilik ilişkileri.....	58
Şekil 6.8. FRP donatısı tipinin hibrit betonarme kesitlerin moment eğrilik ilişkisi üzerine olan etkisi .....	61

Şekil 6.9. (a-f) Kayma donatısız FRP donatılı elemanlara ait deneysel sonuçlarla model sonuçlarının karşılaştırılması .....	64
Şekil 6.10. (a-f) Kayma donatısız FRP donatılı elemanlarda deneysel sonuçların model sonuçlara olan oranının kesit yüksekliği ile değişimi.....	68
Şekil 6.11. (a-f) FRP Kayma donatılı donatılı elemanlara ait deneysel sonuçlarla model sonuçlarının karşılaştırılması .....	72

## SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$\alpha_1$	Kompozit çubukların boyuna yöndeki ısı genleşme katsayısı
$\alpha_t$	Kompozit çubukların enine yöndeki ısı genleşme katsayısı
$f_c$	Basınç etkisi altında betonda oluşan gerilme
$\varepsilon_c$	Basınç etkisi altında betonda oluşan şekil değiştirme
$f'_c$	Beton silindir basınç dayanımı
$\varepsilon_{co}$	Maksimum gerilmeye karşılık gelen şekil değiştirme
$E_c$	Betonun başlangıç elastisite modülü
$\varepsilon_{cu}$	Betonun basınç etkisi altında kırılma anındaki şekil değiştirme
$f_t$	Betonda oluşan çekme gerilmesi
$\varepsilon_t$	Betonda çekme gerilmesi sonucunda oluşan şekil değiştirme
$f_{tu}$	Betonun eğilmedeki çekme dayanımı
$\varepsilon_{ct}$	Betonun eğilmedeki çekme dayanımına karşılık gelen şekil değiştirme değeri
$E_t$	Çekme etkisi altındaki betonun elastisite modülü
$\mu$	Çekme dayanımındaki azalmayı kontrol eden bir parametre
$f_f$	FRP donatısındaki gerilme değeri
$\varepsilon_f$	FRP donatısındaki şekil değiştirme
$E_f$	FRP donatısının Elastisite modülü
$f_{fu}$	FRP donatısının kırılma konumuna ulaştığı andaki gerilme
$\varepsilon_{fu}$	FRP donatısının kırılma konumuna ulaştığı andaki şekil değiştirme
$\varepsilon_i$	Çekme veya basınç bölgesindeki her bir beton şeridin ağırlık merkezindeki şekil değiştirme
$\varepsilon_f$	Kesitin alt bölgesindeki FRP donatısında oluşan şekil değiştirme
$\varepsilon'_f$	Kesitin üst bölgesindeki FRP donatısında oluşan şekil değiştirme
$d$	Çekme bölgesindeki donatının beton üst yüzüne olan uzaklığı
$d'$	Basınç bölgesindeki donatının beton üst yüzüne olan uzaklığı

$f_{ci}$	i numaralı beton şeridin ağırlık merkezinde oluşan çekme veya basınç gerilmesi
$h_i$	i numaralı beton şeridin kalınlığı
$b$	Kesit genişliği
$A_f$	Kesitin çekme bölgesindeki FRP donatılarının kesit alanı
$E_f$	Kesitin çekme bölgesindeki FRP donatısının elastisite modülü
$A'_f$	Kesitin basınç bölgesindeki FRP donatısının kesit alanı
$E'_f$	Kesitin basınç bölgesindeki FRP donatısının elastisite modülü
$F_{ci}$	i numaralı beton şeridin ağırlık merkezine etkiyen çekme veya basınç kuvveti
$EI_{eff}$	Eğilme rijitliği değeri
$\Delta$	Basit mesnetli bir kirişin orta noktasında oluşan deplasman
$L$	Kiriş açıklığı
$a$	Yükün uygulandığı noktanın mesnede olan uzaklığı
$\Delta$	Tekil yüklü sürekli kirişlerin orta noktasında oluşan deplasman
$\rho_f$	Kesit içerisindeki FRP donatı oranı
$f_f$	Basınç bölgesindeki betonun kırılma şekil değiştirme değerine ulaştığı anda FRP donatısında oluşan gerilme değeri
$c_b$	Dengeli durumdaki tarafsız eksen derinliği
$\beta_1$	Beton dayanımı azaltma katsayısı
$I_1$	Kesitin çatlama öncesi atalet momenti
$I_2$	Kesitin tamamen çatlamış haldeki atalet momenti
$M$	İlgili kesitteki eğilme momenti
$M_{cr}$	Çatlama anındaki eğilme momenti
$\epsilon_s$	Çekme bölgesindeki çelik donatıda oluşan şekil değiştirme
$\epsilon'_s$	Basınç bölgesindeki çelik donatıda oluşan şekil değiştirme
$d_s$	Çekme bölgesine yerleştirilen çelik donatı ile beton en dış yüzü arasındaki mesafe
$d'_s$	Basınç bölgesine yerleştirilen çelik donatı ile beton en dış yüzü arasındaki mesafe
$T_f$	Çekme bölgesindeki FRP donatısında oluşan kuvvet
$C_f$	Basınç bölgesindeki FRP donatısında oluşan kuvvet
$T_s$	Çekme bölgesindeki çelik donatıda oluşan kuvvet
$A_s$	Çekme bölgesindeki çelik donatıya ait alan

$E_s$	Çekme bölgesindeki çelik donatıya ait elastisite modülü
$C_s$	Basınç bölgesindeki çelik donatıda oluşan kuvvet
$A'_s$	Basınç bölgesindeki çelik donatıya ait alan
$E'_s$	Basınç bölgesindeki çelik donatıya ait elastisite modülü
$C_{f(s)}$	Basınç bölgesindeki FRP veya çelik donatıya ait kuvvet
$\varphi$	Hibrit betonarme elemanda oluşan eğrilik
$M_f$	Kesitin taşıma gücü momenti
$a$	Kesme açıklığı
$d$	Faydalı yükseklik
$V$	Çekme donatısı bulunmayan ve eğik çatlakın oluştuğu bir kirişteki kesme kuvveti
$V_{cc}$	Çatlamamış basınç bölgesindeki beton tarafından taşınan kesme kuvveti
$V_{ci}$	Çatlak yüzeyindeki sürtünme nedeniyle taşınan kesme kuvveti
$q_{ci}$	Çatlak içi kesme gerilmesi
$V_{cd}$	Çekme donatısınca taşınan kesme kuvveti
$V_c$	Beton tarafından taşınan kesme kuvveti
$V_s$	Etriyenin kesme dayanımına katkısı
$f'_c$	Betonun basınç dayanımı
$b_w$	Kesit genişliği
$c$	Çatlamış kesitin tarafsız eksen derinliği
$\rho_f$	Kesitteki FRP donatısı oranı
$n$	FRP donatısı elastisite modülünün çeliğin elastisite modülüne olan oranı
$d$	Etkili kesit yüksekliği
$A_{fv}$	Etriyelerin kesit alanı
$s$	Etriye aralığı
$f_{fv}$	Etriyelerin kırılma anındaki gerilme değeri
$f_{fb}$	Eğilme kapasitesi değeri
$\lambda$	Beton yoğunluğunu hesaba katan katsayı
$\Phi$	Beton dayanımını hesaba katan katsayı
$V_f$	İlgili kesitteki kesme kuvveti
$M_f$	İlgili kesitteki eğilme momenti
$\Phi_f$	FRP etriye donatısının dayanımı ile ilgili bir katsayı

$d_v$	Kesit etkili kayma yüksekliği
$\rho_{fv}$	Kesitteki etriye oranı
$E_{fv}$	Etriyelerin elastisite modülü
$\sigma_N$	Eksenel kuvvetten dolayı betonda oluşan gerilme değeri
$f_{cu}$	Küp numune beton basınç dayanımı
$\gamma_b$	Dayanım azaltma katsayısı
$N_d$	Tasarım eksenel yükü
$M_d$	Tasarım eğilme momenti
$\epsilon_{fv}$	Kırılma anında etriyelerde oluşan şekil değiştirme değeri
$z$	Kesitteki basınç ve çekme kuvvetleri arasındaki mesafe
$f_{mcd}$	Tasarım beton basınç dayanımı
$P_{ed}$	Etkili öngerme kuvveti
$A_g$	Toplam kesit alanı
$h$	Kiriş yüksekliği
$f_y$	Çeliğin akma dayanımı
$\rho_{fl}$	Kesitteki FRP boyuna donatı ve kayma donatısı oranı
$E_{fl}$	FRP boyuna donatısı için elastisite modülü
$E_s$	Çelik boyuna donatısı için elastisite modülü
$f_{uv}$	Kayma donatısı için kırılma anındaki gerilme değeri

### **Kısaltmalar Açıklama**

SD	Standart sapma
AAE	Standart hata
COV	Değişkenlik katsayısı
ACI	American Concrete Institute
BISE	British Institution of Structural Engineers
CAN/CSA	Canadian Standards Association
ISIS	International School of Interdisciplinary Studies/Canada
JSCE	Japan Society of Civil Engineers

## BÖLÜM I

### GİRİŞ

İnşaat sektörünün en önemli problemlerinden biri donatı çeliğinin korozyona uğramasıdır. Betonun, deniz suyu veya tekrarlayan donma-çözülme olayları gibi çevresel faktörlerin etkisinde olduğu durumlarda donatı çeliğinde korozyon oluşabilmektedir. Bu tür ağır çevresel koşullara maruz kalan betonarme yapılarda bulunan çelik donatıların korozyona uğraması bu yapılarda ortaya çıkan en büyük problemlerden birini teşkil etmektedir. Bu durum betonarme yapılarda zaman alıcı ve yüksek maliyetli bakım, onarım ve güçlendirme işlemleri uygulanmasını gerektirmekte ve bu tür yapıların kullanılabilirlik sürelerinin kısalmasına neden olmaktadır. Betonarme yapılarda ortaya çıkan bu tür problemlerden dolayı, korozyona karşı dirençli bir malzeme olan lif takviyeli polimer (FRP) donatıların yapılarda kullanılması alternatif bir çözüm yöntemi olarak ortaya çıkmıştır. Günümüzde FRP donatılar inşaat sektöründe; hafiflik, yüksek dayanım, korozyona dayanıklılık, yorulma mukavemetinin yüksek olması, düşük ısı iletkenlik özelliği ve manyetik geçirgenliğinin olmaması gibi avantajlarından dolayı kullanılmaya başlanmıştır.

FRP donatıların bir betonarme donatısı olarak kullanılmasını sağlayan en önemli özelliklerinden biri yüksek çekme dayanımlı hafif bir malzeme olmasıdır. FRP donatısı, çelik donatıya göre daha yüksek çekme dayanımlı bir malzeme olmasının yanında daha düşük bir elastisite modülüne sahiptir. Bu malzeme aynı zamanda kırılma konumuna kadar lineer bir gerilme şekil değiştirme davranışı göstermektedir. FRP donatıların düşük elastisite modülüne sahip olmasından dolayı yükler etkisi altında bulunan FRP donatılı kirişlerin rijitliklerinde çatlamalardan sonra önemli azalmalar olmakta ve bu durum, bu elemanlarda kullanılabilirlik yük düzeyinde bile oldukça büyük deplasmanlar oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, FRP donatılı betonarme kirişlerin tasarımında kullanılabilirlik şartlarının sağlanması önemli bir koşul olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu bilgiler göz önünde bulundurularak özellikle servis yükleri düzeyinde FRP donatılı betonarme elemanlarda oluşan deplasmanların belirlenmesi oldukça önemli olmaktadır. Bununla birlikte, FRP donatılı betonarme kirişler, uygulanan yüklerin etkisi altında

gerek betonun gerekse FRP donatısının gevrek bir kırılma davranışına sahip olmalarından dolayı sünek olmayan bir kırılma davranışı sergilemektedirler. Bu nedenle, bu elemanların taşıma gücü kapasitelerinin gerçeğe daha yakın olarak elde edilmesi bu elemanların tasarımı için oldukça önemli olmaktadır.

FRP donatılı kirişlerin gevrek bir kırılma davranışına sahip olması ve bu elemanlarda büyük deplasmanlar oluşmasından dolayı özellikle son yıllarda, FRP ve çelik donatının kesit içerisinde birlikte kullanıldıkları hibrit FRP-Çelik donatılı kirişlerin eğilme etkisi altındaki analizi üzerine araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu tür kirişlerin tasarımında en uygun çözüm yöntemi FRP donatısının uygun beton örtü tabakası sağlanacak şekilde çekme yüzüne yakın, çelik donatının da kesit içerisinde daha içte kalacak şekilde yerleştirilmesidir. Sonuç olarak bu şekilde yapılan bir tasarımla çelik, dayanıma daha az katkıda bulunacak fakat elemanın rijitliğini ve sünekliğini arttıracaktır (Aiello ve Ombres 2002).

FRP ve çelik donatılarının mekanik özelliklerinin birbirinden farklı olması nedeniyle FRP donatılı betonarme elemanların kesme dayanımları çelik donatılı elemanlara göre farklılık göstermektedir. Birçok uluslararası yönetmelikte FRP donatılı betonarme elemanların kesme tasarımı, çelik ve FRP donatılarının mekanik özelliklerindeki farklılıklar hesaba katılarak çelik donatılı kirişlerin tasarımı için önerilen modellere dayandırılmıştır. Önerilen yöntemlerde betonarme kirişlerin kesme dayanımı, betonun kesme dayanımına olan katkısı ile kayma donatılarının kesme dayanımına olan katkılarının toplamı olacak şekilde hesaplanmaktadır. Bugüne kadar yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara bağlı olarak FRP donatılı elemanlarda, gerek FRP donatısının çeliğe göre daha düşük elastisite modülüne sahip olması, gerekse eksenine dik yöndeki dayanımının az olması nedeniyle betonun kesme dayanımına olan katkısı çelik donatılı elemanlara göre daha az olduğu sonucuna ulaşılmış olup bu durum yönetmeliklerde önerilen modellere de yansıtılmıştır. Bununla birlikte farklı yönetmelikler tarafından kesme dayanımı için önerilen modellerin de farklı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bu bilgiler de göz önüne alınarak bu çalışma kapsamında ilk etapta FRP donatılı betonarme kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışı ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir. Bu amaçla deneysel çalışmaları daha önceden yapılmış birçok FRP donatılı betonarme

kiriş örneği Kara ve Ashour (2012) tarafından geliştirilen bilgisayar programı aracılığı ile analiz edilmiş ve FRP donatısının kirişlerde oluşan deplasmanlar ve taşıma gücü momentleri üzerine olan etkisi ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Bununla birlikte FRP donatısı türü ve miktarının kirişlerde oluşan deplasmanlar ve taşıma kapasiteleri üzerine olan etkisini irdeleyen parametrik çalışmalar yapılarak, farklı parametrik değişkenlerin FRP donatılı betonarme kirişlerin davranışı üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Çalışmada ayrıca hibrit FRP-Çelik donatılı kirişlerin eğilme etkisi altındaki analizi de, Kara ve Ashour (2014) tarafından geliştirilen bir bilgisayar programı aracılığı ile yapılmıştır. FRP ve çelik donatı oranı ve FRP donatı tipi gibi farklı değişkenlerin, hibrit betonarme kirişlerin davranışları üzerine olan etkisini irdelemek amacıyla parametrik çalışmalara yer verilmiştir.

Çalışmada en son olarak, FRP donatısı içeren betonarme kirişlerin kesme dayanımı farklı ülke yönetmelikleri ve standartlar tarafından önerilen modeller aracılığı ile elde edilerek bu modellerin karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımları için bir denklem önerilmiş ve bu denklemin diğer yönetmelikler tarafından önerilen modellerle karşılaştırması da yapılmıştır.

## BÖLÜM II

### ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Özellikle son 15 yılda FRP donatılı betonarme elemanların eğilme etkisi altındaki davranışlarını inceleyen birçok çalışma yapılmıştır. Bununla birlikte FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme davranışı ve dayanımı ile ilgili olarak da bugüne kadar birtakım çalışmalar yapılmıştır. Fakat yapılan çalışmalar normal çelik donatılı kirişlerin kesme dayanımı ile ilgili olarak yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında yeterli düzeyde bulunmamaktadır. Bu bölümde FRP donatılı betonarme kirişlerin eğilme ve kesme dayanımına yönelik olarak yapılan çalışmalara yer verilecektir.

Almusallam (1997), artımsal deformasyon yöntemine dayandırarak FRP donatılı betonarme kirişlerde oluşan deplasmanların hesabı için numerik bir çözüm yöntemi geliştirmiştir. Geliştirilen bu yöntemde, betonun basınç etkisi altındaki en uç lifinde oluşan şekil değiştirme değeri için bir kabul yapılarak çözüme başlanmakta ve kesitte oluşan tarafsız eksen değeri iteratif bir yöntemle elde edilmektedir. Bu yöntem FRP donatılı kirişlerin analiz ve tasarımı için genel bir çözüm yöntemi olmamaktadır.

Barris vd. (2009), cam lif takviyeli polimer (GFRP) donatılı betonarme kirişleri iki noktasal yük etkisi altında deneysel olarak yüklemeye tabi tutarak, gerek kirişlerdeki donatı oranının, gerekse etkili derinlik/kesit yüksekliği oranının davranışa olan etkisini araştırmışlardır. Bununla birlikte ACI 440-06 (2006)'nın önerdiği etkili atalet momentleri aracılığı ile elde edilen deplasman değerlerini deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Servis yükleri düzeyinde bu modellerin uygun sonuçlar verdiği fakat yükün taşıma gücüne yaklaştığı durumlarda sonuçlarda farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir.

Chakib vd. (2011), karbon, cam ve aramid lif takviyeli polimer (CFRP, GFRP, AFRP) donatılı 24 adet betonarme kirişi deneysel olarak yüklemeye tabi tutmuşlar ve bu kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışını ayrıntılı bir şekilde irdelenmişlerdir. Bu çalışma sonunda deneysel olarak yüklemeye tabi tutulan tüm kirişlerin betonun ezilme birim kısalmasına erişince taşıma gücüne ulaştıkları gözlemlenmiştir. Aynı şekilde farklı yönetmelikler tarafından önerilen taşıma gücü momenti değerlerinin deneysel

sonuçlarla uyum içinde olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Basit mesnetli kirişlerin orta kesitindeki tarafsız eksen derinliğinin çatlamış kesit analizine dayandırılarak elde edilen numerik sonuçlarla uyum içerisinde olduğu ifade edilmiştir.

Gravina ve Smith (2008), FRP donatılı sürekli betonarme kirişlerin analizi için analitik bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yöntemde uygulanan yüklerin etkisi altında eğilmeden dolayı oluşan çatlamaları modellemişler ve aderans etkisinin ve beton örtü tabakasının davranış üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Habeeb ve Ashour (2008), betonarme kirişlerde eğilme donatısı olarak cam lifli polimer (GFRP) donatının kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Deneysel olarak yüklemeye tabi tutulan GFRP donatılı sürekli kirişlerden elde edilen değerleri aynı donatı tipi ve oranına sahip basit mesnetli kirişler ve normal elik donatılı sürekli kirişlerden elde edilen değerlerle karşılaştırmışlardır. Çalışma kapsamında karşılaştırılan parametreler kirişlerin kırılma şekli, çatlamaların boyutu ve şekli, donatılardaki şekil değiştirmeler ve yüklerin dağılımını içermektedir. Çalışmada ayrıca basit mesnetli ve sürekli kirişlerin taşıma gücü kapasiteleri ve deplasmanlarının hesabı için ACI 440.1.R-06 (2006) tarafından önerilen denklemlerin uygulanabilirliğini belirlemeye çalışmışlardır.

Razaqpur vd. (2000), FRP donatılı betonarme kirişlerde oluşan deplasmanların hesabı için moment eğrilik ilişkisine dayandırdıkları analitik bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yöntemde ilk etapta tüm kirişi tamamen çatlamış olarak kabul etmekte ve daha sonra atlamının oluşmadığı bölgelerde gerekli düzenlemeleri yaparak elde ettikleri eğrilik değerlerinden deplasmanları hesaplamaktadırlar. Geliştirdikleri bu yöntemde çekme rijitleşmesi etkisini göz önünde bulundurmamışlardır.

Tautanji ve Deng (2000), GFRP donatılı basit mesnetli betonarme kirişlerde oluşan deplasmanların elde edilmesi için ACI 440.1.R-06 (2006) tarafından önerilen denklemlerin uygulanabilirliğini araştırmışlar ve önerilen bu denklemlerin iyi sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir.

Vijay ve GangaRao (2001), GFRP donatısı içeren betonarme kirişlerin taşıma gücü momentini hesaplamak için ACI 318-99 (1999) ve ACI 440.1.R-01 (2001) yönetmeliklerinde önerilen denklemlere benzer basit bir model geliştirmiş ve bu

modelden elde ettikleri sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasından oldukça uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir.

Lou ve Pem (2010), kesit içerisinde GFRP ve çelik donatı içeren 12 adet hibrit betonarme kirişi deneysel olarak yüklemeye tabi tutmuşlar ve eğilme etkisi altındaki davranışını ayrıntılı bir şekilde araştırmışlardır. Çalışmadan hibrit betonarme kirişlerin FRP donatılı betonarme kirişlere göre daha sünek bir davranış gösterdiğini gözlemlemişlerdir. FRP donatılı betonarme kirişe çelik donatı eklenmesiyle birlikte hibrit betonarme kirişlerin sünekliliğinin önemli derecede arttığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca ACI 440.1R-06 tarafından FRP donatılı betonarme kirişler için önerilen minimum donatı oranının %25 azaltılabileceğini ifade etmişlerdir.

Qu vd. (2009), hibrit GFRP-çelik donatı içeren betonarme kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışını deneysel olarak incelemiştir. Bununla birlikte hibrit kirişlerin yük-deplasman ilişkilerini ve taşıma gücü değerlerini elde etmek için teorik bir model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yöntemle elde ettikleri deplasman ve taşıma gücü değerlerini deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlar ve oldukça uyumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Bischoff (2005)'un önerdiği etkili atalet momenti modelleri aracılığı ile elde edilen deplasman değerlerinin yükün kullanılabilirlik yük düzeylerinde olduğu durumlarda oldukça iyi sonuçlar verdiği, ancak yükün bu seviyeyi aştığı ve taşıma gücüne de yaklaştığı zaman sonuçlar arasında farklılık oluştuğu gözlemlenmiştir.

Ahmed vd. (2004), FRP kayma donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı ve davranışının belirlenebilmesi amacıyla deneysel bir çalışma yapmışlardır. Kirişleri farklı tipte FRP donatısına ve etriye aralığına sahip olacak şekilde oluşturmuşlardır. Tüm kirişler deneyden önce tasarlandığı gibi kesmeden dolayı taşıma gücüne erişmişlerdir. Deneysel olarak elde ettikleri kesme dayanımı değerlerini, birçok ülke yönetmelikleri tarafından önerilen denklemlerle karşılaştırmışlar ve gerek ACI 440.R1-06 gerekse CAN/CSA S6-06 tarafından önerilen modellerden elde ettikleri sonuçların deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Çalışmadan ayrıca, FRP etriyelerinin normal çelik donatılı etriyeler gibi ilk çatlamadan sonra betonun kesme dayanımına olan katkısını artırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Etriye aralığının sıklaştırılmasıyla, kesme çatlaklarının kontrol edilmesi ve agregaların birbirine

kenetlenmesinin daha da arttırılmasıyla, betonarme kirişlerin kesme dayanımlarının arttığı sonucuna ulaşılmışlardır.

El-Sayed vd. (2006), FRP boyuna donatılı yüksek dayanımlı narin ( $a/d > 2.5$ ) betonarme kirişlerin dayanım ve davranışlarını incelemek için deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışma kapsamında yüksek basınç dayanımına sahip CFRP ve GFRP donatılı betonarme kirişlerde betonun kesme dayanımına olan katkısı irdelenmiştir. Deneysel olarak elde ettikleri kesme dayanımı değerlerini ACI 440.1R-03 tarafından önerilen denklemlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlar ve bu modelin gereksiz bir şekilde oldukça güvenli yönde sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde oluşan kesme kırılmasının normal dayanımlı betonarme kirişlerle benzerlik gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır. Yapılan çalışma ile beton basınç dayanımı arttıkça kesme dayanımının arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Joseph vd. (2000), betonun kesme dayanımına olan katkısını belirlemek için farklı boyuna donatı oranına sahip, GFRP donatılı kayma donatısız betonarme kirişleri, iki noktasal yük etkisi altında deneysel olarak teste tabi tutmuşlardır. Deneysel çalışma sonuçlarından tüm kirişlerin diyagonal çekme kırılması nedeniyle taşıma gücüne eriştiklerini gözlemlemişlerdir. Deneysel olarak elde ettikleri kesme dayanımı değerlerini, gerek normal çelik donatılı kirişlerin kesme dayanımı için verilen modeller, gerekse literatürde GFRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı için önerilen modellerle karşılaştırmışlardır. Yapılan bu karşılaştırma sonucunda, ACI 318-99 tarafından normal çelik donatılı kirişlerin kesme dayanımı için önerilen denklemin deneysel sonuçlara göre oldukça güvenli yönde değerler verdiği sonucuna ulaşılmıştır. Bunun temel nedeninin GFRP donatılı kirişlerde çelik donatılı kirişlere göre daha geniş çatlakların oluşmasından ve bu kirişlerin daha az basınç bloğu derinliğine sahip olmasından kaynaklandığını ifade etmişlerdir. Çalışmalarında ayrıca kesme dayanımının GFRP boyuna donatısından bağımsız olduğunu ifade etmişlerdir.

Rozapqur vd. (2004), FRP donatılı kirişlerde betonun kesme dayanımına olan katkısını belirlemek için deneysel çalışma yapmışlardır. Deneysel olarak elde ettikleri kesme dayanımı değerlerini birçok ülke yönetmeliği tarafından önerilen denklemlerle karşılaştırmışlardır. Çalışmada, betonun kesme dayanımına olan katkısının; betonun basınç dayanımına, boyuna donatının eksenel rijitliğine ve kirişe ait  $a/d$  değerine bağlı

olduğunu ifade etmişlerdir. ACI 440.R1-03 (2003) tarafından FRP donatılı kirişlerin kesme dayanımı için önerilen denklemlerin oldukça güvenli yönde sonuçlar verdiği görölmüştür.

## BÖLÜM III

### FRP MALZEMESİ VE DONATISININ ÖZELLİKLERİ

Günümüzde çevresel koşullara bağlı olarak beton, karbonatlaşma gibi kimyasal reaksiyonlar sebebiyle zarar görebilmekte ve betonarme yapılarda kullanılan çelik donatı korozyona uğramaktadır. İnşa edilecek yeni yapılarda korozyon hasarlarını engellemek için mümkün olan alternatif bir çözüm yöntemi çelik donatı çubuklarının yerine korozyona karşı daha dayanıklı olan malzemelerin kullanılmasıdır. FRP donatılar özellikle son yıllarda çelik donatıların yerine kullanılan ideal bir malzeme olarak ortaya çıkmıştır. Bu bölümde FRP'yi oluşturan malzemeler ve özellikleri ile birlikte FRP donatısının özellikleri açıklanacaktır.

#### 3.1 FRP'nin İç Yapısı

FRP ürünleri reçine matrisi içerisine gömülmüş, yüksek dayanımlı liflerden oluşan kompozit malzemeler olup bu liflerden oluşturulan kompozit malzemeye dayanım ve rijitlik sağlamak ve genellikle yükün büyük bir kısmını almaktadırlar. Cam, karbon ve aramid en yaygın olarak kullanılan lifler, epoksi, polyester, vinylester ise en yaygın kullanılan matrislerdir (Yavuz 2011).

İnşaat Mühendisliği uygulamaları için en yaygın olarak kullanılan lif tipleri cam ve karbondur. Üretim alanı içerisindeki en geniş kullanım cam life aittir. Günümüzde uygulamada en yaygın şekilde kullanılan lif takviyeli kompozitler laminat olarak isimlendirilen ve yapı elemanlarına dıştan yapıştırılarak uygulanan güçlendirme malzemeleridir. Laminatlar, birkaç ince katman ve matrisler topluluğunun istenilen kalınlıkta birleştirilmesiyle elde edilmektedir. Her tabakadaki fiber doğrultusu, çeşitli katmanların yığın şeklinde sıralanmasıyla, yük etkisine göre fiziksel ve mekanik özelliklerin iyileştirilebileceği yönde yerleştirilmektedir. Termoset veya termoplastik reçineler, lif üretimi veya daha sonraki aşamada yüzey şeklinin verilmesini sağlamaktadır. Liflere uygulanan diğer malzemeler, bu elemanları bir arada yığın şeklinde tutan reçine tutkalları ve işlem sırasındaki aşınma nedeniyle meydana gelen azalmadan fiberleri koruyan lubrikant adı verilen maddelerdir (Yavuz 2011).

### **3.1.1 Cam lifler**

Cam lifler, kompozit malzemeleri takviye için kullanılan en yaygın malzemedir. Bunun nedeni, uygun fiyatı ve istenilen özelliklere büyük oranda sahip olmasıdır. "Cam" terimi, inorganik camların geniş bir grubunu ifade etmek için kullanılır. Bunlar, silika (SiO<sub>2</sub>) temelli olup az miktarda diğer inorganik oksitleri de içermektedirler. Cam lifler dayanıklı ve esnekler, fakat bazı inşaat uygulamaları için yeterli dayanıma sahip değildirler. Daha yüksek dayanım gerektiğinde daha pahalı ve yüksek kaliteli olan karbon yada polimer lifler kullanılabilir. Cam lif, ekonomik imalatından ve kendine has dayanım özelliklerinden dolayı pek çok inşaat mühendisliği uygulamasında kullanılan bir fiber tipi olmuştur. Bunlar, ticari olarak E-glass (E-cam) formülasyonunda olup kompozit donatının genel amaçlı ve en yaygın kullanılan tipidir. Yüksek dayanımlı diğer formülasyonlar arasında, asite karşı dayanıklılığı ve alkali dayanımı geliştirilmiş olan ürünler de bulunmaktadır (Yavuz 2011).

### **3.1.2 Karbon lifler**

Karbon lifler genellikle poliakrilonitril'in (PAN), 1000-1500°C'da karbonlaştırılması (havasız ortamda ısıtılması) ile üretilmektedir. Karbon liflerin uygulamadaki avantajları; boyutsal açıdan kararlı oluşları, kimyasal içerikleri nedeniyle neme ve pek çok kimyasala direnç göstermeleri ve elektriksel/ısısal iletkenliklerinin yüksek oluşudur. Karbon fiberlerin kullanıcı açısından en önemli dezavantajı ise siyah renginden dolayı kompozit renginin istenilen şekilde korunamamasıdır. Diğer bir dezavantaj olarak yüksek maliyet söylenebilir. Karbon lifler, güçlü fakat hafif bir yapıya sahiptirler. Bunun sebebi, karbon atomlarının bileşiği oluştururken meydana getirdiği geometridir (Yavuz 2011).

### **3.1.3 Polimer lifler**

Polimer lifler, genel olarak istenilen yeterli dayanıma sahip değildirler. Yalnızca aramid lifler ve ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen lifler üstün mekanik özellikleri nedeniyle diğerlerinden ayrılırlar. "Aramid", aromatik liflerin genel adıdır. Ticari adı ise Kevlar'dır. Kevlar kompozitleri yüksek dayanım ve sertlikleri, hasar ve yorulma dirençleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Yavuz 2011). Aramid lifler, düşük

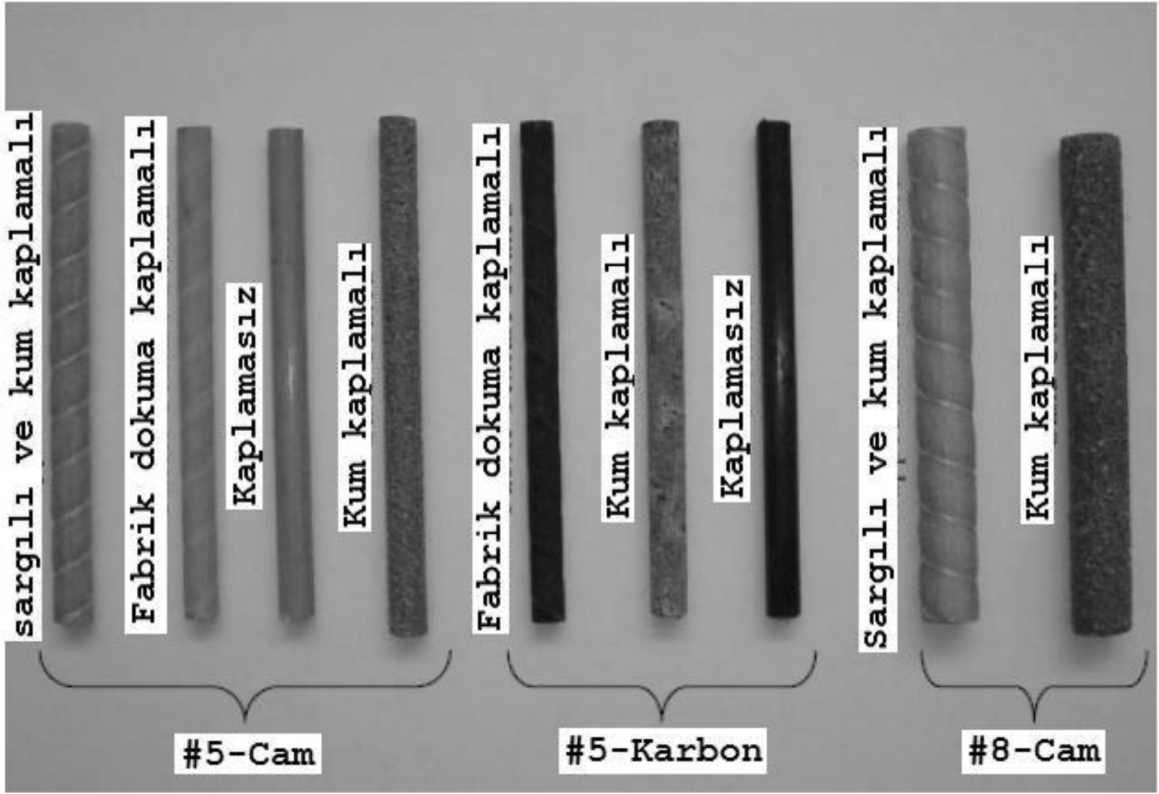
yoğunluk, sertlik ve darbe direncinde üstün mekanik özellik sağlamaktadır. Aramid liflerinin dayanımı, cam liflere göre daha yüksek ve elastisite modülü camdan %50 daha fazladır. Bu lifler, kompozitlerin darbe direncini artırmakta ve daha yüksek gerilme dayanımı sağlamaktadır. Aramid lifler, hem elektrik geçirgenliğini hem de ısıyı yalıtılabilmektedirler. Yukarıda sözü geçen lif tipleri karşılaştırıldığında karbon'un en iyi olduğu, onu Kevlar'ın ve ardından camın izlediği söylenebilir.

### **3.1.4 Matris**

Matris, kompozitin temelini oluşturur ve lifleri bir arada tutarak kompozitin dayanımını artırır. Kullanım yerine bağlı olarak farklı matrisler seçilir. Vinilester reçineleri, poliester-stiren sistemiyle karşılaştırıldığında bazı avantajlara sahiptir. Çok fazla su emmezler ve kimyasal dirençleri daha yüksektir. Cam lifler kullanıldığında bu durum avantaj sağlar. Fakat ne vinilester, ne de doymamış poliester-stiren sistemi yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun değildir. Yüksek sıcaklıklarda, epoksi reçineleri gibi matrislerin kullanılması gerekmektedir. Bunlar 160°C'a kadar olan sıcaklıklarda kullanılabilirler. Ancak 160°C gerçek anlamda çok yüksek bir sıcaklık değildir. Kompozit malzemeyi oluşturan elemanlardan her biri, işlem ve sonuç performansta önemli rol oynamaktadır. Reçine veya polimer, kompozit yapıyı bir arada tutmakta ve elde edilen ürünün fiziksel özelliklerine etki etmektedir. Takviye elemanı lifler, mekanik dayanımı sağlamaktadır. Dolgu maddeleri ve katkıları ise ürüne istenen özellikleri katmak amacıyla kullanılmaktadır (Yavuz 2011).

### **3.2 FRP Donatısının Özellikleri**

Özellikle dış ortamlara açık olan yapılarda kullanılabilen farklı tiplerde FRP donatıları mevcuttur. Bunlar; yüzey deformasyonlu donatı çubukları, öngerme tendonları, çift yönde hasır şeklindeki betonarme donatılardır. Günümüzde betonarme ve öngerilmeli beton uygulamaları için kullanılan FRP donatıları tek doğrultulu, düz veya nervürlü çubuklar ve burulmuş tendonlar şeklindedir. Bazı FRP çubukları kendisini çevreleyen betonla arasında daha iyi bir aderans olması için kumla kaplanmakta veya aderansı sağlamak üzere yüzey deformasyonlarının elde edilebilmesi için helezonik tel sarma yöntemi gibi ikinci bir işleme maruz bırakılmaktadır. Şekil 3.1'de farklı yüzeylere sahip FRP çubukları görülmektedir.



Şekil 3.1. FRP donatısına ait örnekler (Fico 2006; Yavuz 2011)

FRP donatısı çubuk, plak ve halat şeklinde oluşturulabilmekte ve çelik donatıdan farklı olarak, kesin bir şekilleri, yüzey konfigürasyonları, lif doğrultusu, birleşim malzemeleri ve oranları yoktur.

FRP donatılarının çekme dayanımı, geleneksel çelik donatılara göre daha yüksektir. Bu malzemelerin ağırlığının az olması, taşıma, işçilik ve ekipman maliyetlerini azaltmakta ve inşaat sahasında çubukların yerleştirilmesini kolaylaştırmaktadır. Bununla birlikte elektromanyetik izolasyonun kritik olduğu nükleer güç santralleri ve hastaneler gibi yapı uygulamalarında bu donatının manyetik olmama özelliği bir avantaj olarak ortaya çıkmaktadır.

FRP çubuklarının mekanik özellikleri çelik çubuklardan oldukça farklı olup bu özellikler matris ve lif tipine bağlıdır (Yavuz 2011). FRP donatıları, genelde çeliğe göre daha düşük elastisite modülüne ve daha yüksek çekme dayanımına sahiptir. Betonarme yapılarda kullanılan FRP donatılarının çelik donatıya göre avantaj ve dezavantajları Çizelgede 3.1'de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** FRP donatılarının avantaj ve dezavantajları (ACI 440.1R-06-Yavuz 2011)

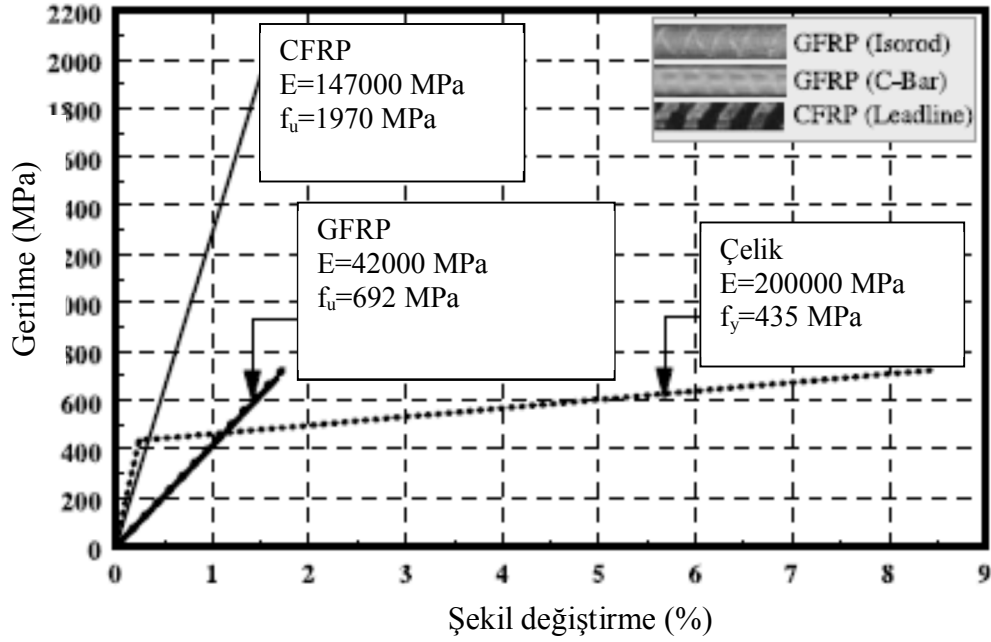
Avantajları	Dezavantajları
Yüksek boyuna çekme dayanımı (liflerin yüklenme yönü ve işaretiyle değişmektedir)	Gevrek kopmadan önce akma olmaması
Korozyon dayanıklılığı (kaplamaya bağlı değildir)	Düşük enine dayanım (liflerin yüklenme yönü ve işaretiyle değişmektedir)
Manyetik olmaması	Düşük elastisite modülü (takviye lifi tipine göre değişmektedir)
Yüksek yorulma dayanımı (takviye lifi tipine göre değişmektedir)	Ultraviyole radyasyon etkisi altında polimer reçineler ve lifler için hasar hassasiyeti

Çizelge 3.1’den görüldüğü gibi FRP donatılarının avantajları hafiflik, yüksek çekme dayanımı, korozyona dayanıklılık, yorulma mukavemetinin yüksek olması, düşük ısı iletkenliği ve manyetik geçirgenliğinin olmaması, dezavantajları ise dayanımın lif doğrultusuna bağlı olarak değişmesi nedeniyle düşük enine dayanım düşük elastisite modülü, kopmadan önce akma olmaması dolayısıyla gevrek davranış göstermesi, yangına karşı hassasiyet şeklinde ifade edilebilir.

FRP donatılarının çelik çubuklara göre yüksek çekme dayanımlı hafif bir malzeme olması bu donatıların bir betonarme donatısı olarak kullanılmasını sağlayan en önemli özelliklerinden biri olup, bu donatıları çelik donatıya bir alternatif yapmaktadır. Ancak FRP donatıları çekme etkisi altında kopmadan önce herhangi bir plastik davranış (akma) sergilememektedir. Şekil 3.2’de bir çalışmadan alınan CFRP ve GFRP donatılarıyla birlikte çelik çubukların gerilme şekil değiştirme ilişkisi görülmektedir.

Şekil 3.2’de görüldüğü üzere CFRP ve GFRP donatıları kırılma anına kadar çelik çubuklardan farklı olarak lineer bir gerilme şekil değiştirme ilişkisi göstermektedir. Bu durum FRP donatılı betonarme yapılarda gevrek bir kırılma şeklinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte CFRP donatıları genellikle GFRP donatılarına göre daha yüksek elastisite modülüne ve çekme dayanımına sahiptirler. Normal çelik donatılar ise FRP donatılara göre daha yüksek elastisite modülüne sahiptirler.

Çizelge 3.2’de ACI 440.1R-06’da verilen en yaygın donatı çubuklarının çekme etkisi altındaki özellikleri verilmiştir.



Şekil 3.2. FRP ve çelik donatıların gerilme şekil değiştirme ilişkisi (Abdalla 2002)

Çizelge 3.2. FRP donatı çubuklarının tipik çekme özellikleri (ACI 440.1R-06, 2006-Fico 2006)

	Çelik	GFRP	CFRP	AFRP
Akma gerilmesi, MPa	276-517	-	-	-
Çekme dayanımı, MPa	483-690	483-1600	600-3690	1720-2540
Elastisite Modülü, MPa	200	35-51	120-580	41-125
Akma şekil değiştirme, %	0.14-0.25	-	-	-
Kopma şekil değiştirme, %	6.0-12.0	1.2-3.1	0.5-1.7	1.9-4.4

FRP donatılarının, betonun içinde donatı olarak kullanılabilirliğindeki en kritik sorunlardan biri de aderans (kenetlenme) kapasitesidir. Nervürlü çelik donatılarını kendisini çevreleyen betonla mükemmel bir aderansa sahip olmasına karşılık düz bir FRP donatısı böyle bir aderans kapasitesine sahip değildir. GFRP donatı çubuklarının

aderans kapasitelerinin, çelik donatı çubuklarına göre daha düşük olduğu yapılan çalışmalarda ortaya çıkmıştır (Yavuz 2011).

FRP ve beton arasındaki aderans dayanımı, FRP çubuklarının imalat yöntemine, mekanik özelliklerine ve yüzey karakteristiklerine bağlıdır. Donatı çubuklarının, kenetlenme kapasitesini arttırmak için genellikle kullanılan bir teknik “kumla kaplama”dır. Bu durumda, kum kaplama yüzeyi çelik çubuklardaki nervürler gibi davranış göstermektedir (ACI 440.1R-06, 2006).

FRP çubuklarının boyuna ısı genleşme katsayısını lif tipleri, enine ısı genleşme katsayısını ise reçine belirlemektedir. Çizelge 3.3’de lif hacim oranı %50-70 arasında değişen kompozit çubukların  $\alpha_1$  boyuna ve  $\alpha_t$  enine yönlerdeki ısı genleşme katsayılarının tipik değerleri görülmektedir (Yavuz 2011).

**Çizelge 3.3.** FRP donatı çubuklarının ısı genleşme katsayıları (Fico 2006)

Çubuk Tipi	$\alpha_1(10^{-60}C^{-1})$	$\alpha_t(10^{-60}C^{-1})$
AFRP	-6.0~2.0	60.0~80.0
CFRP	-2.0~0.0	23.0~32.0
GFRP	6.0~10.0	21.0~23.0

## BÖLÜM IV

### FRP DONATILI BETONARME KIRIŞLERİN EĞİLME ETKİSİ ALTINDAKİ ANALİZİ

FRP çubukların mekanik özelliklerinin çelik çubuklara göre farklı olması nedeniyle FRP donatılı betonarme elemanlar normal çelik donatılı elemanlara göre farklı bir davranış göstermektedirler. FRP çubuklarının çeliğe göre daha düşük elastisite modülüne sahip olmasından dolayı bu malzemelerin kullanıldığı betonarme elemanlarda normal çelik donatılı elemanlara göre daha büyük çatlak genişlikleri ve daha büyük sehimler oluşmaktadır. Özellikle FRP donatılı betonarme kirişlerin rijitliklerinde çatlamalardan sonra önemli azalmalar olmakta ve bu durum bu elemanlarda kullanılabilir yük düzeyinde bile oldukça büyük deplasmanlar oluşmasına neden olmaktadır. Bununla birlikte FRP donatıların çekme dayanımının çeliğe göre daha yüksek olması nedeniyle FRP donatılı betonarme elemanlar çelik donatılı elemanlara göre daha yüksek dayanıma sahiptirler. Ancak gerek betonun, gerekse FRP donatısının gevrek bir kırılma davranışına sahip olmasından dolayı FRP donatılı betonarme elemanlar uygulanan yükler nedeniyle gevrek bir kırılma davranışı sergilemektedirler. Kırılma ya beton ezilmesi ya da FRP donatısının kopması neticesinde olmaktadır. FRP donatısı içeren betonarme kirişlerin tasarımında kullanılabilirlik şartlarının sağlanmasının belirleyici parametre olması nedeniyle bu elemanlarda oluşacak deplasmanların ve bu deplasmanlar üzerine etki eden parametrelerin belirlenmesi oldukça önemli olmaktadır. Bununla birlikte gevrek bir kırılma davranışı gösteren bu kirişlerin, taşıma gücü değerlerine etki eden parametrelerin belirlenmesi de oldukça önemli olmaktadır.

Bu bölümde ilk etapta bu çalışma kapsamında FRP donatılı betonarme kirişlerin eğilme analizi için kullanılan ve Kara ve Ashour (2012) tarafından geliştirilen yöntem kısaca tanıtılmıştır. Çalışma kapsamında belirtilen yönteme dayandırılarak geliştirilen program aracılığı ile birçok örnek çözülerek farklı parametrik değişkenlerin gerek FRP donatılı betonarme kirişlerde oluşan deplasmanlar üzerine olan etkisi, gerekse bu elemanların taşıma gücüne olan etkisi ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir.

Bu bölümde ayrıca FRP donatılı betonarme kirişlerin taşıma gücü değeri için ACI tarafından geliştirilen yöntemde de yer verilmiştir. ACI tarafından elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılmaları da yapılmıştır.

Çalışma kapsamında ayrıca Kara ve Ashour (2014) tarafından, FRP ve çelik donatıları içeren hibrit FRP-Çelik donatılı betonarme kirişlerin analizi için geliştirilen yöntem ve bu yöntem dayalı olarak oluşturulan program da bu bölümde açıklanmıştır. Farklı kesit ve donatı oranlarına sahip FRP-Çelik hibrit betonarme kirişler analiz edilerek farklı parametrik değişkenlerin bu kirişlerin davranışları üzerine olan etkisi de irdelenmiştir.

#### **4.1 FRP Donatılı Betonarme Kirişlerin Analizi İçin Kullanılan Yöntemler**

##### **4.1.1 FRP donatılı betonarme kirişlerin moment-eğrilik ilişkisi ve taşıma gücü momentinin elde edilebilmesi için kullanılan yöntem**

Kara ve Ashour (2012) tarafından geliştirilen bu yöntemde FRP donatılı betonarme elemanın kesiti istenilen sayıda kesit eksenine paralel olarak beton şeritlere ayrılmakta ve her bir şeridin ağırlık merkezinde hesaplanan birim deformasyonlar ile beton için seçilen gerilme birim deformasyon ilişkisinden yararlanılarak gerilmeler hesaplanmaktadır. Elemanda oluşan deplasman değerleri ise moment eğrilik ilişkisi kullanılarak hesaplanmaktadır.

##### **4.1.1.1 Beton ve FRP malzemesi için gerilme şekil değiştirme ilişkisi**

Beton ve FRP donatısı için kabul edilen gerilme şekil değiştirme ilişkileri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Bu yöntem malzemeler için farklı modeller kullanılmasına da olanak sağlamaktadır. Basınç etkisi altındaki betona ait gerilme şekil değiştirme ilişkisi CEB modelinde de önerildiği şekilde aşağıda yer alan denklemdeki gibi gözönünde bulundurularak analize dahil edilmiştir.

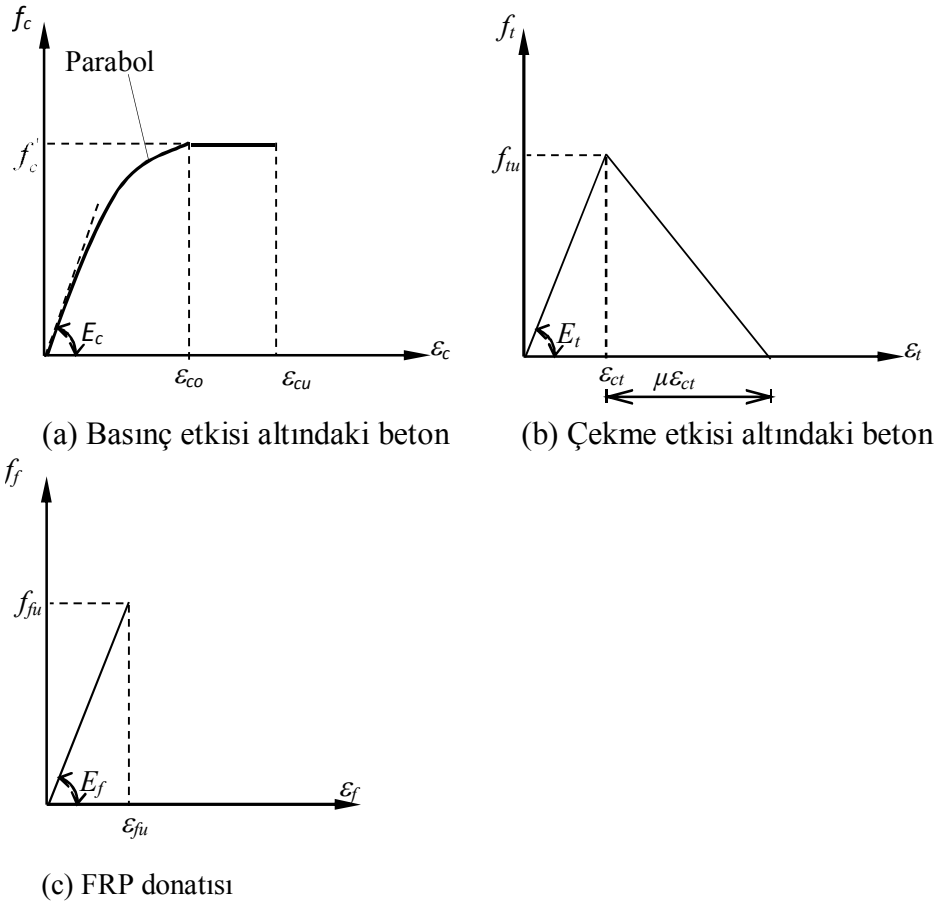
$$f_c = f'_c \left( \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right) \quad \varepsilon_c \leq \varepsilon_{co} \quad (4.1a)$$

$$f_c = f'_c \quad \varepsilon_{co} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \quad (4.1b)$$

Bu denklemdeki  $f_c$  ve  $\varepsilon_c$  basınç etkisi altında betonda oluşan gerilme ve şekil değıştirme değerlerini,  $f'_c$  beton silindir basınç dayanımını,  $\varepsilon_{co}$  ise maksimum gerilmeye karşılık gelen şekil değıştirme değerini ifade etmektedir. Aynı denklemdeki  $E_c$  betonun başlangıç elastisite modülünü,  $\varepsilon_{cu}$  ise betonun basınç etkisi altında kırılma anındaki şekil değıştirme değerini ifade etmektedir. Çekme etkisi altındaki beton için aşağıdaki denklemlerde de ifade edildiği gibi bilineer gerilme şekil değıştirme ilişkisi kabul edilmiştir.

$$f_t = E_t \varepsilon_t \quad \varepsilon_t \leq \varepsilon_{ct} \quad (4.2a)$$

$$f_t = f_{tu} - \frac{f_{tu}}{\mu \varepsilon_{ct}} (\varepsilon_t - \varepsilon_{ct}) \quad \varepsilon_{ct}(1 + \mu) \geq \varepsilon_t > \varepsilon_{ct} \quad (4.2b)$$



**Şekil 4.1.** FRP donatısı ve beton için gerilme şekil değıştirme eğrisi

Bu denklemlerdeki  $f_t$  ve  $\varepsilon_t$  betonda oluşan çekme gerilmesi ve şekil değiştirmesi değerlerini,  $f_{tu}$  ( $= 0.62\sqrt{f'_c}$ ) ve  $\varepsilon_{ct}$  betonun eğilmedeki çekme dayanımı ve bu dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme değerlerini ifade etmektedir. Aynı denklemdeki  $E_t$  çekme etkisi altındaki betonun elastisite modülünü,  $\mu$  ise çekme dayanımındaki azalmayı kontrol eden bir parametreyi ifade etmektedir. Betonarme elemanların rijitliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilen, çatlaklar arasındaki betonun rijitliğe olan katkısını hesaba katan ve çekme rijitleşmesi olarak adlandırılan etki bu model aracılığı ile analizde göz önünde bulundurulabilmektedir.

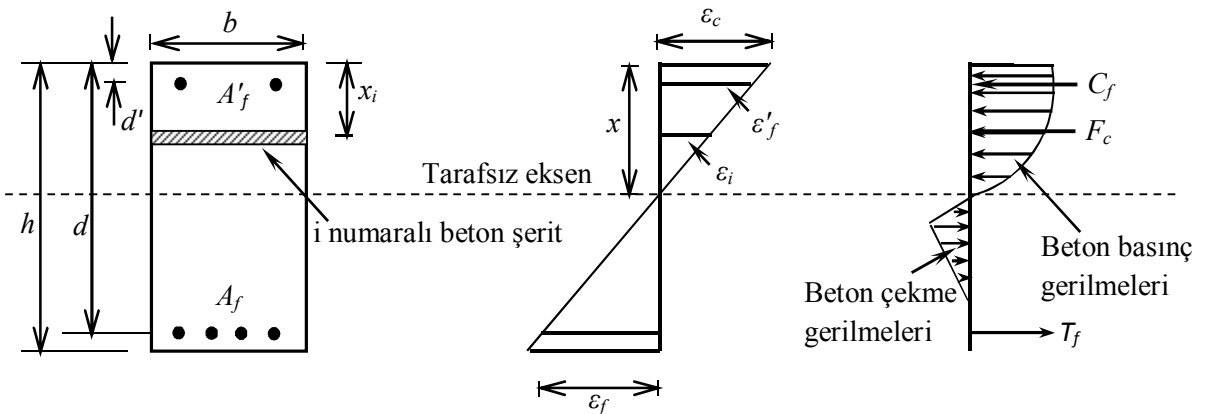
FRP donatıları kırılma konumuna kadar aşağıdaki denklemde de görüldüğü üzere lineer bir gerilme şekil değiştirme davranışı sergilemektedirler.

$$f_f = E_f \varepsilon_f \quad \varepsilon_f \leq \varepsilon_{fu} \quad (4.3)$$

Bu denklemdeki  $f_f$  ve  $\varepsilon_f$  FRP donatısındaki gerilme ve şekil değiştirme değerlerini,  $E_f$  elastisite modülünü,  $f_{fu}$  ve  $\varepsilon_{fu}$  ise FRP donatısının kırılma konumuna ulaştığı andaki gerilme ve şekil değiştirme değerlerini ifade etmektedirler.

#### 4.1.1.2 FRP donatılı betonarme kesit için moment eğrilik ilişkisi ve taşıma gücü momentini

Şekil 4.2’de basınç ve çekme donatısına sahip olan n adet beton şeride bölünmüş FRP donatılı betonarme kesit gösterilmiştir.



(a) FRP donatılı betonarme kesit (b) Şekil değiştirme dağılımı (c) Gerilme dağılımı ve iç kuvvetler

Şekil 4.2. FRP donatılı betonarme bir kesitte oluşan gerilme, şekil değiştirme ve iç kuvvetler

Geliştirilmiş olan analiz yönteminde ilk etapta betonarme elemanın kırılma şekli de göz önünde bulundurularak, basınç etkisi altındaki betonun en uç lifinde veya çekme bölgesindeki FRP donatısında küçük bir şekil değiştirme değeri kabul edilerek hesaplamalara başlanmakta ve kesitte oluşan iç kuvvetlerin dengesine göre tarafsız eksenin yeri belirlenmektedir. Şekil değiştirmeden önce düzlem olan kesitlerin şekil değişiminden sonra da düzlem kalması kabulü ile her beton şeridin ağırlık merkezinde oluşan şekil değiştirmelerin tarafsız eksenden olan uzaklıkla lineer olarak değişimi aşağıdaki denklemdeki gibi ifade edilmektedir (Kara ve Ashour 2012).

$$\varepsilon_i = \frac{x - x_i}{x} \varepsilon_c \quad (4.4)$$

Bu denklemdeki  $\varepsilon_c$  basınç etkisi altındaki betonun en uç lifinde oluşan şekil değiştirme değerini,  $\varepsilon_i$  ise çekme veya basınç bölgesindeki her bir beton şeridin ağırlık merkezindeki şekil değiştirme değerini ifade etmektedir. Çekme ve basınç bölgelerindeki FRP donatılarında oluşan şekil değiştirme değerleri ise aşağıdaki denklemlerdeki gibi elde edilmektedirler.

$$\varepsilon_f' = \frac{x - d'}{x} \varepsilon_c \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_f = \frac{x - d}{x} \varepsilon_c \quad (4.6)$$

Bu denklemlerdeki  $\varepsilon_f$  ve  $\varepsilon_f'$  kesitin alt ve üst bölgelerindeki FRP donatılarında oluşan şekil değiştirmeleri,  $d$  ve  $d'$  çekme ve basınç bölgelerindeki donatıların beton üst yüzüne olan uzaklıkları ifade etmektedir. Her bir beton şeritte ve FRP donatılarında oluşan gerilmeler malzemeler için kabul edilen gerilme şekil değiştirme ilişkileri kullanılarak elde edilmektedir. Kesitte oluşan toplam beton kuvveti çekme ve basınç bölgelerindeki kuvvetlerin katkılarını da içerecek şekilde aşağıdaki denklem aracılığıyla elde edilmektedir.

$$F_c = \sum_{i=1}^n f_{ci} h_i b \quad (4.7)$$

Bu denklemdeki  $f_{ci}$ ,  $i$  numaralı beton şeridin ağırlık merkezinde oluşan çekme veya basınç gerilmesini,  $h_i$ ,  $i$  numaralı beton şeridin kalınlığını,  $b$ , ise kesit genişliğini ifade etmektedir. Çekme ve basınç bölgelerindeki FRP donatılarında oluşan kuvvetler ise

$$T_f = A_f E_f \varepsilon_f \quad (4.8)$$

$$C_f = A'_f E'_f \varepsilon'_f \quad (4.9)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu denklemlerdeki  $A_f$ ,  $E_f$ ,  $A'_f$  ve  $E'_f$  kesitin çekme ve basınç bölgelerindeki FRP donatılarının kesit alanını ve elastisite modüllerini ifade etmektedirler. Çalışma kapsamında geliştirilen yöntem FRP donatısı olarak GFRP, CFRP ve AFRP gibi farklı türden donatıların kullanılmasını sağlayacak şekilde betonarme kirişlerin analizinin yapılmasına olanak sağlamaktadır (Kara ve Ashour 2012). Ayrıca basınç donatısı için çelik donatısı kullanılması durumunda geliştirilen yöntem aracılığı ile analiz yapılabilmektedir. Bu durumda basınç donatısındaki kuvvet hesaplanırken çeliğin elastisite modülü ve akma dayanımı hesaplarda kullanılmalıdır. Kesite etkiyen iç kuvvetlerin dengesi göz önünde bulundurularak aşağıdaki denklem elde edilmektedir.

$$F_c + C_f = T_f \quad (4.10a)$$

$$\sum_{i=1}^n f_{ci} h_i b + A'_f E'_f \varepsilon'_f = A_f E_f \varepsilon_f \quad (4.10b)$$

Bu denklemdeki tarafsız eksen derinliği ikiye bölme yöntemi kullanılarak iteratif yöntemle elde edilmektedir. Bu yöntemde aşağıda verilen yakınsaklık kriteri kullanılmış olup bu şart sağlanınca işlemlere son verilmekte ve tarafsız eksen derinliği elde edilmektedir.

$$\frac{|F_c + T_f + C_f|}{|F_c|} \leq 10^{-8} \quad (4.11)$$

Betonarme elemanda oluşan eğrilik değeri kesitte oluşan şekil değıştirme dağılımlı göz önünde bulundurularak aşağıdaki denklemdeki gibi elde edilmektedir.

$$\varphi = \frac{\varepsilon_c}{x} \quad (4.12)$$

Kesitin taşıma gücü momenti ise herhangi bir yatay eksene göre iç kuvvetlerin momentinin alınması ile elde edilmektedir. Tarafsız eksene göre iç kuvvetlerin momenti alınacak olursa taşıma gücü momenti

$$M_f = \sum_{i=1}^n F_{ci} (x - x_i) + T_f (x - d) + C_f (x - d') \quad (4.13)$$

denklemindeki gibi elde edilmektedir. Bu denklemindeki  $F_{ci}$ ,  $i$  numaralı beton şeridin ağırlık merkezine etkiyen çekme veya basınç kuvvetidir. Geliştirilen yöntemde basınç etkisi altındaki betonun en uç lifindeki (veya çekme bölgesinde bulunan FRP donatısındaki) şekil değıştirme değeri adım adım arttırılmakta ve her bir şekil değıştirme değeri için yukarıda açıklanan iteratif yöntem uygulanarak moment ve eğrilik değeri elde edilmektedir. Basınç etkisi altındaki betonun en uç lifinde oluşan şekil değıştirme değeri betonun kırılma şekil değıştirme değerine ulaşınca bu aşamadaki moment ve eğrilik değeri elde edilerek analiz sonlandırılmaktadır.

#### 4.1.1.3 FRP donatılı kirişte oluşan deplasmanlar

Bu çalışmada göz önüne alınan nümerik yöntemde kirişlerde maksimum momentin olduğu yerdeki eğilme rijitliği  $EI_{eff}$  değeri her bir yük aşamasında moment eğrilik ilişkisinden aşağıdaki denklem ile elde edilmektedir.

$$EI_{eff} = \frac{M}{\varphi} \quad (4.14)$$

Simetrik olarak iki noktasal yük etkisi altındaki basit mesnetli bir kirişin orta noktasındaki deplasman aşağıdaki denklem aracılığı ile

$$\Delta = \frac{(P/2)(3L^2 - 4a^2)}{24EI_{\text{eff}}} \quad (4.15)$$

şeklinde hesaplanabilir. Bu denklemdeki L kiriş açıklığını, a ise yükün uygulandığı noktanın mesnede olan uzaklığını ifade etmektedirler. Açıklık ortasında tekil yüklü kirişlerin orta noktasında oluşan deplasman ise

$$\Delta = \frac{(PL^3)}{48 * EI_{\text{eff}}} \quad (4.16)$$

denklemindeki gibi elde edilebilir.

#### 4.1.2 ACI Yöntemi

##### 4.1.2.1 Taşıma gücü momenti

ACI 440-06 (2006), FRP donatılı bir kirişte donatı oranının dengeli donatı oranından daha fazla olması halinde bu kirişin taşıma gücü momentini 4.18 denklemlerindeki gibi, donatı oranının dengeli donatı oranından daha az olması halinde ise 4.20 denklemlerindeki gibi elde etmektedirler.

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (4.17)$$

$$M_{fu} = \rho_f f_f (1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c}) b d^2 \quad (4.18)$$

$$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \epsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85\beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \epsilon_{cu}} - 0.5 E_f \epsilon_{cu} \leq f_{fu} \quad (4.19)$$

$$M_{fu} = A_f f_{fu} \left( d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (4.20)$$

$$c_b = \left( \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu}} \right) d \quad (4.21)$$

Bu denklemlerdeki  $\rho_f$  donatı oranını,  $f_f$  basınç bölgesindeki betonun kırılma şekil değiştirme değerine ulaştığı anda FRP donatısında oluşan gerilme değerini,  $c_b$  dengeli durumdaki tarafsız eksen derinliğini,  $\beta_1$  beton dayanımı azaltma katsayısını ifade etmektedirler.

#### 4.1.2.2 Etkili atalet momenti

FRP donatılı betonarme kirişlerin etkili atalet momenti için ACI 440-06 (2006) tarafından aşağıdaki denklem önerilmiştir.

$$I_{eff} = \left( \frac{M_{cr}}{M} \right)^m \beta_d I_1 + \left[ 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M} \right)^m \right] I_2 \quad (4.22)$$

$$\beta_d = 0.2 \left( \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right) \quad (4.23)$$

Bu denklemlerdeki  $I_1$  ve  $I_2$  sırası ile kesitin çatlama öncesi ve tamamen çatlama halindeki atalet momenti değerlerini  $M$ , ilgili kesitteki eğilme momentini  $M_{cr}$  ise çatlama anındaki eğilme momentini ifade etmektedir.

#### 4.1.3 Etkili atalet momenti için diğer modeller

ISIS-M03-07 (2007) tarafından FRP donatılı betonarme kirişlerin etkili atalet momenti için aşağıdaki denklem önerilmiştir.

$$I_{\text{eff}} = \left( \frac{I_1 I_2}{I_2 + \left( 1 - 0.5 \left( \frac{M_{\text{cr}}}{M} \right)^2 (I_1 - I_2) \right)} \right) \quad (4.24)$$

Bischoff (2005) ise FRP donatılı kirişte çekme rijitleşmesinin eğrilik üzerine olan etkisini göz önünde bulundurarak etkili atalet momenti için aşağıdaki denklemi önermişlerdir.

$$I_{\text{eff}} = \left( \frac{I_2}{1 - \left( 1 - \frac{I_2}{I_1} \right) \left( \frac{M_{\text{cr}}}{M} \right)^2} \right) \quad (4.25)$$

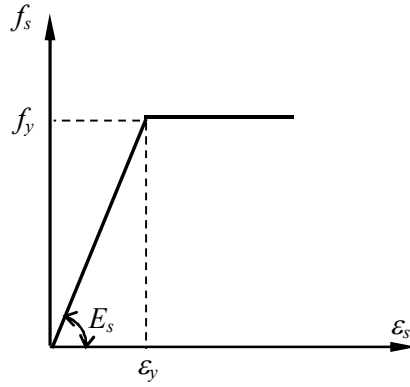
#### 4.2 Hibrit FRP-Çelik Donatılı Betonarme Kirişler

FRP donatısının kırılma anına kadar lineer bir gerilme-şekil değiştirme ilişkisine sahip olması nedeniyle bu tür donatılar içeren betonarme kirişler, uygulanan yüklerin etkisi altında gevrek bir kırılma davranışı göstermektedir. Beton, FRP donatısına göre görece olarak, sünek bir davranış göstermesi nedeniyle tasarım yönetmelikleri FRP donatılı kirişlerde denge üstü kırılma olacak şekilde bir tasarım yapılmasını öngörmektedirler. Bununla birlikte FRP donatısının çeliğe göre daha düşük elastisite modülüne sahip olmasından dolayı FRP donatılı betonarme kirişlerde, çelik donatılı kirişlere göre daha geniş çatlaklar ve daha büyük deplasmanlar oluşmaktadır. Sonuç olarak FRP donatılı kirişlerin tasarımında kullanılabilirlik şartları önemli tasarım kriterlerinden biri olmaktadır. FRP donatılı kirişlerde ortaya çıkan bu tür problemlerin çözümü için en uygun yöntem, FRP ve çelik donatıların kesit içerisinde birlikte kullanılmasıyla oluşturulan betonarme elemanlardır. Bu durumda en uygun çözüm yöntemi FRP donatısının uygun beton örtü tabakası sağlanacak şekilde çekme yüzüne yakın, çelik donatının da kesit içerisinde daha içte kalacak şekilde yerleştirilmesidir. Bu şekilde yapılan bir tasarımla çelik, dayanıma daha az katkıda bulunacak fakat elemanın rijitliğini ve sünekliğini arttıracaktır. Bununla birlikte bu elemanlarda çelik donatı kullanılmasıyla, oluşacak çatlak genişliği, çatlak boyu azalacaktır. Sonuç olarak çelik ve

FRP donatısının betonarme bir eleman içerisinde birlikte kullanılması hem kullanılabilirlik şartlarına olumlu yönde katkı sağlayacak hem de elemanın sünekliğini arttıracaktır. Bu çalışma kapsamında hibrit FRP-çelik betonarme kirişlerin eğilme etkisi altındaki analizi, Kara ve Ashour (2014) tarafından geliştirilen program aracılığı ile irdelenmiştir. Bu yöntem aşağıdaki bölümde kısaca açıklanmıştır.

#### 4.2.1 Analizde kullanılan yöntem

Çalışmada analizde kullanılacak olan ve Kara ve Ashour (2014) tarafından geliştirilen yöntem, bir önceki bölümde ayrıntılı bir şekilde irdelenen FRP donatılı betonarme kirişlerin analizini içeren yöntemin genişletilmiş halidir. Önceki bölümde açıklanan bu yöntem, çelik donatıları da içerecek şekilde modifiye edilerek yeniden düzenlenmiştir. Hibrit betonarme elemanların tasarımı için geliştirilen yöntemde bir önceki yöntemde olduğu gibi beton ve FRP için benzer malzeme modelleri kullanılmıştır (Şekil 4.1). Çelik için ise Şekil 4.3’de görüldüğü gibi elasto-plastik malzeme özelliği göz önünde bulundurularak analize dahil edilmiştir.



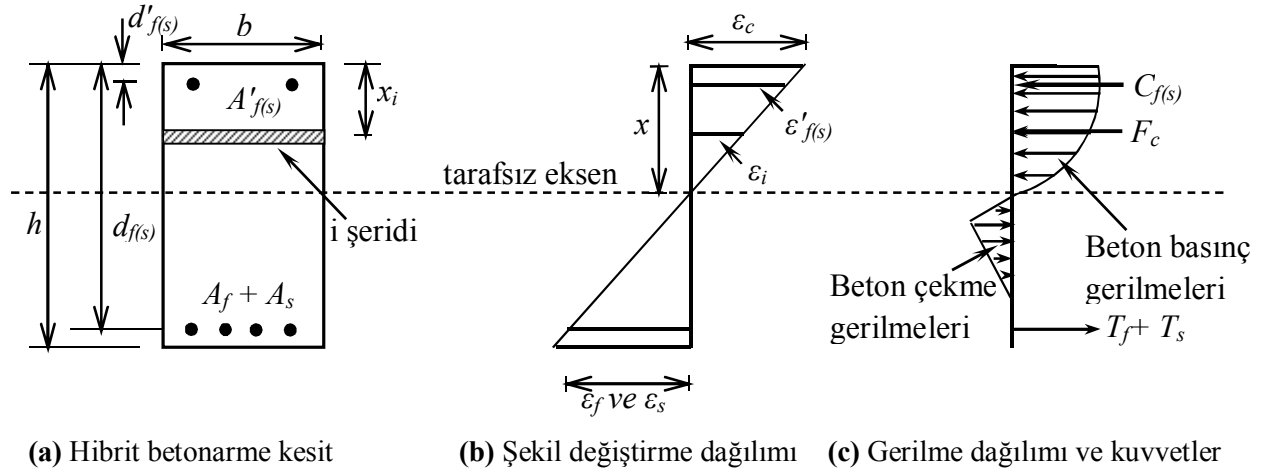
Şekil 4.3. Çelik için analizde kullanılan gerilme şekil değiştirme ilişkisi

#### 4.3 Hibrit Betonarme Kesit İçin Moment Eğrilik İlişkisi ve Taşıma Gücü Momenti

Şekil 4.4’de gerek çekme gerekse basınç FRP ve/veya çekme donatılarına sahip olan ve n adet beton şeride bölünmüş hibrit FRP-çelik betonarme kesit görülmektedir.

Bu yöntemde basınç etkisi altındaki betonun en dış lifinde küçük bir şekil değiştirme değeri kabul edilerek hesaplamalara başlanmakta ve kesitte oluşan iç kuvvetlerin dengesine göre tarafsız eksenin yeri belirlenmektedir. Bir önceki FRP donatılı

betonarme kirişler için geliştirilen yöntemde ek olarak çelik donatılar ve bu donatıların oluşturduğu gerilme ve kuvvet değeri analize dahil edilmektedir. Şekil değiştirmeden önce düzlem olan kesitlerin şekil değişiminden sonra da düzlem kalması kabulü ile her beton şeridin ağırlık merkezinde oluşan şekil değiştirme değeri tarafsız eksen olan uzaklıkla lineer olarak değişmekte ve bir önceki yöntemde yer alan (4.4) denklemindeki gibi ifade edilmektedir.



**Şekil 4.4.** Hibrit betonarme bir kesitte oluşan gerilme, şekil değıştirme ve iç kuvvetler

Çekme ve basınç bölgelerindeki FRP ve çelik donatılarda oluşan şekil değıştirme değeri bir önceki yöntemde benzer şekilde

$$\varepsilon'_f = \frac{x - d'_f}{x} \varepsilon_c \quad (4.26)$$

$$\varepsilon_f = \frac{x - d_f}{x} \varepsilon_c \quad (4.27)$$

$$\varepsilon_s = \frac{x - d_s}{x} \varepsilon_c \quad (4.28)$$

$$\varepsilon'_s = \frac{x - d'_s}{x} \varepsilon_c \quad (4.29)$$

denklemlerindeki gibi elde edilmişlerdir. Bu denklemdeki  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_s'$  değerleri çekme ve basınç bölgesindeki çelikte oluşan şekil değiştirmeler,  $d_s$  ve  $d_s'$  ise çekme ve basınç bölgelerine yerleştirilen çelik donatılara ait donatı ile beton en dış yüzü arasındaki mesafedir. Her bir beton şeritte FRP ve çelik donatılarda oluşan gerilmeler malzemeler için kullanılan birim şekil değiştirmeler kullanılarak elde edilmektedir. Kesitte oluşan toplam beton kuvveti denklem (4.7) deki gibi hesaplanmaktadır. Çekme ve/veya basınç bölgelerindeki FRP ve çelik donatılarda oluşan kuvvetler ise

$$T_f = A_f E_f \varepsilon_f \quad \text{ve} \quad T_s = A_s E_s \varepsilon_s \quad (4.30)$$

$$C_f = A_f' E_f' \varepsilon_f' \quad \text{ve/veya} \quad C_s = A_s' E_s' \varepsilon_s' \quad (4.31)$$

şeklinde elde edilmektedirler. Bu yöntem, basınç veya çekme bölgelerinde FRP veya çelik donatının bulunup bulunmamasına göre genelleştirilmiştir. Bu denklemlerdeki  $T_f$ ,  $A_f$  ve  $E_f$ , çekme bölgesindeki FRP donatısına ait kuvvet, alan ve elastisite modülü değerlerini  $C_f$ ,  $A_f'$  ve  $E_f'$  ise basınç bölgesindeki FRP donatısına ait kuvvet, alan ve elastisite modülü değerlerini ifade etmektedir. Aynı denklemdeki  $T_s$ ,  $A_s$  ve  $E_s$  çekme bölgesindeki çelik donatıya ait kuvvet, alan ve elastisite modülü değerlerini;  $C_s$ ,  $A_s'$  ve  $E_s'$  basınç bölgesindeki çelik donatıya ait kuvvet, alan ve elastisite modülü değerlerini göstermektedirler. Kesite etkiyen iç kuvvetlerin dengesi göz önünde bulundurularak aşağıdaki denklem elde edilmiştir.

$$F_c + C_{f(s)} = T_f + T_s \quad (4.32a)$$

$$\sum_{i=1}^n f_{ci} h_i b + A_{f(s)}' E_{f(s)}' \varepsilon_{f(s)}' = A_f E_f \varepsilon_f + A_s E_s \varepsilon_s \quad (4.32b)$$

Bu denklemlerdeki  $C_{f(s)}$  basınç bölgesindeki FRP veya çelik donatıya ait kuvveti ifade etmektedirler. Hibrit betonarme elemanda oluşan eğrilik değeri kesitte oluşan şekil değiştirme dağılımı göz önünde bulundurularak bir önceki yöntemde olduğu gibi denklem (4.12)'deki gibi elde edilmektedir.

$$\varphi = \frac{\varepsilon_c}{x} \quad (4.12)$$

Kesitin taşıma gücü momenti ise herhangi bir yatay eksene göre iç kuvvetlerin momentinin alınması ile elde edilmektedir. Tarafsız eksene göre iç kuvvetlerin momenti alınacak olursa taşıma gücü momenti

$$M_f = \sum_{i=1}^n F_{ci} (x - x_i) + T_f (x - d_f) + T_s (x - d_s) + C_{f(s)} (x - d'_{f(s)}) \quad (4.33)$$

şeklinde elde edilmektedir. Bu yöntemde basınç etkisi altındaki betonun en uç lifindeki şekil değiştirme değerleri adım adım arttırılmakta ve her bir şekil değiştirme değeri için yukarıda açıklanan iteratif yöntem uygulanarak moment ve eğrilik değerleri elde edilmektedir. Basınç etkisi altındaki betonun en uç lifinde oluşan şekil değiştirme değeri betonun kırılma şekil değiştirme değerine ulaşıncaya bu aşamadaki moment ve eğrilik değerleri elde edilerek analiz sonlandırılmaktadır. Bu yöntemle dayandırılarak Kara ve Ashour tarafından geliştirilen bilgisayar programı aracılığı ile hibrit FRP-çelik betonarme kirişler analiz edilmiştir.

## BÖLÜM V

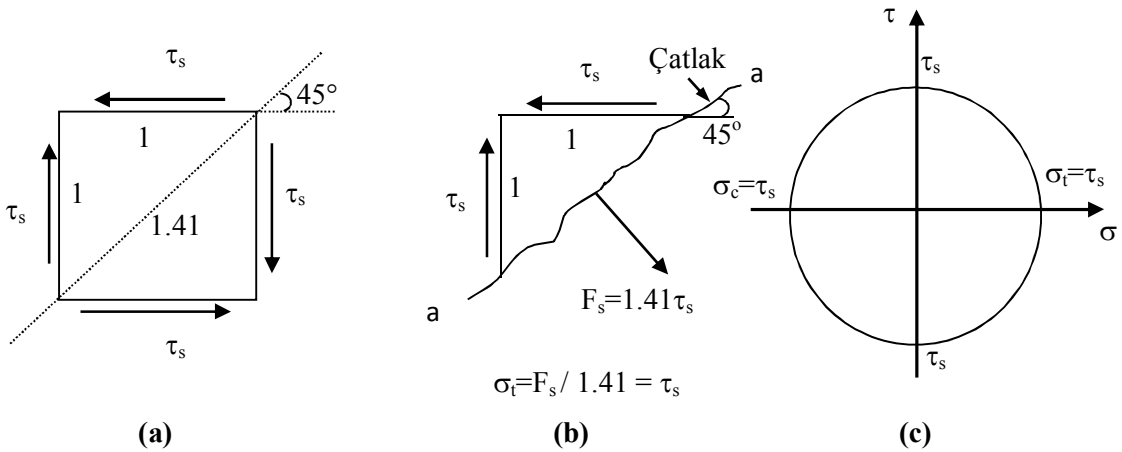
### FRP DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN KESME ETKİSİ ALTINDAKİ DAYANIMI VE ANALİZİ

Bu bölümde FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme davranışına geçmeden önce geleneksel çelik donatılı betonarme kirişlerin kesme davranışı ile ilgili bilgilere yer verilecektir.

#### 5.1 Çelik Donatılı Betonarme Kirişlerin Kesme Davranışı

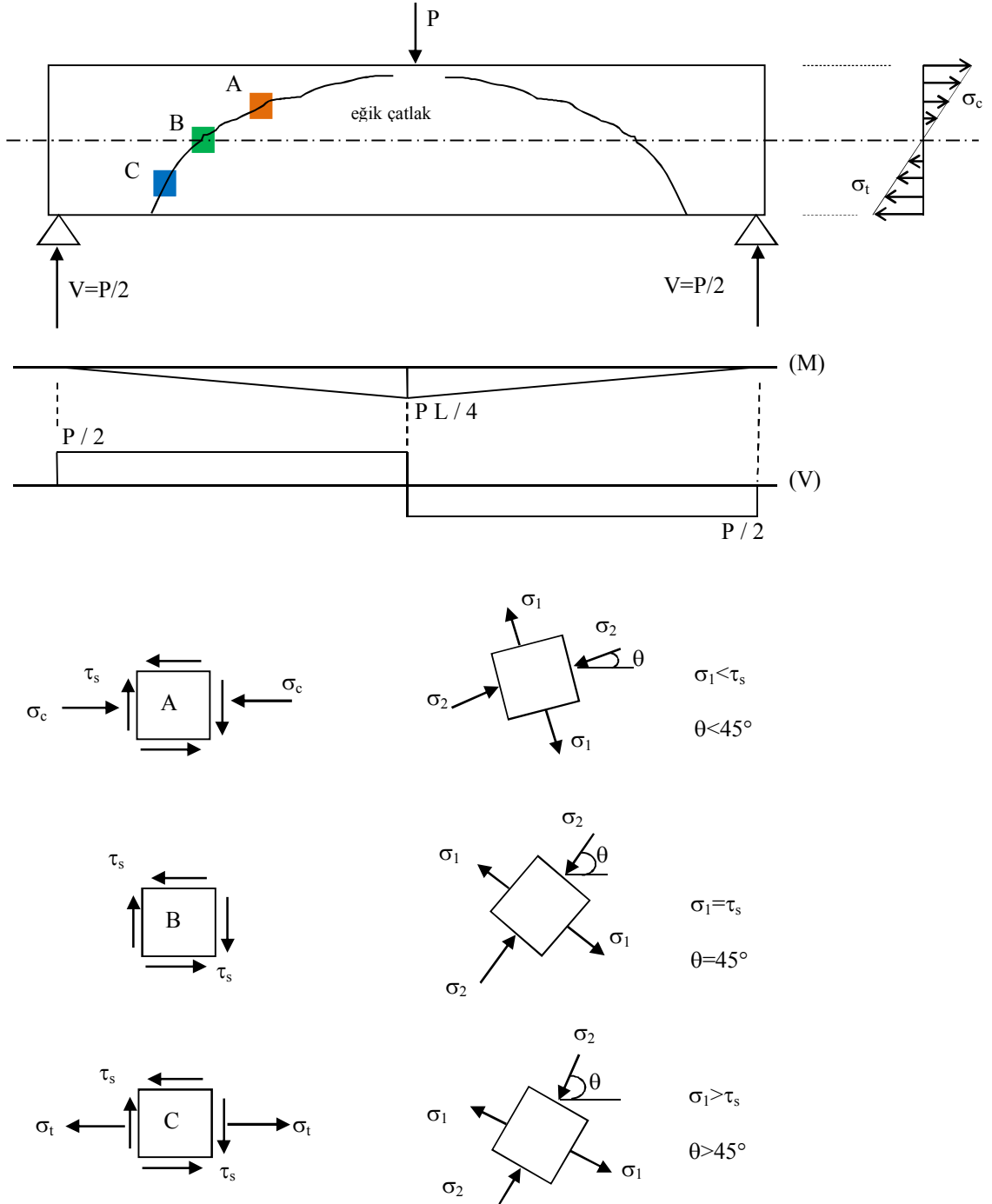
Betonun kesme dayanımının yüksek olması nedeniyle betonarme elemanlarda kesme kırılmasına pek rastlanmaz. Ancak, kesme ve normal gerilmeler nedeniyle oluşan asal çekme gerilmeleri betonun çekme dayanımının düşük olmasından dolayı önemli sorunlar doğurur (Ersoy ve Özcebe 2012). Betonun çekme dayanımı kesme ve basınç dayanımından daha düşük olduğundan basit kesme durumunda dahi kırılma asal çekme gerilmeleri nedeni ile oluşmaktadır.

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi basit kesme durumunda asal basınç ve çekme gerilmeleri kesme gerilmesine eşit olacağından kırılma daha düşük dayanım olan çekme gerilmesi nedeni ile oluşacaktır (Ersoy ve Özcebe 2012).



Şekil 5.1. Basit kesme etkisi altında oluşan asal gerilmeler

Kırılma kesme gerilmelerinin etkidiği yüzeye  $45^\circ$  lik açı yapan bir düzlem üzerinde etkiyen asal çekme gerilmelerine dik yönde oluşan ve eğik çatlak olarak adlandırılan bir çatlakta meydana gelecektir. Literatürde bu çatlak eğik çatlak, bu çatlağa neden olan asal gerilme de eğik çekme olarak adlandırılmaktadır. Asal çekme gerilmeleri nedeniyle oluşan bu tür eğik çatlaklar son derece tehlikelidir ve gevrek kırılmaya neden olabilmektedir (Ersoy ve Özcebe 2012).



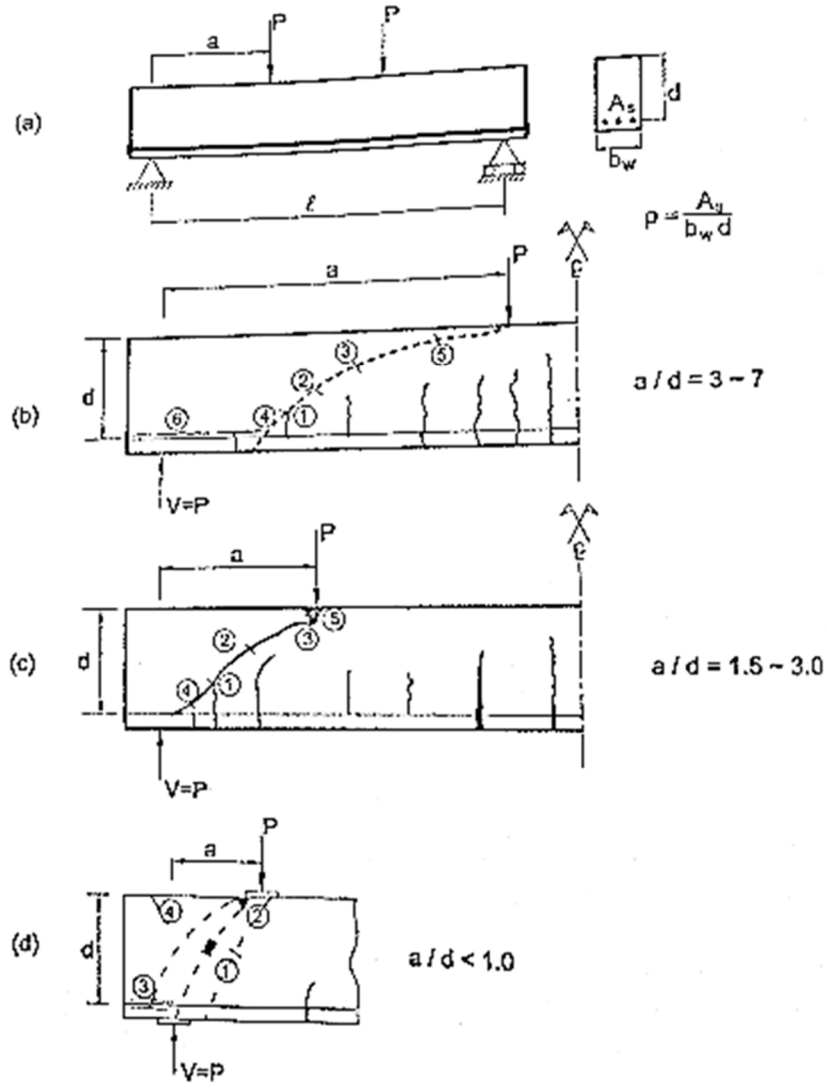
Şekil 5.2. Ortasından tekil yüklü basit mesnetli kirişte oluşan asal gerilmelerin yönü

Kesme ile birlikte normal gerilmelerin etkidiği durumlarda eğik çatlağın eğimi asal çekme gerilmelerinin yönüne bağlı olarak değişmektedir. Şekil 5.2’de simetrik olarak yüklenmiş bir betonarme kiriş gösterilmiş olup bu kirişte tarafsız eksen, tarafsız eksenin üstü ve tarafsız eksenin altında kalan ve A, B, C olarak işaretlenen üç elemana etkiyen gerilmeler ile bu gerilmelerin oluşturduğu asal çekme gerilmeleri gösterilmiştir. Şekilden görüldüğu gibi tarafsız eksen yüzeyinde normal gerilmeler sıfır olduğundan çatlama kiriş eksenine 45° lik bir açıda oluşmaktadır. Bu kesitte normal gerilmelerin bulunması hem asal çekme gerilmelerinin büyüklüğünü hem de eğimini etkilemektedir. Çatlamanın asal çekme gerilmelerine dik yönde olmasından dolayı, Şekil 5.2’den de görüldüğu gibi kiriş alt yüzünden üst yüzüne doğru uzayan çatlağın eğimi azalmaktadır. Bu bilgilerden betonarmede büyük sorunlara yol açan ve gevrek bir kırılmaya neden olan eğik çatlakların kesme gerilmelerinden değil de asal çekme gerilmelerinden kaynaklandığı görülmektedir (Ersoy ve Özcebe 2012).

### **5.1.1 Kesme donatısı bulunmayan elemanların davranışı**

Günümüzde yönetmeliklerin büyük bir çoğunluğunda kesme gerilmeleri ne kadar küçük olursa olsun kesme donatısının bulundurulması zorunluluğu vardır. Kesme donatılı bir kirişin davranışının anlaşılabilmesi için kesme donatısız bir kirişin davranışının belirtilmesinde fayda vardır. Kesme donatısı bulunmayan bir kirişin davranışı genellikle mesnet ortasına göre simetrik olarak etkiyen ve büyüklüğu eşit iki tekil yük altında incelenmektedir (Şekil 5.3). Kirişte yalnızca alt yüzde mesnetten mesnete uzanan ve orada kenetlenmesi sağlanan bir çekme donatısı olduğu var sayılmaktadır. Bu kirişlerde kesme açıklığı mesnetle yük arasındaki uzaklıktır ve genelde  $a$  olarak gösterilmektedir. Bu kirişlerde kesme açıklığının faydalı yüksekliğe olan oranı ( $a/d$ ) nin davranışı etkileyen en önemli parametrelerden biri olduğu yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiştir (Ersoy ve Özcebe 2012).

$a/d$ ’nin çok büyük olduğu durumlarda ( $a/d > 7$ ) kiriş eğilmedeki taşıma gücüne erişmektedir. Bu kirişte kesme açıklığının büyük olması nedeniyle, kirişi eğilme kapasitesine ulaşıran kesme kuvveti düşük düzeyde kalacağından kırılmada kesme kuvvetinin etkisi olmayacaktır.



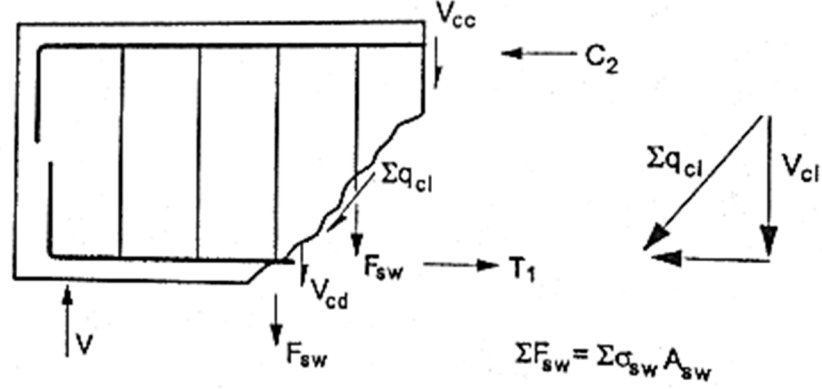
**Şekil 5.3.** Betonarme kirişte eğik çatlakların oluşumu (Ersoy ve Özcebe 2012)

Şekil 5.3'den de görüldüğü üzere  $a/d$  oranı 3 ile 7 arasında ise eğik çekme kırılması ya da kesme aderans kırılması,  $a/d$  oranının 1 ile 3 arasında olması durumunda kesme-ezilme kırılması,  $a/d$  1'den küçükse gergili kemer kırılması oluşmaktadır. Bu tür kırılma durumlarında çatlakların gelişim ve oluşum sırası Şekil 5.4'de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Çekme donatısı bulunmayan ve eğik çatlakın oluştuğu bir kirişteki kesme kuvveti Şekil 5.4' de gösterildiği gibi  $V$ , üç ayrı kuvvetle dengelenmektedir. Bu üç kuvvet;

1)  $V_{cc}$ : Çatlamamış basınç bölgesindeki beton tarafından taşınan kesme kuvveti. Betonun bu kısmı kesme kuvvetini karşılamaya %20-40 civarında katkıda bulunmaktadır.



$V_{ci}$ 'nin yanısıra kesme donatısı da kesme dayanımına katkıda bulunacaktır. Eğik çatlak oluşuktan sonra kesme dayanımına katkıda bulunan iç kuvvetler Şekil 5.5'de gösterilmiştir.



**Şekil 5.5.** Kesme donatılı bir kirişte kesme kuvvetlerinin karşılanması  
(Ersoy ve Özcebe 2012)

Bu şekilden aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$V = V_{cc} + V_{cd} + V_{ci} + \sum F_{sw} \quad (5.1)$$

$\sum F_{sw}$ , eğik çatlağın kestiği etriyelerdeki çekme kuvvetlerinin toplamıdır.

$$\sum F_{sw} = \sum A_{sw} \cdot \sigma_{sw} \quad (5.2)$$

Sınır durumunda

$$\sigma_{sw} = f_{ywk}$$

olmaktadır.

$$\sum F_{sw} = \sum A_{sw} \cdot f_{ywk} \quad (5.3)$$

$V_{cc}$ ,  $V_{cd}$  ve  $V_{ci}$  için ayrı ayrı değerler saptamak pek mümkün değildir. Bu nedenle bu üç bileşke toplanarak,  $V_c$  olarak hesaba katılır.

$$V_c = V_{cc} + V_{cd} + V_{ci} \quad (5.4)$$

Denklem (5.1) temel alınarak, kesme dayanımı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V_r = \sum F_{sw} + V_c \quad (5.5)$$

## 5.2 FRP Donatılı Betonarme Kirişlerin Kesme Dayanımı

FRP ve çelik donatıların özellikle elastisite modüllerinin birbirinden farklı olması nedeniyle FRP donatılı betonarme elemanların kesme dayanımları çelik donatılı elemanlara göre farklılık göstermektedir. Birçok uluslararası yönetmelikte FRP donatılı betonarme elemanların kesme tasarımı, çelik ve FRP donatılarının mekanik özelliklerindeki farklılıklar hesaba katılarak çelik donatılı kirişlerin tasarımı için önerilen modellere dayandırılmıştır. Önerilen yöntemlerde betonarme kirişlerin kesme dayanımı, betonun kesme dayanımına olan katkısı ile kayma donatılarının kesme dayanımına olan katkılarının toplamı olacak şekilde hesaplanmaktadır. Betonun kesme dayanımına olan katkısı genellikle yarı ampirik denklemler kullanılarak hesaplanmakta ve bu katkı çelik donatılı betonarme elemanlar için kabul edilen farklı kesme dayanım mekanizmalarının toplamından oluşmaktadır. ACI 440.1R-06 tarafından tanımlanan kesme dayanım mekanizmaları daha önce de ifade edildiği gibi;

- a) Basınç bölgesindeki çatlamamış betonun kesme dayanımı,
- b) Boyuna donatıların kaldıraç etkisi nedeniyle oluşan kesme dayanımı,
- c) Kesme çatlakları boyunca agregaların birbirine kenetlenmesi sonucu oluşan kesme dayanımı,
- d) Kemer etkisi,
- e) Betonun çekme dayanımının kesme dayanımına olan katkısı şeklinde ifade edilmektedir.

Kesme çatlakları boyunca agregaların birbirlerine kenetlenmesi nedeniyle oluşan dayanım daha çok sürtünme etkisi nedeniyle oluşan dayanım gibi iki çatlak yüzeyinin birbirlerine göre rölatif olarak hareket etmesinden oluşmaktadır. Çatlak genişliği çok fazla olmadığı sürece bu dayanım oldukça önemli olmaktadır. Kaldıraç etkisi nedeniyle oluşan dayanım, boyuna donatıların çatlak boyunca kesmeden dolayı oluşan deplasmanlara karşı direnç göstermesidir. Kemer etkisi, kesme açıklığının etkili derinliğe oranı olan  $a/d$  değerinin genellikle 2.5'dan küçük olduğu elemanlarda oluşmaktadır. Uygulanan düşey yükler bu elemanlarda kemer etkisiyle mesnede iletilmektedir. Betonarme elemanda ilk çatlama olduğu anda çatlak genişliği çok fazla olmadığından dolayı küçük beton parçaları çatlak boyunca bir köprü oluşturmakta ve çekme kuvvetlerinin bu çatlak boyunca iletilmesini sağlamaktadır. Çatlak genişliğinin daha çok 0.05 ile 0.15 mm arasında olduğu durumlarda çekme bölgesindeki betonun dayanıma olan katkısı olmaktadır.

FRP donatısının çelik donatıya göre daha düşük elastisite modülüne sahip olmasından dolayı FRP donatılı elemanlarda, uygulanan yükler etkisi altında çelik donatılı elemanlara göre daha geniş ve derin çatlaklar oluşmaktadır. Bu elemanlarda daha derin çatlakların oluşması, basınç bölgesindeki çatlamamış betonun kesme dayanımına olan katkısını azaltmaktadır. Ayrıca bu elemanlarda daha geniş çatlakların oluşması, çatlak yüzeyindeki agregaların birbirlerine kenetlenmesi ve çekme bölgesindeki betonun çekme dayanımı nedeniyle oluşan kesme dayanımı katkılarını azaltmaktadır. FRP donatısının eksenine dik yöndeki dayanımının çelik donatıya göre daha az olması ve FRP donatılı elemanlarda daha geniş çatlakların oluşması bu elemanlarda kaldıraç etkisi nedeniyle oluşan kesme dayanımı katkısının çelik donatılı elemanlara göre daha az olmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak FRP donatılı elemanlarda betonun kesme dayanımına olan katkısı çelik donatılı elemanlara göre daha az olmaktadır.

Kesme donatısı olarak adlandırılan etriyelerin kesme dayanımına olan katkısı kafes giriş analogisine dayandırılarak hesaplanmaktadır. Shehata (1997) yapmış olduğu çalışmada FRP donatısının etriye olarak kullanılması halinde dayanımında önemli derecede azalma olduğunu belirlemiş ve bu donatıların kırılmasının daha çok eğilme bölgelerinde meydana geldiğini gözlemlemiştir. Bu nedenle FRP donatısının kesme donatısı olarak kullanılması durumunda daha büyük bir azaltma katsayısı kullanılması gerektiği ifade edilmiştir (Shehata 1997).

### 5.2.1 FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı için farklı yönetmelikler tarafından önerilen denklemler

FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı betonun kesme dayanımına olan katkısı ile FRP donatısının kesme dayanımına olan katkısının toplamı olacak şekilde hesaplanmaktadır. Kesme dayanımları için literatürde farklı ülke yönetmelikleri tarafından birçok model önerilmiştir. Bu ülke yönetmeliklerinde, FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme tasarımı, çelik ve FRP donatılarının mekanik özelliklerindeki farklılıklar hesaba katılarak çelik donatılı kirişlerin kesme tasarımı için önerilen modellere dayandırılmıştır.

Literatürde kullanılan ve bu çalışma kapsamında da kullanılacak olan yönetmelikler şunlardır;

- a) ACI 440.1R-06 Yönetmeliği
- b) CAN/CSA S806-02 Yönetmeliği
- c) ISIS-M03-07 Yönetmeliği
- d) BISE-99 Yönetmeliği
- e) JSCE-97 Yönetmeliği

#### 5.2.1.1 ACI 440.1R-06 Yönetmeliği

ACI 440.1R-06, eğilme donatısı olarak FRP donatısı içeren elemanlarda betonun kesme dayanımına olan katkısı için aşağıdaki denklemi önermişlerdir.

$$V_c = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c b_w c} \quad (5.6)$$

Bu denklemdeki  $f'_c$ , betonun basınç dayanımını,  $b_w$  kesit genişliğini,  $c$  çatlama kesitin tarafsız eksen derinliğini ifade etmekte olup bu değer  $c = kd$  şeklinde hesaplanmakta ve  $k$  değeri,

$$k = \sqrt{2\rho_f n + (\rho_f n)^2} - \rho_f n \quad (5.7)$$

şeklinde elde edilmektedir. Bu denklemde  $\rho_{ft}$  kesitteki FRP donatısı oranını, n ise FRP donatısı elastisite modülünün çeliğin elastisite modülüne olan oranını ifade etmektedir. ACI 440.1R-06 da FRP etriyelerinin kesme dayanımına olan katkısı ise aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$V_s = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s} \quad (5.8)$$

Bu denklemdeki d; etkili kesit yüksekliğini,  $A_{fv}$ , etriyelerin kesit alanını, s, etriye aralığını,  $f_{fv}$  ise etriyelerin kırılma anındaki gerilme değerini ifade etmekte olup bu değerler

$$f_{fv} = 0.004.E_{fv} \leq f_{fb} \quad (5.9)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu denklemdeki  $f_{fb}$  eğilme kapasitesi değeri aşağıdaki denklemden yararlanılarak hesaplanmaktadır.

$$f_{fb} = \left(0.05 \frac{r_b}{d_b} + 0.11\right) f_{fuv} \quad ve \quad 0.25 \leq \frac{f_{fb}}{f_{fuv}} \leq 1.0 \quad (5.10)$$

### 5.2.1.2 CAN/CSA S806-02 Yönetmeliği

Bu yönetmelikte betonun kesme dayanımına olan katkısı aşağıdaki denklemlerdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$V_c = 0.035\lambda\phi_c \left(f'_c \rho_{fl} E_{fl} \frac{V_f}{M_f} d\right)^{1/3} b_w d \quad (5.11a)$$

$$0.1\lambda\Phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \leq V_c \leq 0.2\lambda\Phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \quad (5.11b)$$

$$\frac{V_f}{M_f} d \leq 1.0 \quad (5.11c)$$

Bu denklemlerdeki  $\lambda$  ve  $\Phi$ , beton yoğunluğunu ve dayanımını hesaba katan katsayılar,  $V_f$  ve  $M_f$  ise ilgili kesitteki kesme kuvveti ve eğilme momentini ifade eden değerlerdir. Yukarıdaki denklemler kesit yüksekliğinin 300 mm'den az olduğu durumlar için geçerli olup, kesit yüksekliğinin 300 mm'den fazla olması durumunda ise betonun kesme dayanımına olan katkısı,

$$V_c = \left( \frac{130}{1000 + d} \right) \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \geq 0.08 \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \quad (5.12)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. FRP donatıların kesme dayanımına olan katkısı ise aşağıdaki denklemlerdeki gibi hesaba katılmaktadır.

$$V_s = \frac{0.4 \Phi_f A_{fv} f_{fv} d}{s} \leq 0.6 \Phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \quad (5.13)$$

Bu denklemdeki 0.4 değeri FRP etriyelerinin bükülmesi neticesinde dayanımında olan azalmayı hesaba katan bir azaltma katsayısını ifade etmektedir. Aynı denklemdeki  $\Phi_f$  FRP etriye donatısının dayanımı ile ilgili bir katsayıdır.

### 5.2.1.3 ISIS-M03-07 Yönetmeliği

Bu şartnamede kesit yüksekliğinin 300 mm'nin altında olması halinde betonun kesme dayanımına olan katkısı

$$V_c = 0.2 \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{\frac{E_{fl}}{E_s}} \quad (5.14)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Kesit yüksekliğinin 300 mm'den fazla olması hali için ise  $V_c$  aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$V_c = \left( \frac{260}{1000 + d} \right) \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{\frac{E_{fl}}{E_s}} \geq 0.1 \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{\frac{E_{fl}}{E_s}} \quad (5.15)$$

FRP etriyelerinin kesme dayanımına olan katkısı ise

$$V_s = \frac{\phi_f A_{fv} f_{fv} d_v \cot \theta}{s} \quad (5.16)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu denklemdeki  $d_v$  kesit etkili kayma yüksekliği olarak ifade edilmekte ve  $0.9d$  olarak hesaplarda göz önünde bulundurulmaktadır. Bu denklemdeki  $f_{fv}$  gerilme değeri ise aşağıdaki denklemlerdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$f_{fv} = \frac{\left(0.05 \frac{r_b}{d_b} + 0.3\right) f_{fiv}}{1.5} \quad (5.17)$$

veya

$$f_{fv} = E_{fv} \varepsilon_{fv} \quad (5.18a)$$

$$\varepsilon_{fv} = 0.0001 \sqrt{f'_c \frac{\rho_{fl} E_{fl}}{\rho_{fv} E_{fv}}} \left[1 + 2 \left(\frac{\sigma_N}{f'_c}\right)\right] \leq 0.0025 \quad (5.18b)$$

Bu denklemlerdeki  $\rho_{fv}$  kesitteki etriye oranını,  $E_{fv}$  etriyelerin elastisite modülünü,  $\sigma_N$  ise aksenal kuvvetten dolayı betonda oluşan gerilme değerini ifade etmektedir.

#### 5.2.1.4 BISE-99 Yönetmeliği

İngiliz Yönetmeliğinde beton ve etriyelerin kesme dayanımlarına olan katkısı aşağıdaki denklemlerdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$V_c = 0.79 \left(100 \rho_{fl} \frac{E_{fl}}{E_s}\right)^{1/3} \left(\frac{400}{d}\right)^{1/4} \left(\frac{f_{cu}}{25}\right)^{1/3} b_w d \quad (5.19)$$

$$V_s = \frac{0.0025 E_{fv} A_{fv} d}{s} \quad (5.20)$$

Bu denklemlerdeki  $f_{cu}$  küp numune beton basınç dayanımını ifade etmektedir.

### 5.2.1.5 JSCE-97 Yönetmeliği

Japonya yönetmeliğinde betonun kesme dayanımına olan katkısı aşağıdaki denklemlerdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$V_c = \frac{\beta_d \beta_p \beta_n f_{vcd} b_w d}{\gamma_b} \quad (5.21a)$$

$$f_{vcd} = 0.2(f'_c)^{1/3} \leq 0.72 \quad (5.21b)$$

$$\beta_d = \left(\frac{1000}{d}\right)^{1/4} \leq 1.5 \quad (5.21c)$$

$$\beta_p = \left(\frac{100\rho_f l E_{fl}}{E_s}\right)^{1/3} \leq 1.5 \quad (5.21d)$$

$$\beta_n = 1 + \frac{M_0}{M_d} \leq 2 \quad N_d \geq 0 \text{ için}$$

$$\beta_n = 1 + \frac{2M_0}{M_d} \geq 0 \quad N_d \leq 0 \text{ için} \quad (5.21e)$$

Bu denklemdeki  $\gamma_b$  dayanım azaltma katsayısı,  $N_d$  ve  $M_d$  tasarım eksenel yükü ve eğilme momentini ifade etmektedirler. FRP etriyelerinin kesme dayanımına olan katkısı ise

$$V_s = \frac{A_{fv} E_{fv} \varepsilon_{fv} z}{s \gamma_b} \quad (5.22a)$$

$$\varepsilon_{fv} = 0.0001 \sqrt{f'_{mcd} \frac{\rho_{fl} E_{fl}}{\rho_{fv} E_{fv}}} \left[1 + 2 \left(\frac{\sigma_N}{f'_{mcd}}\right)\right] \leq \frac{f_{fb}}{E_{fv}} \quad (5.22b)$$

$$f_{fb} = \left( 0.05 \frac{r_b}{d_b} + 0.3 \right) f_{fiv} / \gamma_b \quad (5.22c)$$

$$f'_{mcd} = \left( \frac{h}{300} \right)^{-1/10} f'_c \quad (5.22d)$$

$$\sigma_N = (N'_d + P_{ed}) / A_g \leq 0.4 f'_{mcd} \quad (5.22e)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu denklemlerdeki  $\varepsilon_{fv}$  kırılma anında etriyelerde oluşan şekil değiştirme değerini,  $z = d/1.15$ , kesitteki basınç ve çekme kuvvetleri arasındaki mesafeyi,  $f_{mcd}$  tasarım beton basınç dayanımını;  $P_{ed}$  etkili öngerme kuvvetini,  $A_g$  ise toplam kesit alanını ifade etmektedir.

## BÖLÜM VI

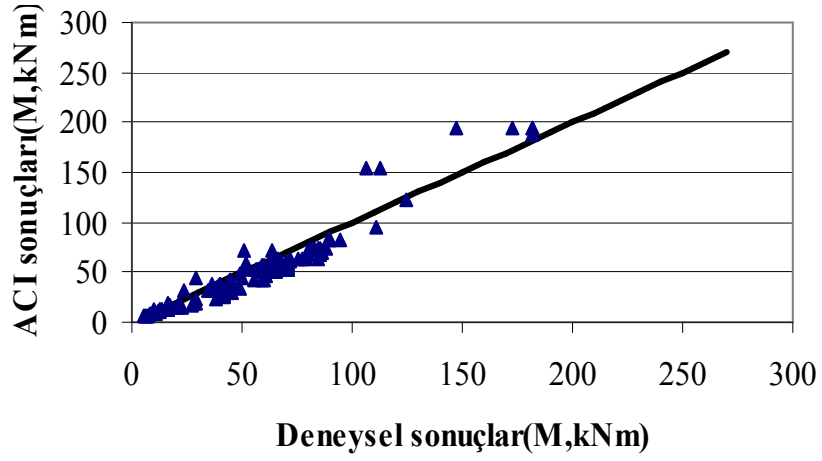
### ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde ilk etapta FRP donatılı betonarme kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışı daha önceden geliştirilmiş olan bir bilgisayar programı aracılığı ile analiz edilmiştir. Farklı parametrik değişkenlerin eğilme davranışı üzerine olan etkisi araştırılmıştır. Bununla birlikte FRP ve çelik donatı içeren hibrit FRP-çelik-donatılı kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışı da irdelenmiştir. Ayrıca bu bölümde FRP donatısı içeren betonarme kirişlerin kesme dayanımı farklı ülke yönetmelikleri ve standartlar tarafından önerilen modeller aracılığı ile elde edilerek bu modellerin karşılaştırılması yapılmıştır. En son olarak FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımları için önerilen denkleme ve bu denklemin diğer yönetmelikler tarafından önerilen modellerle karşılaştırmasına da yer verilmiştir.

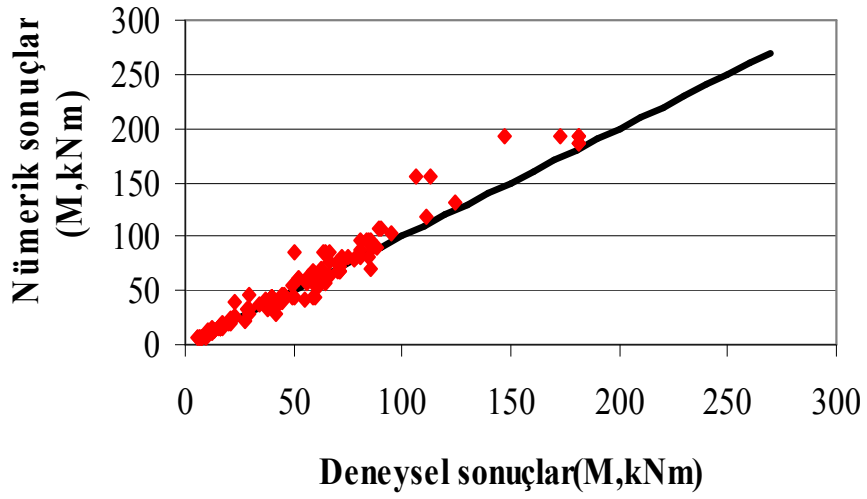
#### 6.1 FRP Donatılı Betonarme Kirişlerin Eğilme Etkisi Altındaki Analizi

##### 6.1.1 Eğilme momenti kapasitesi

Eğilme etkisi altında deneysel olarak yüklemeye tabi tutulmuş 119 Adet FRP donatılı betonarme kirişin taşıma gücü değerleri literatürden elde edilmiş olup bu değerler, gerek ACI 440 (2006) gerekse nümerik yöntem aracılığı ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 6.1). Kirişlere ait gerek malzeme gerekse kesit özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Çizelge 6.1 ve Şekil 6.1’de, ACI ve nümerik yöntem aracılığı ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması görülmektedir. ACI tarafından elde edilen sonuçların deneysel sonuçlardan çoğunlukla daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, gerek ACI yönteminde basınç donatısının hesaplarda göz önüne alınmamasından, gerekse aynı modelde betonun ezilme birim kısalmasına ulaştığı anda en dış basınç lifindeki şekil değiştirme değerinin 0.003 kabul edilmesinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Bugüne kadar yapılan çalışmalardan, FRP donatılı betonarme kirişlerin taşıma gücü sınır durumuna eriştiği anda, betonun en dış basınç lifinde 0.0035-0.0040 şekil değiştirme birim kısalma değerine ulaşıldığı görülmüştür (Barris vd. 2009).



(a) ACI 440-06



(b) Nümerik Yöntem

Şekil 6.1. (a-b) FRP donatılı betonarme kirişlerin deneysel ve teorik taşıma gücü momentlerinin karşılaştırılması

**Çizelge 6.1.** Deneysel ve teorik moment taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması

Kaynak	Kiriş adı	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)	$f_c'$ (MPa)	$\rho_f$ (%)	$M_{den}$ (kN)	$M_{fu} / M_{den}$	
							Nümerik Yöntem	ACI 440 (2006)
AlMusallam vd. (1997)	COMP-00	200	240	35.4	1.33	40.25	1.01	0.92
	COMP-25	200	240	36.4	1.33	40.25	1.02	0.93
	COMP-50	200	240	36.5	1.33	40.25	1.03	0.93
	COMP-75	200	240	37.5	1.33	44.28	0.96	0.86
Thériault ve Benmokrane (1998)	BC2HA	130	180	57.2	1.24	19.7	0.98	0.80
	BC2HB	130	180	57.2	1.24	20.6	0.94	0.77
	BC2VA	130	180	97.4	1.24	22.7	1.12	0.69
	BC4NB	130	180	46.2	2.7	20.6	0.97	0.82
	BC4HA	130	180	53.9	2.7	21	1.04	0.85
	BC4HB	130	180	53.9	2.7	21.4	1.02	0.83
	BC4VA	130	180	93.5	2.7	28.4	1.05	0.65
	BC4VB	130	180	93.5	2.7	29.5	1.01	0.62
Toutanji ve Saafi (2000)	GB1-1	180	300	35	0.53	60	0.73	0.72
	GB1-2	180	300	35	0.53	59	0.74	0.73
	GB2-1	180	300	35	0.79	65	0.94	0.79
	GB2-2	180	300	35	0.79	64.3	0.95	0.80
	GB3-1	180	300	35	1.1	71	0.90	0.75
	GB3-2	180	300	35	1.1	70.5	0.90	0.76
Kassem vd. (2011)	C1-4	200	300	40.4	0.6	71.2	1.00	0.83
	C1-6	200	300	39.3	0.9	83.13	1.09	0.89
	C1-8	200	300	39.3	1.2	90.39	1.11	0.91
	C2-4	200	300	39.9	0.5	78.75	0.97	0.80
	C2-6	200	300	40.8	0.8	80.89	1.13	0.92
	C2-8	200	300	40.8	1.1	89.39	1.13	0.92
	G1-6	200	300	39.05	1.6	77.47	0.97	0.81
	G1-8	200	300	39.05	2.2	86.76	0.98	0.80
	G2-6	200	300	39.05	1.4	71	0.96	0.80
	G2-8	200	300	39.05	1.9	84.54	0.91	0.75
	AR-6	200	300	39.05	0.9	70.85	0.92	0.77
AR-8	200	300	39.05	1.2	71.75	1.03	0.86	
Benmokrane vd. (1995)	ISO30-2	200	300	42	1.06	80.4	1.01	0.90
	KD30-1	200	300	42	1.06	50.6	1.60	1.41
	KD30-2	200	300	42	1.06	63.8	1.27	1.12
	KD45-1	200	450	52	0.68	106.6	1.45	1.44
	KD45-2	200	450	52	0.68	113	1.37	1.36
	ISO55-1	200	550	42	0.55	181.5	1.06	1.07
	ISO55-2	200	550	42	0.55	181.5	1.06	1.07
	KD55-1	200	550	42	0.55	146.9	1.31	1.32

**Çizelge 6.1. (Devam) Deneysel ve teorik moment taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması**

Kaynak	Kiriş adı	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)	$f_c'$ (MPa)	$\rho_f$ (%)	$M_{den}$ (kN)	$M_{fu} / M_{den}$	
							Nümerik Yöntem	ACI 440 (2006)
Benmokrane vd. (1995)	KD55-2	200	550	42	0.55	172.5	1.11	1.12
Ashour (2006)	Beam2	150	200	27.68	0.23	5.886	0.99	0.97
	Beam4	150	250	27.68	0.17	7.848	0.97	0.95
	Beam6	150	300	27.68	0.14	10.791	0.90	0.85
	Beam8	150	200	50.09	0.23	5.886	1.00	0.99
	Beam10	150	250	50.09	0.17	9.483	0.81	0.80
	Beam12	150	300	50.09	0.14	16.75	1.12	1.11
Benmokrane vd. (1996)	ISO2	200	300	43	1.13	80.4	0.96	0.84
	ISO3	200	550	43	0.57	181.7	1.02	1.03
	ISO4	200	550	43	0.57	181.7	1.02	1.03
Yost vd. (2001)	1FRP1	381	203	27.6	0.12	11.49	0.99	0.98
	1FRP2	381	203	27.6	0.12	12.67	0.90	0.89
	1FRP3	381	203	27.6	0.12	11.49	0.99	0.98
	2FRP1	318	216	27.6	0.13	13.62	0.90	0.88
	2FRP2	318	216	27.6	0.13	13.26	0.92	0.91
	2FRP3	318	216	27.6	0.13	13.06	0.93	0.92
	4FRP1	203	152	27.6	1.27	15.78	0.91	0.86
	4FRP2	203	152	27.6	1.27	15.58	0.92	0.88
	4FRP3	203	152	27.6	1.27	16.29	0.88	0.84
	5FRP1	191	152	27.6	1.35	16.37	0.84	0.80
	5FRP2	191	152	27.6	1.35	16.65	0.83	0.79
	5FRP3	191	152	27.6	1.35	15.78	0.87	0.83
Masmoudi vd. (1998)	CB2B-1	200	300	52	0.69	57.9	1.09	0.93
	CB2B-2	200	300	52	0.69	59.8	1.05	0.90
	CB3B-1	200	300	52	1.04	66	1.22	0.97
	CB3B-2	200	300	52	1.04	64.8	1.24	0.99
	CB4B-1	200	300	45	1.47	75.4	1.01	0.83
	CB4B-2	200	300	45	1.47	71.7	1.07	0.87
	CB6B-1	200	300	45	2.2	84.8	1.06	0.86
	CB6B-2	200	300	45	2.2	85.4	1.06	0.86
Brown ve Bartholomew (1993)	1	152	152	35.9	0.38	7.04	1.02	0.99
	2	152	152	36.9	0.38	6.64	1.09	1.06
	4	152	152	38.9	0.38	7.23	1.00	1.00
	5	152	152	39.9	0.38	7.35	0.99	0.99

**Çizelge 6.1. (Devam) Deneysel ve teorik moment taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması**

Kaynak	Kiriş adı	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)	$f_c'$ (MPa)	$\rho_f$ (%)	$M_{den}$ (kN)	$M_{fu} / M_{den}$	
							Nümerik Yöntem	ACI 440 (2006)
Brown ve Bartholomew (1993)	6	152	152	40.9	0.38	6.75	1.07	1.09
Grace vd. (1998)	cb-st	152	350	48.26	0.23	51.91	1.18	1.15
Duranovic vd. (1997)	GB5	150	250	31.2	1.36	40.3	0.86	0.81
	GB9	150	250	39.8	1.36	39.73	1.02	0.91
	GB10	150	250	39.8	1.36	39.5	1.02	0.92
Pecce vd. (2000)	F2	500	185	30	0.7	36.8	1.08	1.03
	F3	500	185	30	1.22	60.7	0.83	0.78
Ashour ve Family (2006)	RC2	200	350	34.43	0.36	85.27	0.81	0.78
	RC4	200	350	34.43	0.72	124.6	1.05	0.98
Rafi vd. (2008)	BRC2	120	200	41.71	0.7	29.19	0.95	0.78
Alsayed vd. (2000)	II	200	210	31.3	3.6	34.187	0.99	0.93
	III	200	260	31.3	1.2	45.125	0.97	0.91
	IV	200	300	40.7	1.15	59.187	1.09	0.97
	V	200	250	40.7	2.87	57	1.03	0.92
Barris vd. (2009)	C-212-D1	140	190	59.8	0.99	38.22	0.79	0.62
	C-216-D1	140	190	56.3	1.78	45.06	0.81	0.64
	C-316-D1	140	190	55.2	2.67	49.38	0.84	0.67
	C-212-D2	160	190	39.6	0.99	27.69	0.75	0.65
	C-216-D2	160	190	61.7	1.78	42.15	0.78	0.61
	C-316-D2	160	190	60.1	2.67	43.2	0.88	0.68
Ashour ve Habeeb (2008)	C-S-1	200	300	26.9	0.42	64.11	0.88	0.84
	C-S-2	200	300	27.5	0.16	44.28	0.97	0.95
	C-C-3	200	300	23.6	0.16	44.76	0.95	0.94
	C-C-4	200	300	27.2	0.42	60.66	0.93	0.89
	C-C-5	200	300	28	0.42	56.03	1.01	0.96

**Çizelge 6.1. (Devam) Deneysel ve teorik moment taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması**

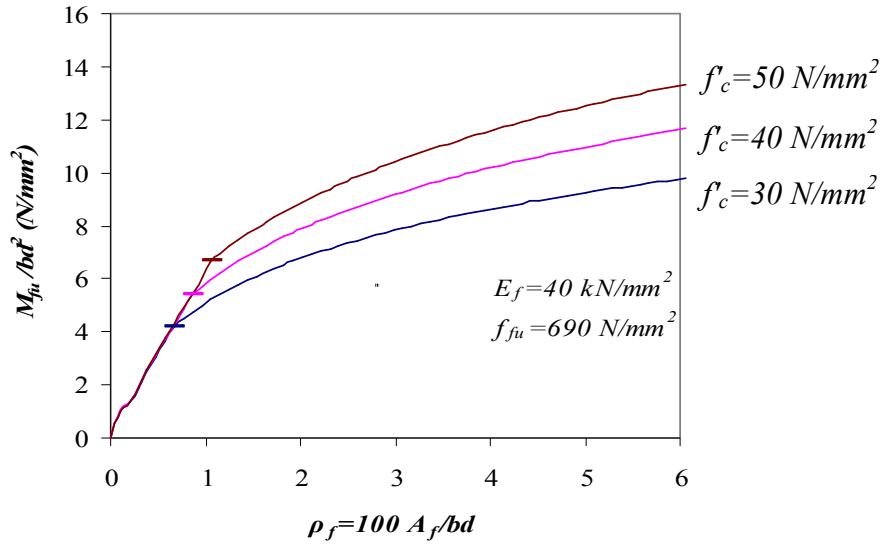
Kaynak	Kiriş adı	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)	$f'_c$ (MPa)	$\rho_f$ (%)	$M_{den}$ (kN)	$M_{ju} / M_{den}$	
							Nümerik Yöntem	ACI 440 (2006)
Mostafa vd. (2010)	CS1	200	300	26	0.42	51.8	1.10	1.02
	CS1	200	300	26	0.28	29	1.55	1.56
	GS1	200	300	28	1.18	60.2	1.02	0.94
	GS1	200	300	28	0.79	49	1.06	0.98
Thiagarajan (2003)	B4	152.4	152.4	51.73	0.34	12.603	1.07	1.01
	B5	152.4	152.4	48.02	0.34	10.151	1.28	1.22
	B7	152.4	152.4	49.3	0.53	17.104	0.98	0.86
	B8	152.4	152.4	51.1	0.53	16.919	1.01	0.88
	B12	152.4	152.4	43.88	0.76	17.506	1.08	0.92
	B9	152.4	152.4	53.31	0.53	16.575	1.05	0.91
Ovitigala (2012)	BL1	203,2	304,8	44,92	0.19	41.49	0.70	0.68
	BL2	203,2	304,8	44,92	0.29	55.05	0.76	0.76
	BL3	203,2	304,8	44,92	0.26	50.165	0.89	0.90
	BL4	203,2	304,8	44,92	0.40	66.71	0.96	0.82
	BN1	203,2	304,8	35.854	0.40	58.73	1.05	0.87
	BN2	203,2	304,8	35.854	0.53	63	1.12	0.92
	BN3	203,2	304,8	35.854	0.48	57.71	1.09	0.91
	BN4	203,2	304,8	35.854	0.72	66.921	1.13	0.92
	BN5	203,2	304,8	35.854	0.75	70.1	1.085	0.88
	BN6	203,2	304,8	35.854	1.13	88.15	1.026	0.83
	BN7	203,2	304,8	35.854	1.95	94.76	1.09	0.87
BN8	203,2	304,8	35.854	2.93	110.71	1.07	0.86	
Ortlama							1.04	0.9
Standart sapma (%)							0.15	0.16

Nümerik yöntem aracılığı ile elde edilen taşıma gücü mument değerlerinin ACI 440-06 yönteminde göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

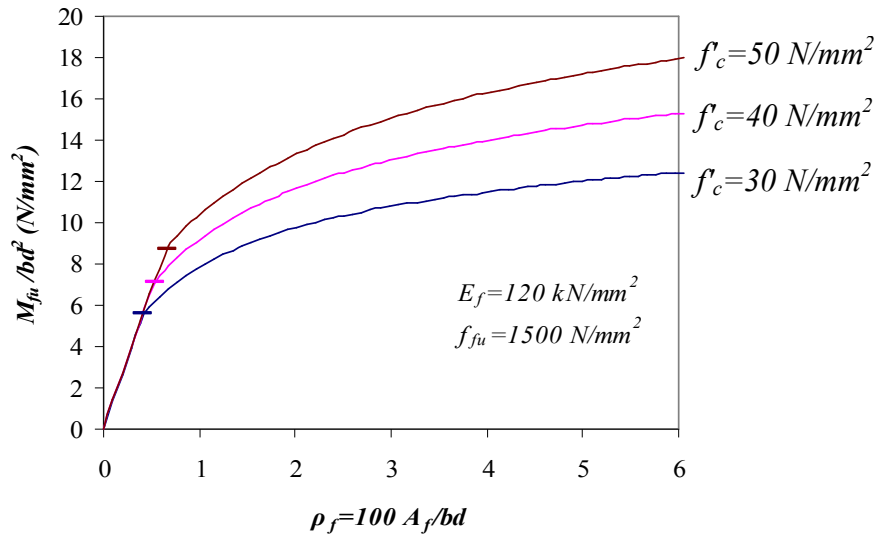
#### 6.1.1.1 FRP donatısı oranının kirişin eğilme kapasitesi üzerine olan etkisi

Bu çalışma kapsamında FRP donatısının kesit taşıma gücü kapasitesine olan etkisini irdelenmek amacıyla parametrik bir çalışma yapılmıştır. Betonarme kesitte artan FRP donatısının kesit taşıma gücü kapasitesi üzerine olan etkisi geliştirilmiş olan nümerik yöntem aracılığı ile ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir (Şekil 6.2). Şekil 6.2(a)'da GFRP,

Şekil 6.2(b)'de CFRP donatısının etkisi gösterilmiştir. Bu şekillerde gösterilen her bir eğride kesitin denge altı durumundan denge üstü durumuna geçişi koyu renkle gösterilmiştir. Kiriş kesitinin denge altı olması durumunda basınç dayanımı normalize edilmiş taşıma gücü momenti üzerinde önemli bir etkiye sahip olmazken, kesitin denge üstü olması halinde basınç dayanımının hem CFRP donatılı, hem de GFRP donatılı kirişler için önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Denge altı kesitlerde, normalize edilmiş moment kapasitesinin FRP donatısı oranı ile lineer olarak arttığı görülmüştür. Diğer yandan denge üstü kesitlerde FRP donatısındaki büyük artış moment kapasitesi üzerinde sınırlı düzeyde çok küçük bir artışa neden olmaktadır (Kara ve Ashour 2014).



(a) GFRP donatılı betonarme kesit



(b) CFRP donatılı betonarme kesit

Şekil 6.2. (a-b) FRP donatısının betonarme kesitin moment kapasitesi üzerine olan etkisi

## 6.1.2 Yük/moment-deplasman ilişkisi

Bu bölümde ilk etapta deneysel çalışmaları daha önceden yapılmış betonarme kirişlere ait deplasman değerleri, gerek ACI, gerekse numerik yöntem aracılığı ile elde edilmiş ve bu değerler deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Daha sonra ise farklı boyut ve kesitlere sahip FRP donatılı betonarme kirişler numerik yöntem aracılığı ile analiz edilerek, FRP donatısı oranı ve tipinin deplasmanlar üzerine olan etkisi irdelenmiştir.

### 6.1.2.1 Teorik sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

Deneysel çalışmaları Ovitigala (2012) ve Kassem vd. (2011) tarafından yapılan basit mesnetli betonarme kirişlere ait deplasman değerleri, gerek nümerik yöntem, gerekse farklı yönetmelikler tarafından önerilen etkili atalet momentleri aracılığı ile elde edilerek deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Şekil 6.3). Betonarme kirişler simetrik olarak iki noktasal yük etkisi altında yüklemeye tabi tutulmuş olup, kirişlere ait gerek kesit gerekse malzeme özellikleri Çizelge 6.2’de verilmiştir.

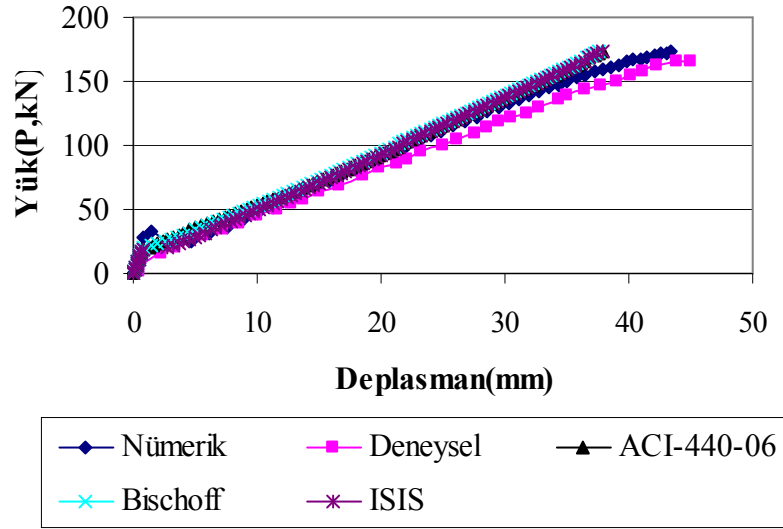
**Çizelge 6.2.** Deneysel olarak yüklemeye tabi tutulmuş kirişlere ait malzeme ve kesit özellikleri

Kaynak	Kiriş Adı	Yükleme Tipi	$b$ (mm)	$h$ (mm)	$L$ (mm)	Donatılar (mm)		$E_f$ (kN/mm <sup>2</sup> )	$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )
						Üst	Alt		
Ovitigala (2012)	BN7	İki noktasal	203.2	304.8	3300	2Φ9 (Steel)	2Φ25 (BFRP)	50.057	35.85
	BN8	İki noktasal	203.2	304.8	3300	2Φ9 (Steel)	3Φ25 (BFRP)	50.057	35.85
Kassem, vd. (2011)	C2-4	İki noktasal	200	300	2750	2Φ11.3 (Steel)	4Φ9 (CFRP)	122	39.9
	AR-8	İki noktasal	200	300	2750	2Φ11.3 (Steel)	8Φ9.5 (GFRP)	52	39.05
	G1-8	İki noktasal	200	300	2750	2Φ11.3 (Steel)	8Φ12.7 (GFRP)	40	39.05

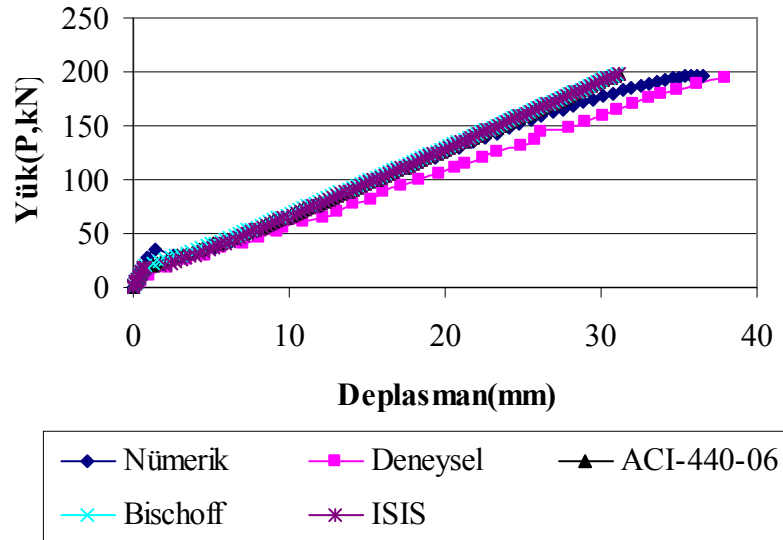
Not:  $b$ ,  $h$  ve  $L$  = kirişe ait genişlik, yükseklik ve açıklığı,  $E_f$  ise FRP donatısına ait elastisite modülünü ifade etmektedir.

Şekil 6.3’den gerek nümerik yöntem, gerekse ACI (2006), ISIS (2007) ve Bischoff (2005) tarafından önerilen denklemler aracılığı ile elde edilen deplasmanların genellikle deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Nümerik yöntem ve farklı

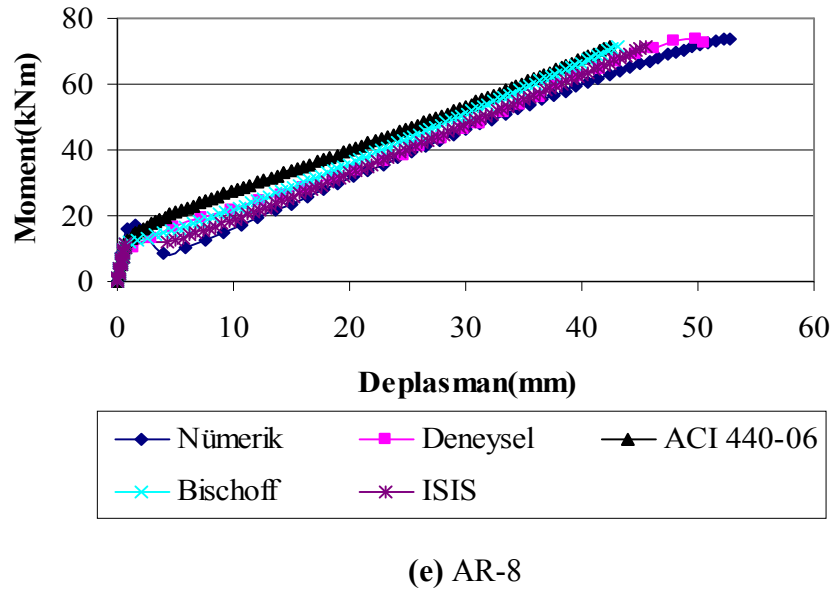
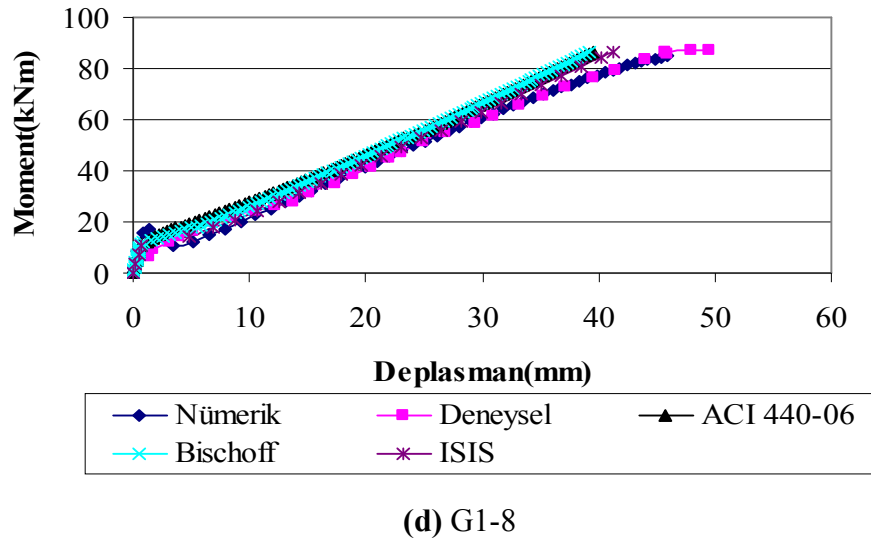
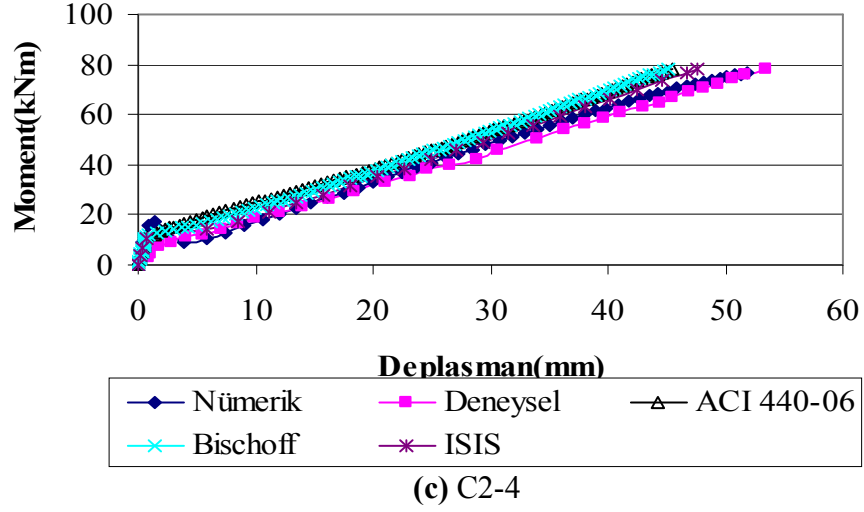
modeller aracılığı ile elde edilen sonuçların özellikle, kullanılabilirlik yük düzeylerinde deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte, kirişlere uygulanan yükün kırılma anındaki yüke yaklaşmasıyla birlikte nümerik yöntemin diğer modellere göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.



(a) BN7



(b) BN8

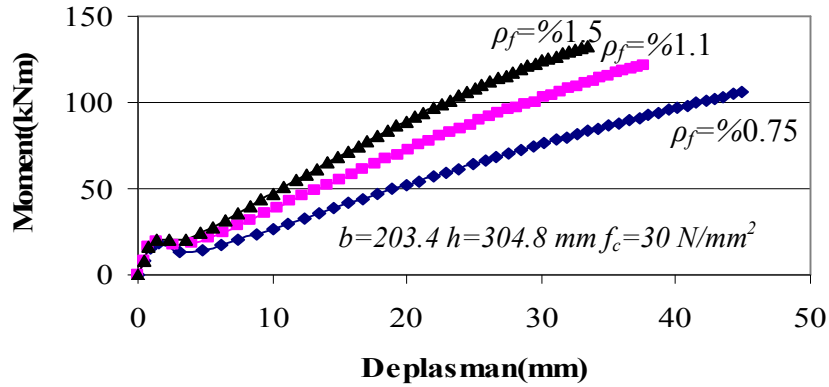


**Şekil 6.3. (a-e) FRP donatılı basit mesnetli kirişlerin deneysel ve teorik olarak elde edilen deplasman sonuçlarının karşılaştırılması**

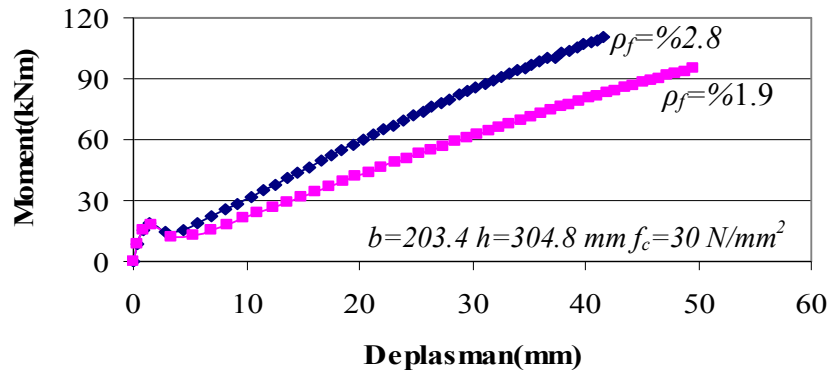
Şekil 6.3'den ayrıca deplasmanları elde etmek için kullanılan farklı etkili atalet momenti modellerinin birbirine oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

### 6.1.2.2 FRP donatısı oranının deplasmanlar üzerine olan etkisi

Bu bölümde Ovitigala (2012) tarafından deneysel olarak yüklemeye tabii tutulan kirişlerle aynı kesit özelliklerine sahip FRP donatılı kirişler, farklı çekme donatısı oranlarına sahip olacak şekilde tasarımılandırılarak, çekme donatısı oranının kirişlerde oluşan deplasmanlar üzerine olan etkisini içeren bir parametrik çalışma yapılmıştır. Kirişlerdeki CFRP donatısı oranının deplasmanlar üzerine olan etkisi Şekil 6.4(a)'dan, GFRP donatısı oranının deplasmanlar üzerine etkisi ise Şekil 6.4(b)'den görülmektedir. Betonarme kirişlerde FRP çekme donatısı oranının artırılmasının, özellikle kirişlerde oluşan ilk çatlama sonrası deplasmanların önemli derecede azalmasını sağladığı gözlenmiştir. Bununla birlikte çatlamanın oluşmasıyla FRP donatılı betonarme kirişlerin eğilme rijitliklerinde önemli azalmalar olduğu görülmüştür.



(a) CFRP donatısı

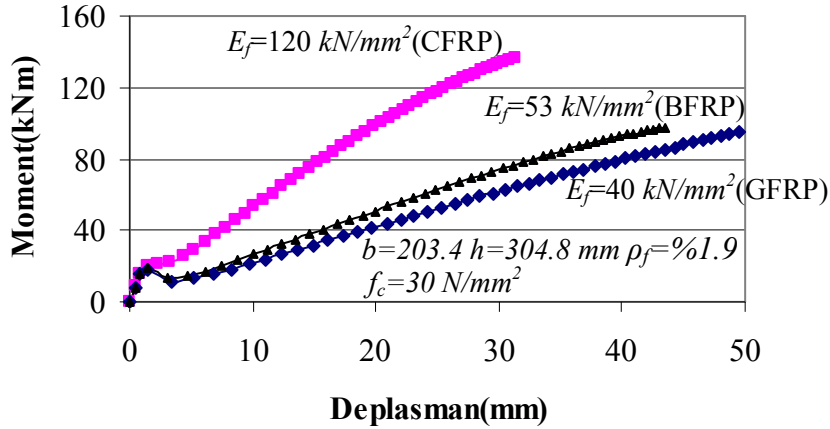


(b) GFRP donatısı

Şekil 6.4. (a-b) Çekme bölgesinde bulunan FRP donatılarının betonarme kirişlerin deplasmanları üzerine olan etkisi

### 6.1.2.3 FRP donatısı tipinin deplasmanlar üzerine olan etkisi

Kirişlerde bulunan FRP donatısı tipinin deplasmanlar üzerine olan etkisini belirlemek için Ovitigala (2012) tarafından deneysel olarak yüklemeye tabi tutulmuş kirişlerle benzer özellikte olan, farklı donatı tipine sahip kirişler tasarlanarak parametrik bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada göz önüne alınan kirişlerin tüm özellikleri aynı olup farklı olan sadece kesit içerisindeki FRP donatısı tipidir. Nümerik yöntem aracılığı ile elde edilen moment-deplasman eğrileri Şekil 6.5’de görülmektedir. GFRP donatılı kirişlerde, uygulanan yükler etkisi altında ilk çatlak oluşuktan sonra BFRP ve özellikle CFRP donatılı kirişlere göre daha büyük deplasmanlar oluştuğu görülmüştür. Bu durumun ortaya çıkmasındaki en önemli nedenlerden biri, GFRP donatısının özellikle CFRP donatısına göre daha düşük elastisite modülüne dolayısıyla daha düşük rijitliğe sahip olmasıdır.



Şekil 6.5. Farklı tipteki FRP donatılarının betonarme kirişlerin deplasmanları üzerine olan etkisi

## 6.2 FRP-Çelik Donatı İçeren Hibrit Betonarme Kirişlerin Eğilme Etkisi Altındaki Analizi

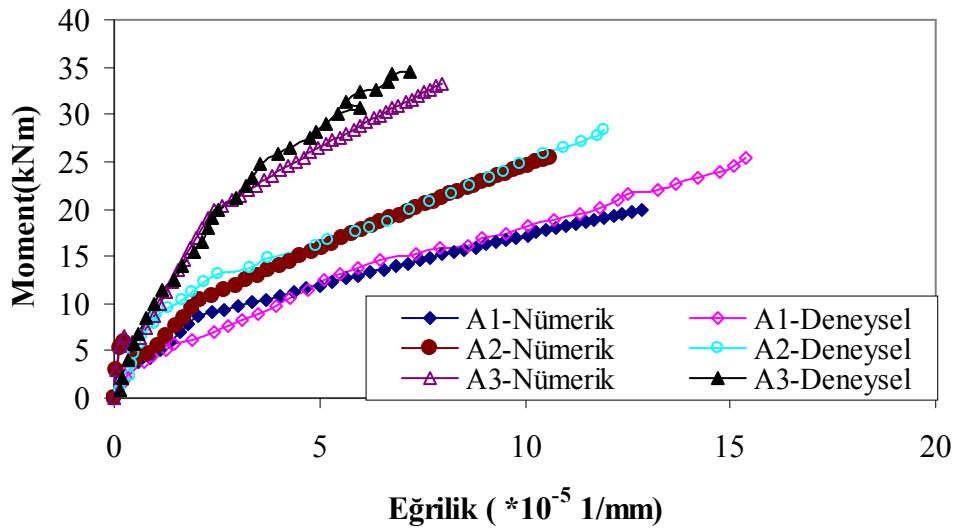
Bu bölümde, hibrit betonarme kirişlerin eğilme etkisi altındaki analizi Kara ve Ashour (2014) tarafından geliştirilen bilgisayar programı aracılığı ile analiz edilmiş olup, FRP ve çelik donatısı oranı ve FRP donatısı tipi gibi farklı değişkenlerin hibrit betonarme kirişlerin davranışları üzerine olan etkisini irdeleyen parametrik çalışmalara yer verilmiştir.

### 6.2.1 Moment-eğrilik ilişkisi

Deneysel olarak yüklemeye daha önceden tabi tutulmuş hibrit betonarme kiriş örnekleri nümerik yöntem aracılığı ile analiz edilmiş ve elde edilen moment-eğrilik ilişkisi sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu kirişlere ait gerek malzeme gerekse kesit özellikleri Çizelge 6.3’de görülmektedir. Şekil 6.6’dan görüldüğü üzere gerek çatlama sonrası, gerekse çelik donatının akması ve sonrasında nümerik yöntem aracılığı ile elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla yakınlık içerisinde olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.3. Deneysel olarak yüklemeye tabi tutulan hibrit çelik/betonarme kirişler

Kaynak	Kiriş adı	Yükleme tipi	Genişlik (mm)	Yükseklik (mm)	Açıklık (mm)	$f'_c$ (MPa)	$A_f$ ( $mm^2$ )	$A_s$ ( $mm^2$ )	$E_f$ ( $kN/mm^2$ )	FRP tipi
Aiello ve Ombres 2002	A1	İki noktasal	150	200	2700	38.8	100.5	88.3	49.0	AFRP
	A2	İki noktasal	150	200	2700	38.8	100.5	157.0	50.1	AFRP
	A3	İki noktasal	150	200	2700	38.8	226.1	235.5	50.1	AFRP



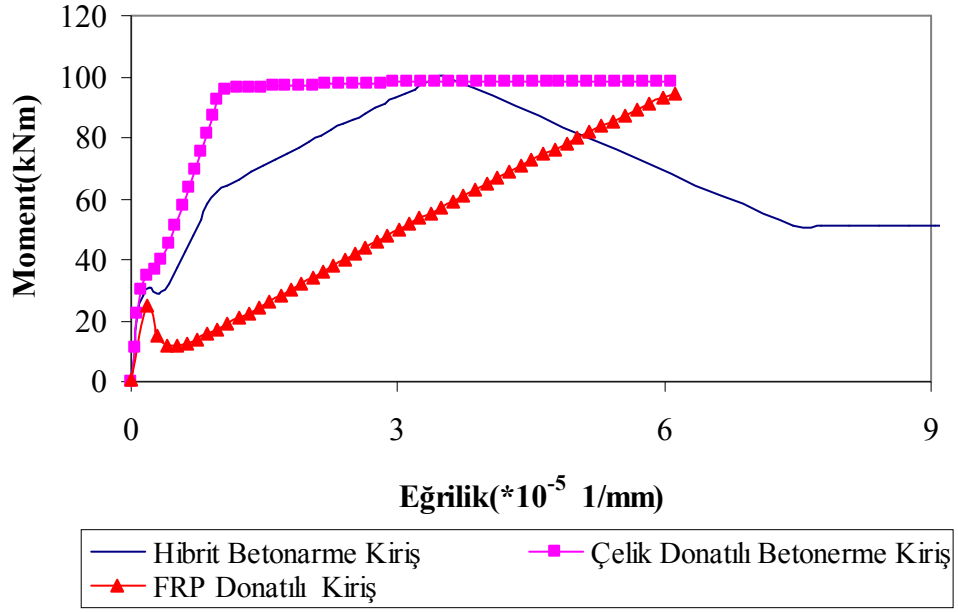
Şekil 6.6. Hibrit betonarme kesitlere ait deneysel ve teorik eğrilik sonuçlarının karşılaştırılması

### 6.2.2 FRP ve çelik donatı oranlarının moment-eğrilik ilişkisi üzerine olan etkisi

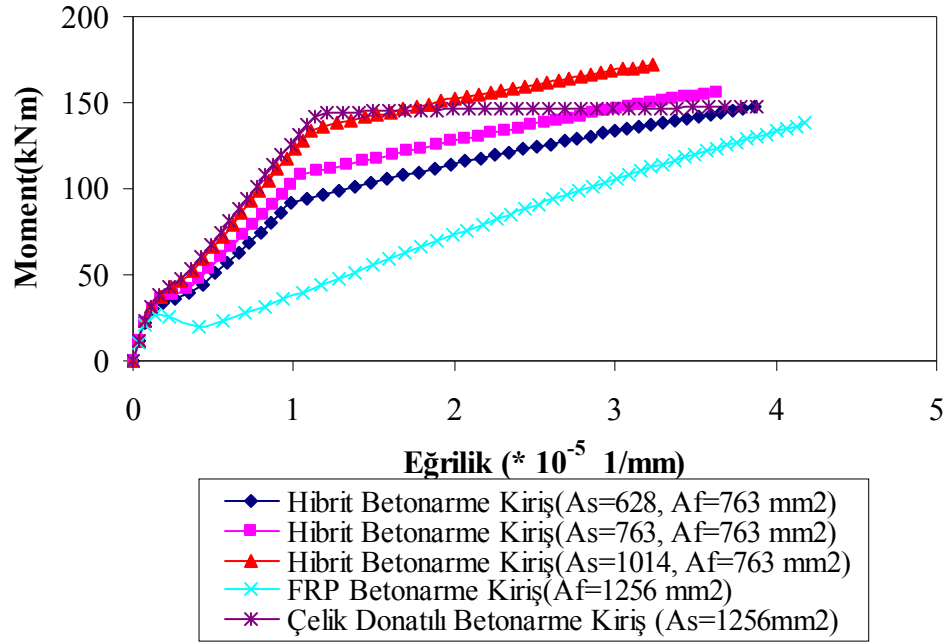
Çelik donatılı betonarme kirişlerde bilindiği üzere teorik olarak 3 farklı kırılma türü bulunmaktadır. Dengeli kırılmada, betonun en dış basınç lifinde ezilme birim kısalmasına erişmesi ve çelik donatının akma konumuna ulaşması aynı anda olacak şekilde tanımlanmaktadır. Denge altı kırılma türünde betonun en dış basınç lifinde ezilme birim kısalmasına erişmeden önce donatı akma konumuna ulaşmaktadır. Denge üstü durumda ise tam tersi olmaktadır. FRP donatılı kirişlerde ise dengeli kırılma çelik donatılı kirişlerdeki tanımla aynı olup bu defa betonun en dış basınç lifinde ezilme birim kısalmasına erişmesiyle FRP donatısının kırılması aynı anda oluşacak şekilde tanımlanmaktadır. Denge altı kırılmada ise beton en dış basınç lifi ezilme birim kısalmasına erişmeden FRP donatısı kırılmaktadır. Denge üstü durum ise bu durumun tam tersi olmaktadır. Ancak hibrit donatılı betonarme kirişlerde ise dengeli durum FRP, beton ve çeliğin malzemelerin aynı anda kırılma konumuna ulaşması şeklinde tanımlanabilir. Fakat pratikte bu durum mümkün değildir. Çelik donatı, FRP donatısı kırılmadan çok önce akma konumuna ulaşmaktadır. Yapılan çalışmalarda hibrit betonarme kirişlerde denge altı kırılma ilk önce çeliğin akma konumuna ulaşması daha sonra ise betonun en dış basınç lifinin ezilme birim kısalmasına ulaşmadan önce FRP donatısının kırılması şeklinde tanımlanmaktadır. Denge üstü kırılmada ise ilk etapta çelik donatının akması daha sonra ise FRP donatısı kırılma konumuna ulaşmadan önce betonun en dış basınç lifinde ezilme birim kısalmasına erişmesi şeklinde tanımlanmaktadır.

Bu bölümde kesit içerisindeki FRP ve çelik donatı miktarlarının, hibrit betonarme kirişin moment-eğrilik ilişkisi üzerine olan etkisini, kesitin denge altı ve denge üstü olması durumları için ayrı ayrı irdeleyen parametrik bir çalışmaya yer verilmiştir.

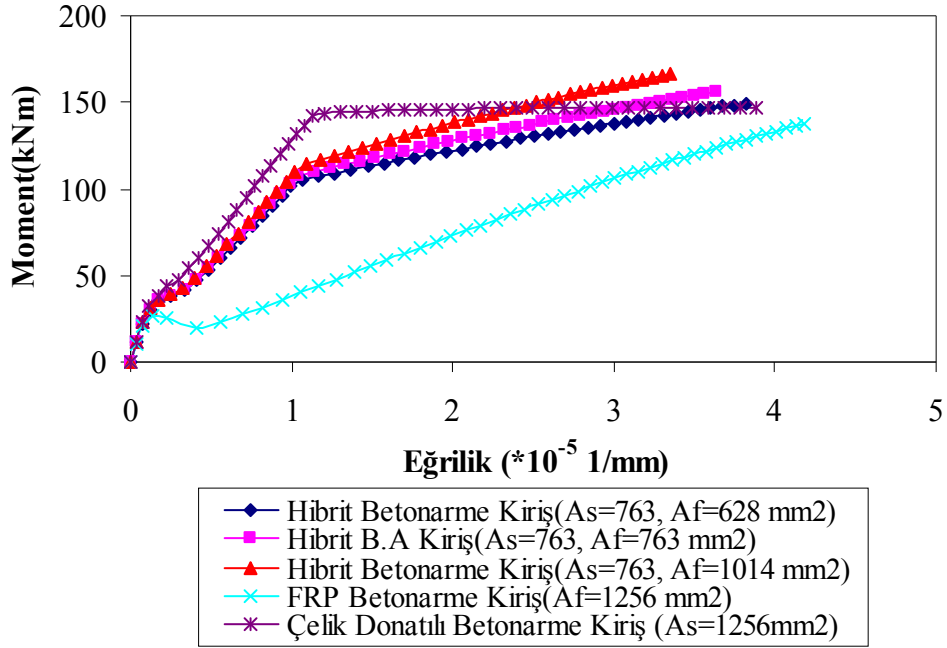
Kirişler, kesit içerisindeki FRP ve çelik donatılar denge üstü ve denge altı durumlarına da karşılık gelecek şekilde seçilmişlerdir. Kirişlere ait kesit özellikleri;  $b= 250$  mm,  $h= 350$  mm,  $f'_c= 30$  N/mm<sup>2</sup>,  $f_{fu}= 650$  N/mm<sup>2</sup>,  $f_y= 420$  N/mm<sup>2</sup> olarak seçilmiştir. Şekil 6.7(a) da denge altı, 6.7(b) ve 6.7(c)'de denge üstü kesitlere ait nümerik analiz sonuçlarından elde edilen moment-eğrilik ilişkileri görülmektedir.



(a) Denge altı kesitler



(b) Denge üstü kesitler ( $A_f$  kesitte sabit)



(c) Denge üstü kesitler ( $A_s$  kesitte sabit)

Şekil 6.7. (a-c) Denge altı ve denge üstü kesitlere ait moment eğrilik ilişkileri

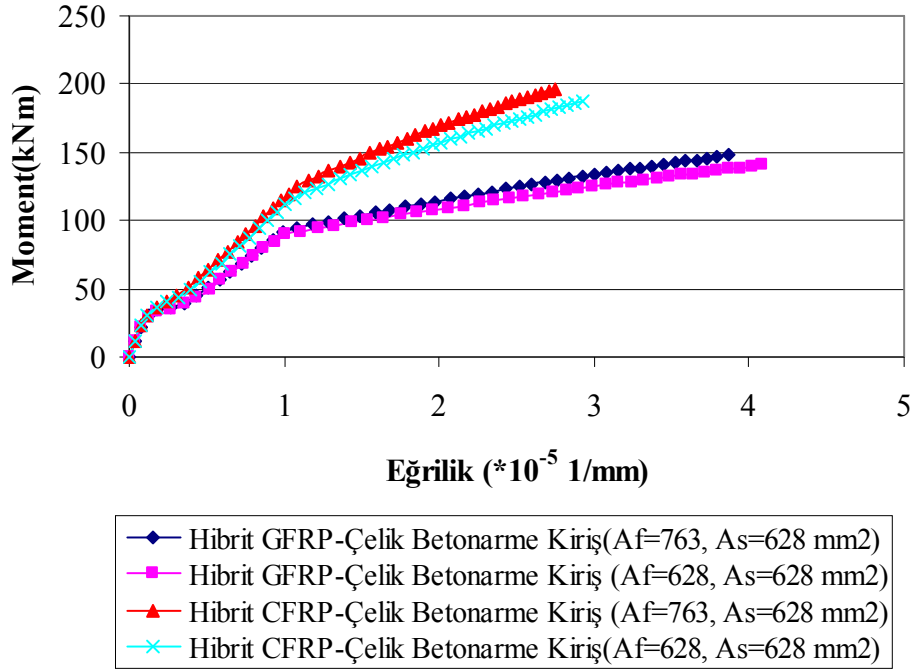
Şekil 6.7 (a-c)'de hibrit betonarme kirişlerin davranışının daha iyi anlaşılabilmesi için sadece çelik ve sadece FRP donatılı betonarme kirişlerden elde edilen sonuçlara da yer verilmiştir. Bununla birlikte, kesit içerisindeki FRP ve çelik donatı miktarları her bir duruma ait kirişin yaklaşık olarak benzer moment taşıma kapasitesine sahip olabileceği şekilde seçilmiştir. Şekil 6.7 (a-c) den görüldüğü üzere tüm kirişlerin çatlama öncesi aynı eğilme rijitliği değerine sahip olduğu görülmektedir. Betonarme kirişlerde çatlak oluşmasıyla birlikte eğrinin bu kısmından sonra kesit içerisindeki donatılar davranışta (kirişin rijitlik değerinde) önemli olmaktadır. Çatlama sonrası kirişlerin eğilme rijitlikleri azalmakta, bu da kesit içerisindeki donatıya bağlı olarak değişmektedir. Şekilden normal çelik donatılı kirişlerin en yüksek rijitlik değerine, FRP donatılı kirişlerin de en düşük rijitlik değerine sahip olduğu görülmektedir. Hibrit kirişlerin ise FRP ve çelik donatılı kirişlerin arasında bir eğilme rijitliği değerine sahip olduğu görülmüştür. Beklendiği üzere en düşük elastisite modülü değerine sahip olan FRP donatılı kirişlerin çatlama sonrası en düşük eğilme rijitliği değerine sahip olduğu görülmüştür. Hibrit kirişlerde de kesit içerisindeki çelik donatının akmasıyla birlikte kiriş eğilme rijitliği değerinin yaklaşık olarak sadece FRP donatısına sahip kirişlerin çatlama sonrası eğilme rijitliği değerine eşit olduğu görülmüştür. Şekil 6.7(a)'dan

kırılma türünün denge altı kırılma olması halinde en gevrek kırılmanın FRP donatılı kirişte olduğu görülmektedir. Hibrit donatılı kirişlerde ise FRP donatısının kırılmasından sonra momentte ani bir azalma oluşmasına rağmen çelik donatıların betonun ezilme birim kısalma değerine ulaşmaya kadar yük taşınmasına katkıda bulunduğu görülmektedir (Kara ve Ashour 2014). Denge üstü kesit için ise 2 ayrı durum göz önünde bulundurulmuştur. Birinci durumda Şekil 6.7(b)'den de görüldüğü üzere kesitte FRP donatısı sabitken çelik donatı miktarı artırılarak davranış belirlenmeye çalışılmıştır. İkinci durumda da Şekil 6.7(c)'de görüldüğü gibi kesit içerisindeki çelik donatı miktarı sabitken FRP donatısı artırılmış ve moment-eğrilik ilişkileri elde edilmiştir.

Şekil 6.7(b)'de, kesitteki çelik donatı miktarının artmasıyla birlikte çatlama sonrası kiriş eğilme rijitliği değerinin arttığı görülmektedir. Bununla birlikte, Şekil 6.7(c)'den görüldüğü üzere kesit içerisindeki FRP donatısı miktarının değişmesine rağmen ilk çatlama sonrası tüm kirişlerin aynı rijitlik değerine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Fakat çelik donatının akmasıyla kirişlerin eğilme rijitliği değerlerinin değiştiği ve en yüksek FRP donatı oranına sahip hibrit kirişin en yüksek eğilme rijitliğine, en düşük FRP donatı oranına sahip kirişin de en düşük eğilme rijitliği değerine sahip olduğu görülmüştür. Sonuç olarak FRP donatılı kiriş içerisine çelik donatı eklenmesiyle kirişin hem sünekliliği hem de rijitliği artmaktadır (Kara ve Ashour 2014).

### **6.2.3 FRP donatısı tipinin moment-eğrilik ilişkisi üzerine olan etkisi**

Bu bölümde FRP donatısı tipinin hibrit betonarme kirişlerin davranışı üzerine olan etkisini içeren parametrik bir çalışmaya yer verilmiştir. Parametrik çalışmada gözönünde bulundurulmuş kiriş için kesit ve malzeme özellikleri;  $b= 250$  mm,  $h= 350$  mm,  $f'_c= 35$  N/mm<sup>2</sup>,  $f_{tu}= 650$  N/mm<sup>2</sup>,  $f_y= 420$  N/mm<sup>2</sup>,  $E_f= 40$  kN/mm<sup>2</sup> (GFRP) ve  $f_{tu}= 1300$  N/mm<sup>2</sup>,  $E_f= 120$  kN/mm<sup>2</sup> (CFRP) olarak seçilmiştir. Şekil 6.8'den GFRP donatısı içeren hibrit kirişlerde çatlamalardan sonra CFRP donatısı içeren hibrit kirişlere göre daha fazla rijitlik azalması olduğu görülmektedir. Bu davranış GFRP donatısının CFRP donatısına göre daha düşük bir elastisite modülüne sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 6.8'den ayrıca kesitteki FRP donatısının artırılmasıyla hibrit betonarme kirişlerin sınırlı düzeyde de olsa eğilme rijitliğinin arttığı görülmektedir.



**Şekil 6.8.** FRP donatısı tipinin hibrit betonarme kesitlerin moment eğrilik ilişkisi üzerine olan etkisi

### 6.3 FRP Donatılı Betonarme Kirişlerin Kesme Dayanımı

Bu bölümde, farklı uluslar arası yönetmelikler tarafından FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı için önerilen modellerden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Ayrıca FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı için önerilen denklemlere ve bu denklemlerden elde edilen sonuçların gerek deneysel sonuçlarla gerekse diğer yönetmeliklerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmasına da yer verilmiştir.

#### 6.3.1 Deneysel veriler

Çalışma kapsamında toplam 206 adet FRP donatılı betonarme elemanların kesme dayanımları literatürden elde edilmiştir. Bu bölümde ACI 440.1R-06 (2006), CSA 806-02 (2002), ISIS M03-07 (2007), JSCE 97 (1997) ve BISE-99 (1999) yönetmeliklerinde önerilen denklemler aracılığı ile elde edilen kesme dayanımı sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak önerilen modellerin ayrıntılı olarak değerlendirilmesi yapılmıştır. Literatürden elde edilen betonarme elemanlara ait kesit ve malzeme özelliklerinin dağılımı Çizelge 6.4 ve 6.5’de verilmiştir. Deneysel olarak yüklemeye

tabii tutulmuş FRP donatılı betonarme elemanlar dikdörtgen kesitli,  $a/d$  oranı 2.5'den büyük, basit mesnetli, simetrik olarak iki noktasal yük etkisi altındaki kiriş ve döşemelerden oluşan elemanlardır. Betonarme elemanların 160 adeti kayma donatısız olup diğer 46 eleman ise FRP donatılı kayma donatısına sahip elemanlardan oluşmaktadır.

Kayma donatısız betonarme kirişlerin 90 adedi GFRP boyuna donatısına, 64 adedi CFRP boyuna donatısına ve 6 adedi de AFRP boyuna donatısına sahip elemanlardır (Tottori ve Wakui 1993; Yost vd. 2001; El-Sayed vd. 2006; Ashour 2006; El-Sayed vd. 2006; Gross vd. 2004; Gross vd. 2003; Tariq ve Newhook 2003; Tureyen ve Frosch 2002; Alkhrdaji vd. 2001; Deitz vd. 1999; Mizukawa vd. 1997; Duranovic vd. 1997; Swamy ve Aburawi 1997; Zhao vd. 1995; Razaqpur vd. 2004; El-Sayed vd. 2005; Lubell vd. 2004; Nagasaka vd. 1993; Nakamura ve Higai 1995; Matta vd. 2008). Kayma donatılı betonarme kirişlerin ise 9 adedi GFRP boyuna donatısına, 24 adedi CFRP boyuna donatısına ve 13 adedi de AFRP boyuna donatısına sahip elemanlardır (Alsayed vd. 1996; Alsayed vd. 1997; Zhao vd. 1995; Duranovic vd. 1997; Nagasaka vd. 1993; Nakamura ve Higai 1995; Tottori ve Wakui 1993; Shehata 1999). FRP donatılı betonarme elemanların kesme dayanımların elde edilmesinde, yönetmeliklerdeki denklemlerde önerilen malzeme dayanımı azaltma katsayıları, gerekli karşılaştırmaların yapılabilmesi amacı ile 1 olarak alınmıştır. Deneysel olarak yüklemeye tabii tutulmuş numunelere ait kesit ve malzeme özelliklerinin dağılımı Çizelge 6.4 ve 6.5'de verilmiştir.

**Çizelge 6.4.** Kayma donatısız betonarme elemanlara ait kesme ile ilgili parametrelerin dağılımı

Kiriş genişliği $b_w$		Kiriş etkili derinliği $d$		Beton basınç dayanımı $f'_c$		$a/d$		Elastisite Modülü $E_f$		Boyuna donatı oranı $\rho_f$ (%)	
Aralık (mm)	Adet	Aralık (mm)	Adet	Aralık (mm)	Adet	Aralık	Adet	Aralık (GPa)	Adet	Aralık	Adet
80-100	3	100-200	34	20-30	17	2.5-3.0	40	20-50	94	0.1-0.75	58
100-200	69	200-300	61	30-40	66	3.0-3.5	47	50-80	5	0.75-1.25	42
200-300	65	300-400	43	40-50	36	3.5-4.0	15	80-110	3	1.25-1.75	32
300-400	5	400-500	8	50-60	5	4.0-4.5	31	110-140	30	1.75-2.25	17
400-500	10	500-600	8	60-70	12	4.5-5.0	1	140-170	24	2.25-2.75	10
500-1000	8	600-1000	6	70-90	24	5.0-6.5	26	170-200	4	2.75-3.25	1

**Çizelge 6.5.** Kayma donatılı betonarme elemanlara ait kesme ile ilgili parametrelerin dağılımı

Kiriş etkili derinliği $d$		Beton basınç dayanımı $f'_c$		$a/d$		Elastisite Modülü $E_{fl}$		Kayma donatısı oranı $\rho_{fv}$ (%)		Boyuna donatı oranı $\rho_{fl}$ (%)	
Aralık (mm)	Adet	Aralık (mm)	Adet	Aralık	Adet	Aralık (GPa)	Adet	Aralık	Adet	Aralık	Adet
100-200	0	20-30	2	2.4-3.0	12	20-50	9	0.01-0.75	41	0.1-0.75	12
200-300	24	30-40	28	3.0-3.5	31	50-80	13	0.75-1.25	5	0.75-1.25	12
300-400	19	40-50	9	3.5-4.0	1	80-110	9	1.25-1.75	0	1.25-1.75	12
400-500	2	50-60	3	4.0-4.5	2	110-140	12	1.75-2.25	0	1.75-2.25	6
500-600	1	60-70	0	4.5-5.0	0	140-170	3	2.25-2.75	0	2.25-2.75	1
600-1000	0	70-90	4	5.0-6.5	0	170-200	0	2.75-3.25	0	2.75-3.25	3

### 6.3.2. Çalışma kapsamında önerilen denklem

Literatürden elde edilen deneysel çalışma sonuçları da göz önünde bulundurularak, bu çalışma kapsamında FRP donatılı betonarme kirişlerde betonun kesme dayanımına olan katkısı için kesit etkisini de hesaba katacak şekilde 6.1 denklemleri, kayma donatılarının kesme dayanımına olan katkısı için ise 6.2 denklemleri önerilmiştir.

$$V_c = 2.2 \left( \rho_{fl} \frac{E_{fl} d}{E_s a} f'_c \right)^{1/3} b_w d \quad d \leq 300 \text{ mm} \quad (6.1)$$

$$V_c = 2.2 \left( \rho_{fl} \frac{E_{fl} d}{E_s a} f'_c \right)^{1/3} \left( \frac{300}{d} \right)^{0.25} b_w d \quad d > 300 \text{ mm}$$

$$V_s = 0.58 (\rho_{fv} f_{uv})^{0.5} (b_w d) \quad (6.2)$$

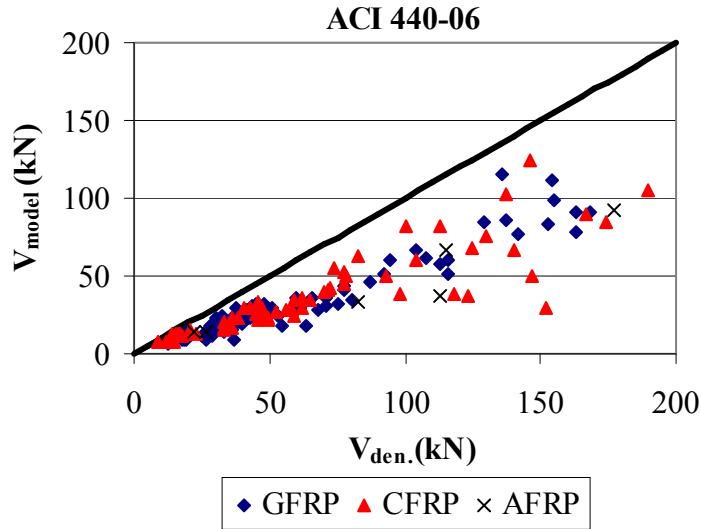
Bu denklemlerdeki  $\rho_{fl}$  kesitteki FRP boyuna donatı oranını,  $E_{fl}$  ve  $E_s$ , FRP ve çelik boyuna donatıları için elastisite modülü değerlerini ifade etmektedirler. Bununla birlikte aynı denklemlerdeki  $\rho_{fv}$  kesitteki FRP kayma donatısı oranını,  $f_{uv}$  ise kayma donatısı için kırılma anındaki gerilme değerlerini ifade etmektedir.

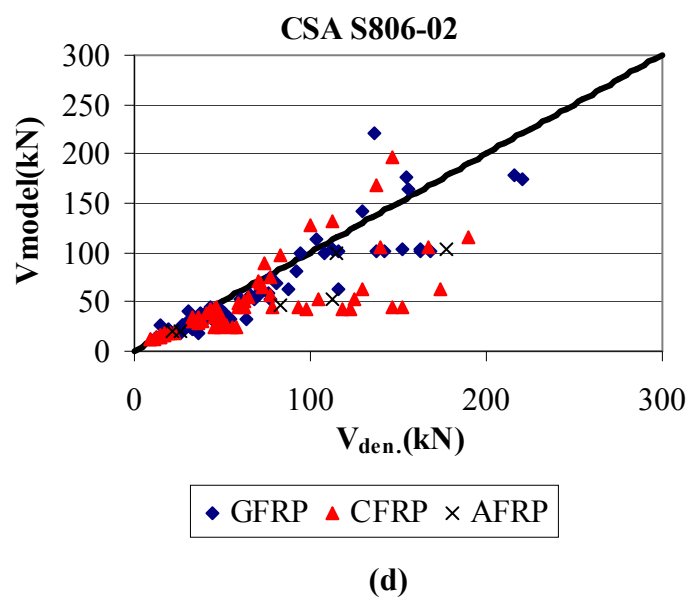
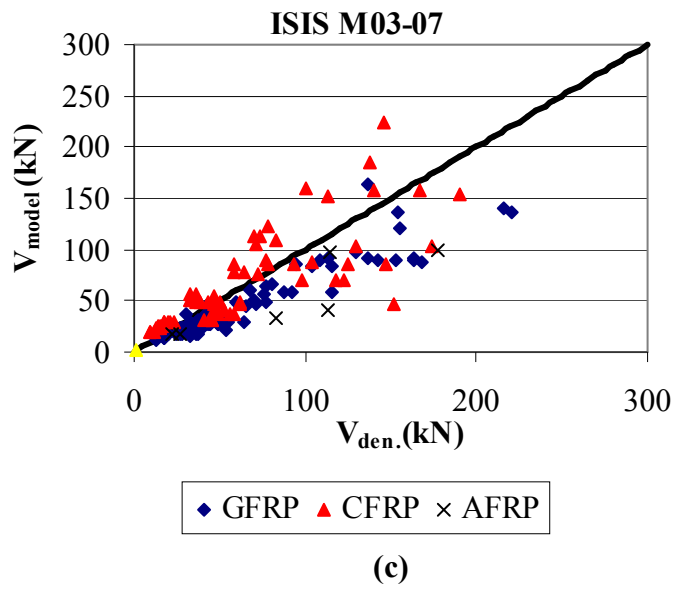
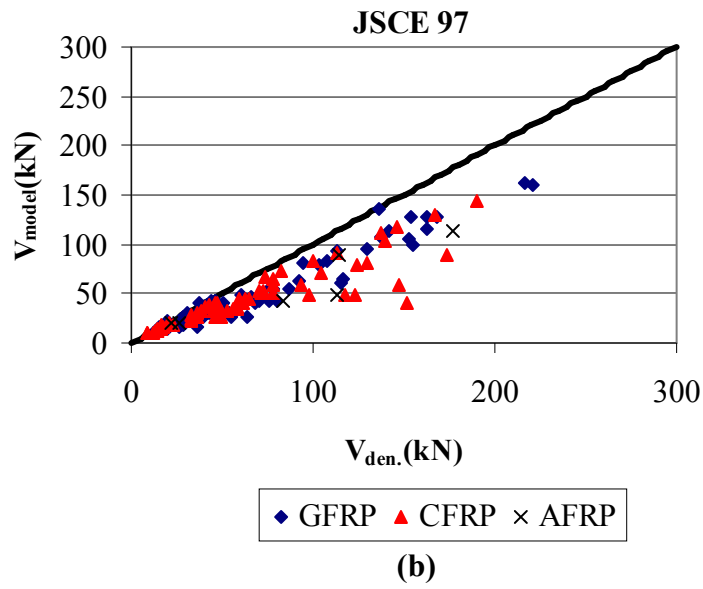
### 6.3.3. Teorik modellerin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması

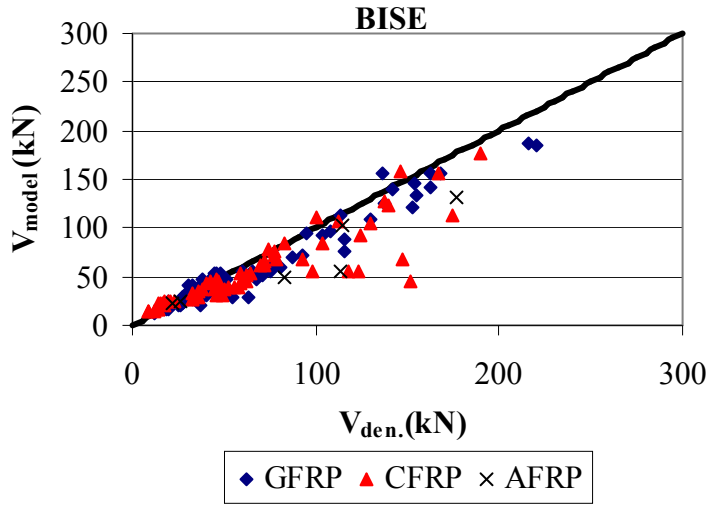
Literatürden elde edilen 160 adet kayma donatısız ve 46 adet FRP kayma donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı değerleri farklı yönetmelikler ve bu çalışma kapsamında önerilen denklemlerle karşılaştırılarak, bu denklemlerin ayrıntılı bir şekilde irdelenmesi yapılmıştır.

#### 6.3.3.1. Kayma donatısız kirişler

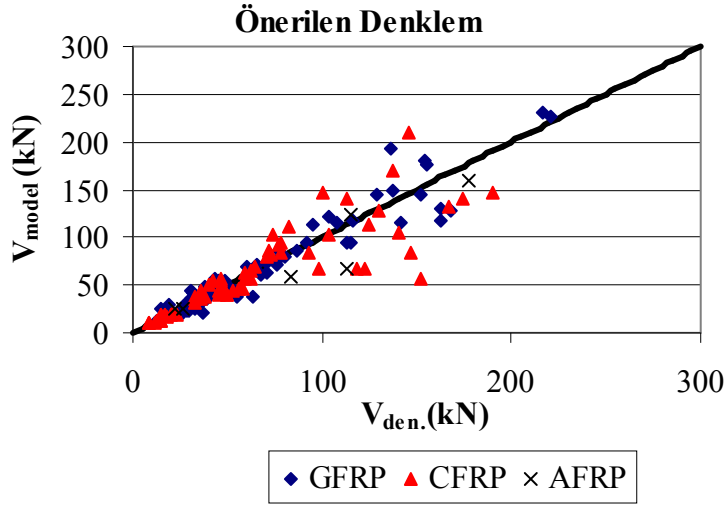
Farklı ülke yönetmelikleri tarafından önerilen denklemler aracılığı ile elde edilen FRP boyuna donatılı kirişlere ait kesme dayanımı değerlerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Şekil 6.9 (a-f)'de gösterilmiştir. Deneysel sonuçların yönetmelikler tarafından elde edilen değerlere olan oranının ortalaması, standart sapması (SD), değişkenlik katsayısı (COV) ve standart hata (AAE) değerleri Çizelge 6.6'da sunulmuştur.







(e)



(f)

**Şekil 6.9. (a-f)** Kayma donatısız FRP donatılı elemanlara ait deneysel sonuçlarla model sonuçlarının karşılaştırılması

Çizelge 6.6 ve Şekil 6.9'dan görüldüğü üzere ACI 440.1R-06 tarafından önerilen denklemden elde edilen değerlerin malzeme dayanımındaki azaltma katsayıları kullanmadan bile gereğinden fazla güvenli yönde sonuçlar verdiği ve  $V_{den}/V_{ACI}$ 'nin ortalamasının 1.86 olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu sonucun ortaya çıkmasındaki en büyük nedenlerden biri; ACI 440.1R-06 modelinin betonun kesme dayanımına olan katkısını sadece tarafsız eksenin üzerindeki beton alanını göz önünde bulunduracak şekilde denklemlere yansıtmasından kaynaklanmaktadır (Tureyen ve Frosch 2002).

Diğer yandan bu çalışma kapsamında önerilen denklemin deneysel sonuçlara en yakın sonuçları verdiği görülmüştür.

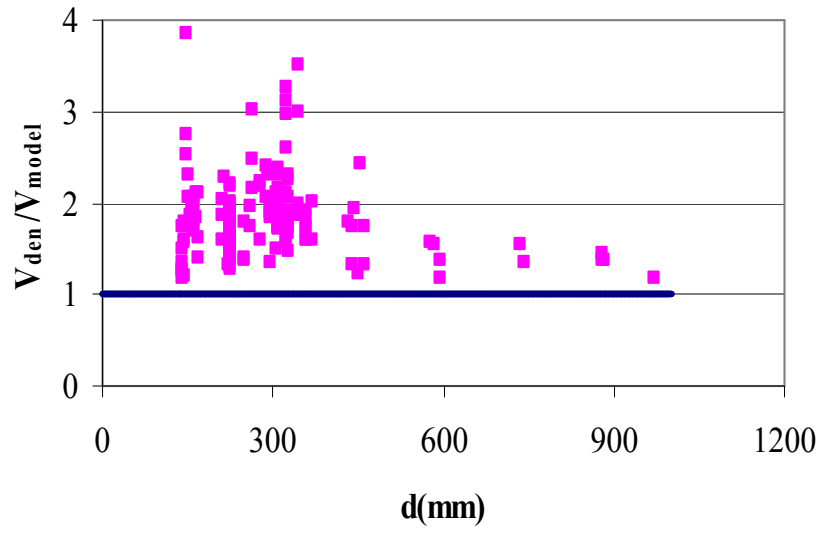
**Çizelge 6.6.** Kayma donatısız betonarme elemanlar için model ve önerilen denklemlere ait istatistiksel değerler

Model	$V_{den}/V_{model}$			AAE(%)
	Ortalama	SD	COV (%)	
ACI 440.1R-06	1.86	0.52	27.7	43.26
CAN/CSA-S806-02	1.38	0.35	36.06	24.82
ISIS M03-07	1.25	0.45	35.93	32.83
JSCE-97	1.39	0.37	26.47	24.82
BISE-99	1.15	0.33	28.91	18.04
Önerilen Denklem	1.04	0.26	24.8	15.25

ISIS-M03-07 tarafından önerilen denklemin kesme dayanımını etkileyen tüm parametreleri denklemde göz önünde bulundurmamasına karşın yine de uygun sonuçlar verdiği görülmüştür. BISE tarafından önerilen denklemin de yönetmelikler içerisinde en uygun sonucu verdiği gözlemlenmiştir.

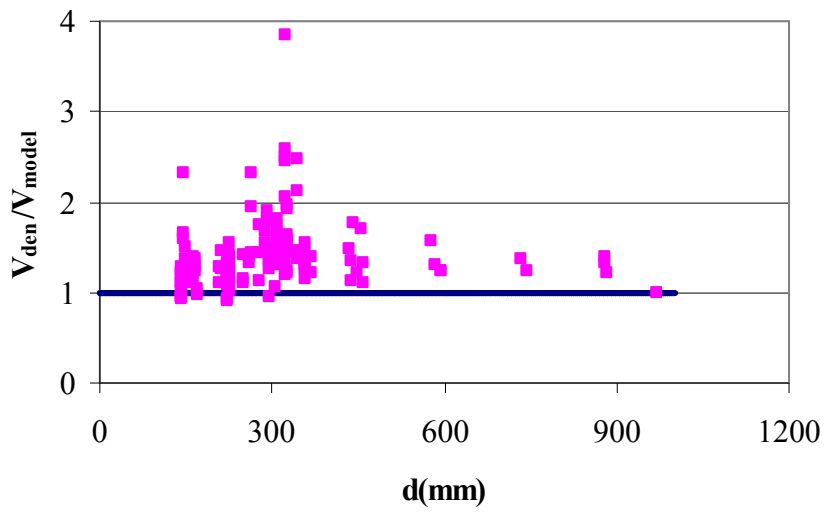
Deneysel sonuçların teorik sonuçlara olan oranının kesit yüksekliğine bağlı olarak değişimleri her bir model için Şekil 6.10'da verilmiştir. Kesit etkisini denklemde göz önünde bulundurmayan ACI modelinin kesit yüksekliğine bağlı kalmaksızın gereğinden fazla güvenli yönde sonuçlar verdiği görülmüştür. Bununla birlikte gerek BISE tarafından, gerekse bu çalışma kapsamında önerilen denklemin, diğer modellere göre kesit yüksekliğinin 300 mm'den büyük olması ve olmaması durumlarında daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

ACI-440-06



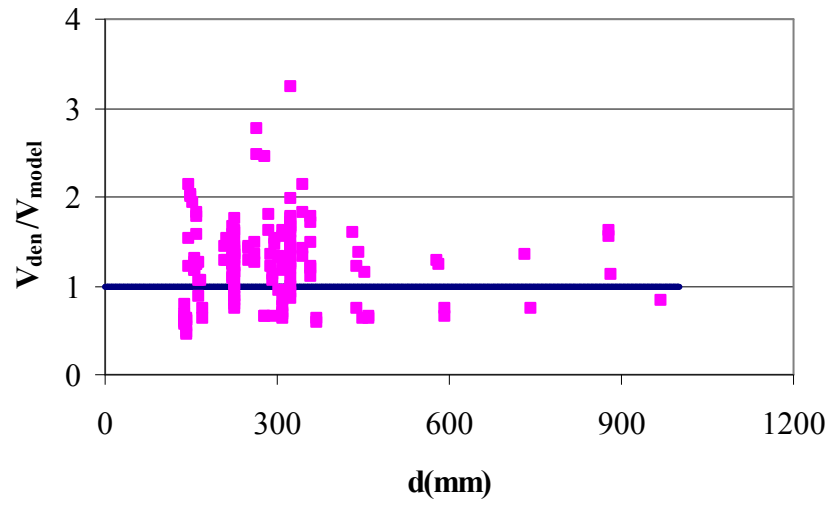
(a)

JSCE-97



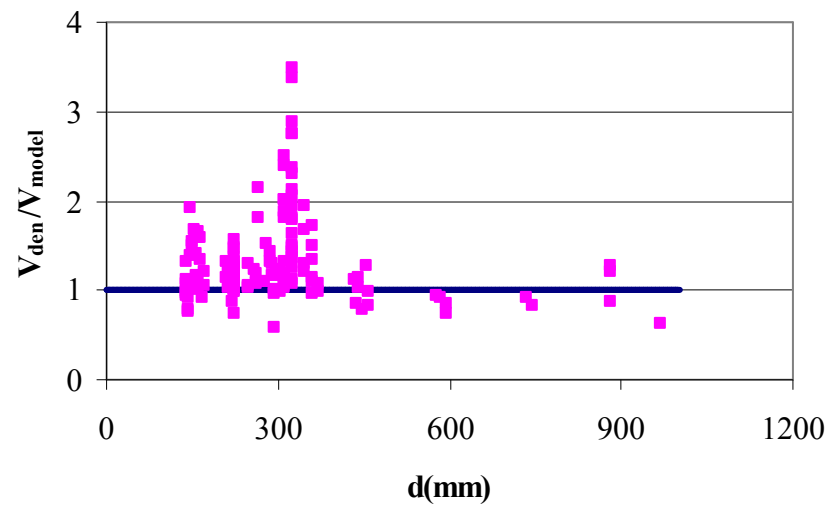
(b)

### ISIS M03-07



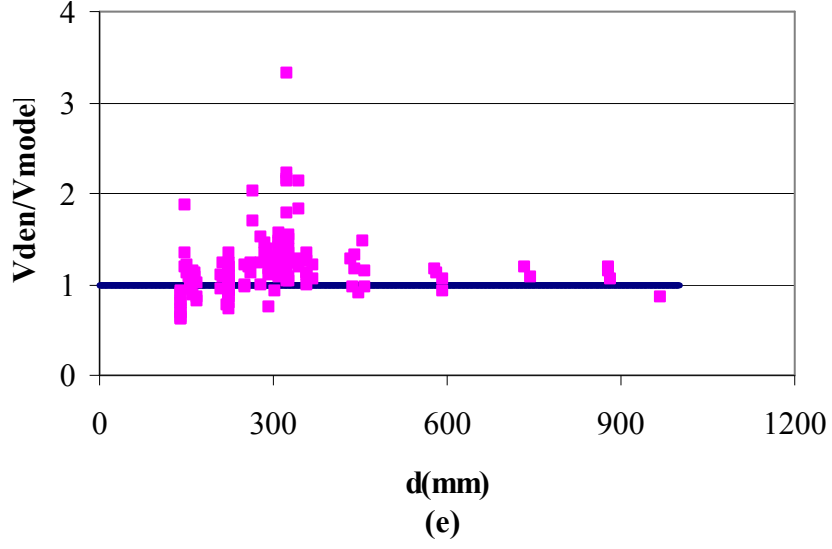
(c)

### CSA 806-02

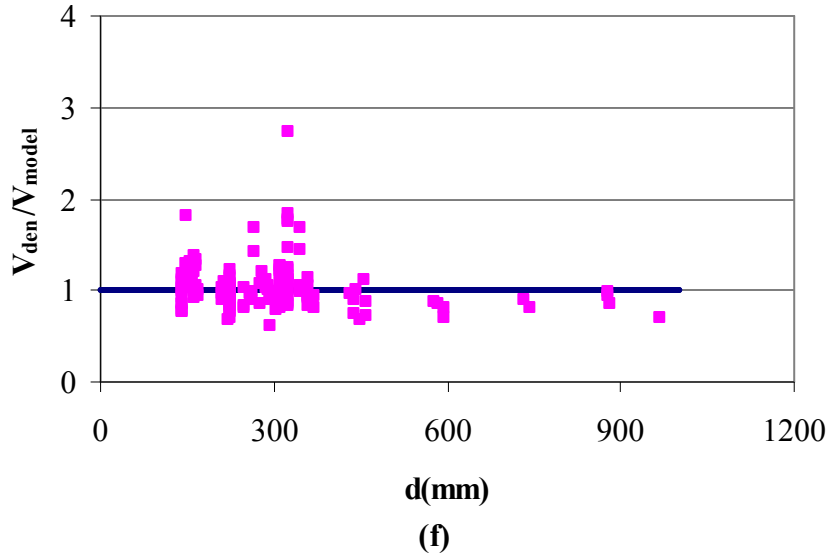


(d)

### BISE-99



### Önerilen Denklem



Şekil 6.10. (a-f) Kayma donatısız FRP donatılı elemanlarda deneysel sonuçların model sonuçlara olan oranının kesit yüksekliği ile değişimi

#### 6.3.3.2. Kayma donatılı betonarme kirişler

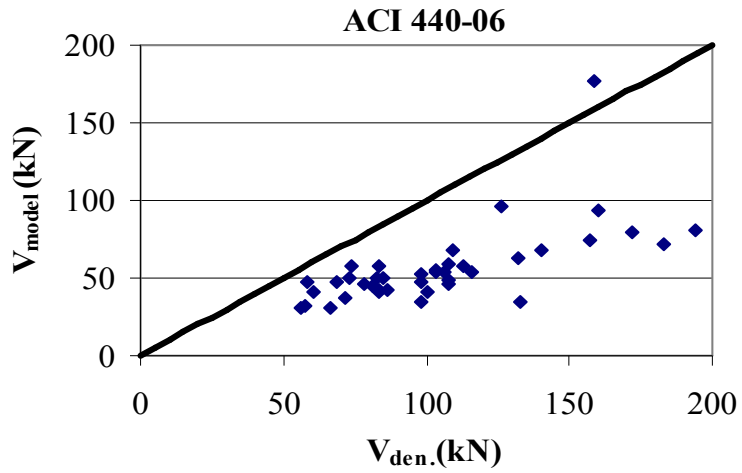
FRP boyuna ve kayma donatısına sahip betonarme kirişlerin kesme dayanımı için, farklı ülke yönetmelikleri ve bu çalışma kapsamında önerilen denklem aracılığı ile elde edilen değerlerin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Şekil 6.11(a-f)'de gösterilmiştir.

Deneysel olarak elde edilen kesme dayanımı değerlerinin teorik değerlere olan oranının ortalaması, standart sapması (SD) ve standart hata (AAE) değerlerinin karşılaştırılması da Çizelge 6.7’de sunulmuştur.

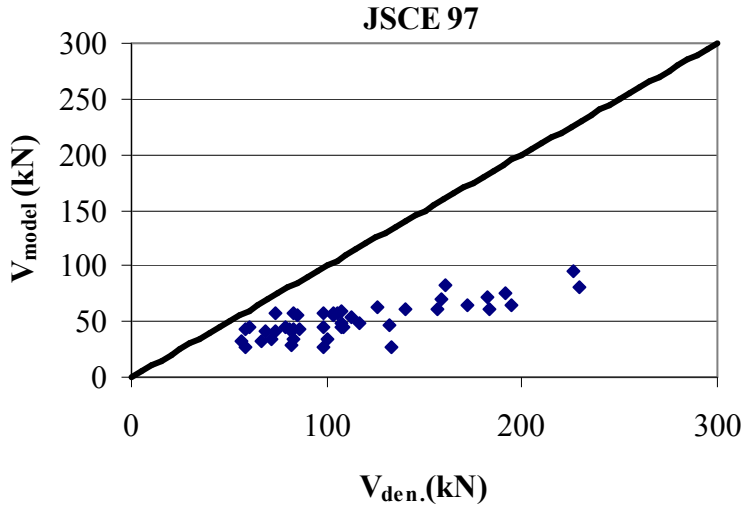
**Çizelge 6.7.** Kayma donatılı elemanlar için model ve önerilen denklemlere ait istatistiksel değerler

Model	$V_{den.}/V_{model}$			AAE(%)
	Ortalama	SD	COV (%)	
ACI 440.1R-06	1.8	0.61	33.62	49.017
CAN/CSA-S806-02	1.2	0.31	25.9	22.3
ISIS M03-07	2.1	0.83	39.35	46.49
JSCE-97	2.29	0.7	30.63	52.79
BISE-99	1.65	0.52	31.27	38.31
Önerilen Denklem	1.07	0.3	28.1	17.02

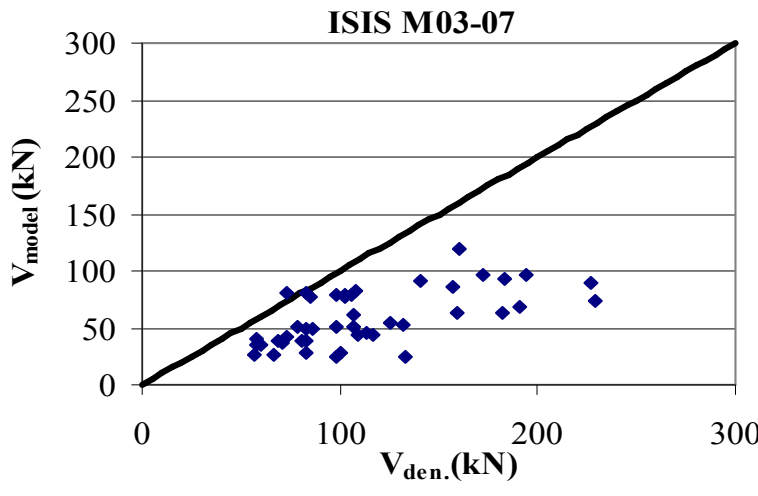
Şekil 6.11(a-f) ve Çizelge 6.7’den görüldüğü üzere, gerek ISIS-M03-07 gerekse JSCE-97 tarafından önerilen modeller, kesme dayanımı değerlerini gereksiz şekilde oldukça güvenli yönde vermektedir. Bu modellerin bu şekilde güvenli yönde sonuçlar vermesi,  $V_s$  değeri elde edilirken bu modellerin uygulanabilirliğini ortadan kaldırmaktadır. Bu iki yöntemin bu şekilde sonuçlar vermesinin temel nedeni, bu modeller hesaplanırken  $\varepsilon_{fv}$  değerinin elde edilmesinde kullanılan yöntemden kaynaklanmaktadır. (5.18b) ve (5.22b) denklemleri kullanılarak deneysel datalara ait, etriyelerde taşıma gücü anındaki şekil değiştirme değerleri elde edilmiş ve bu değerlerin 0.00038 ile 0.0035 arasında değişen oldukça düşük değerler olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu nedenle, gerek ISIS S806-02 gerekse JSCE-97 tarafından etriyelerin kesme dayanımı için önerilen denklemlerle elde edilen değerlerin kesme dayanımına olan katkısı oldukça düşük düzeyde kalmaktadır. Gerek ACI 440.1R-06 gerekse BISE-99 tarafından etriyelerin kesme dayanımına olan katkısı için önerilen denklemlerin daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Bununla birlikte CSA S806-02 tarafından verilen ve bu çalışmada önerilen denklemden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlara en yakın değerler verdiği görülmüştür.



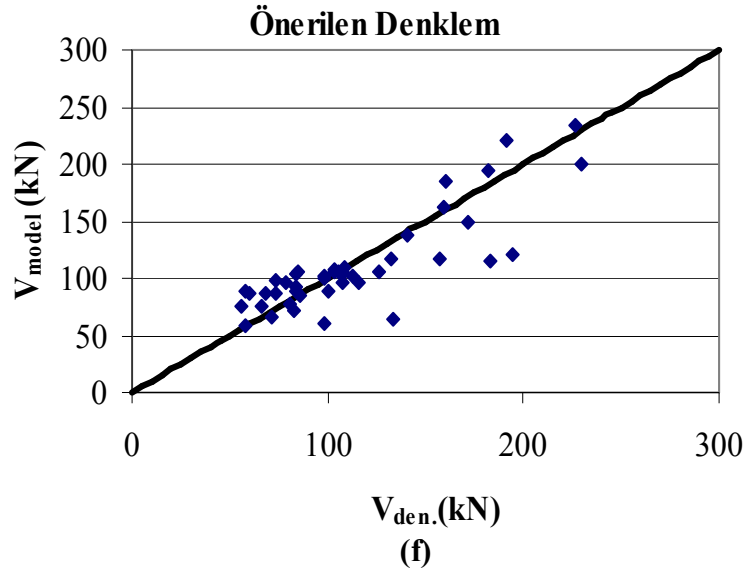
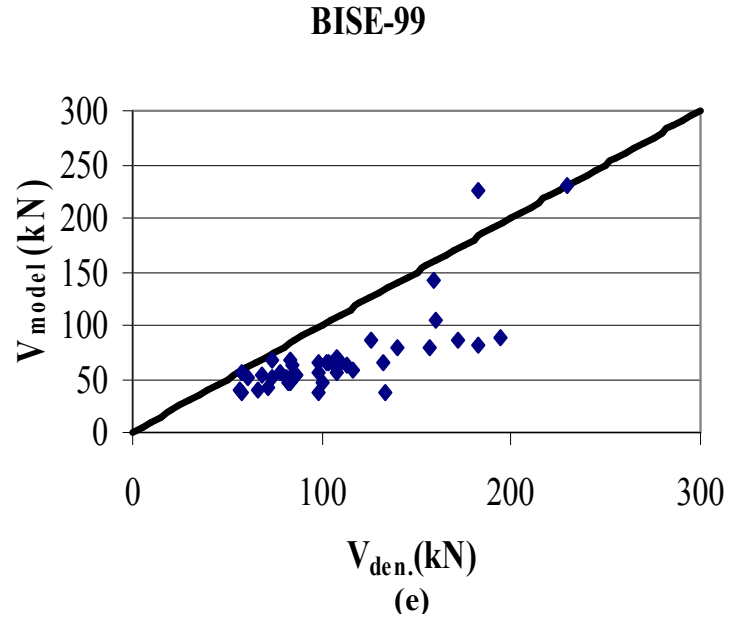
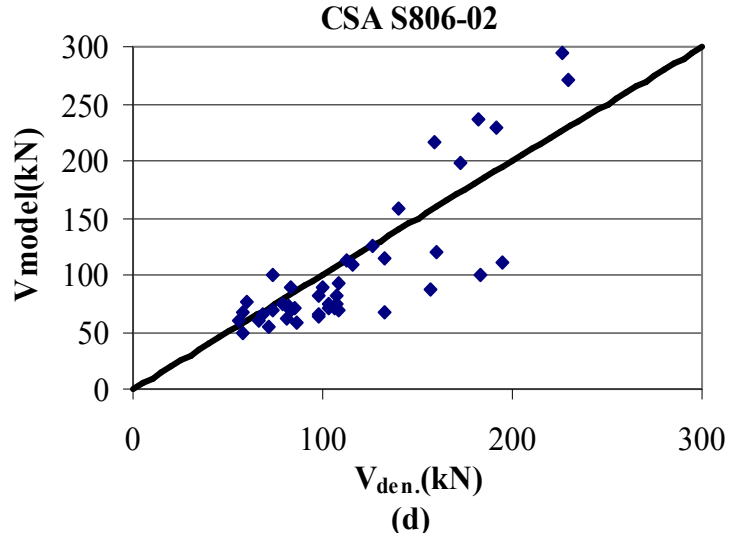
(a)



(b)



(c)



**Şekil 6.11. (a-f) FRP Kayma donatılı elemanlara ait deneysel sonuçlarla model sonuçlarının karşılaştırılması**

## BÖLÜM VII

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada FRP donatılı betonarme kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışı daha önceden geliştirilen bir bilgisayar programı aracılığı ile irdelenmiş, FRP donatısının kirişlerde oluşan deplasmanlar ve taşıma gücü momenti üzerine olan etkisi ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. FRP donatılı betonarme kirişlerin analizi sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Çalışmadan, gerek daha önceden geliştirilmiş olan nümerik yöntem, gerekse ACI, ISIS ve Bischoff tarafından önerilen atalet momentleri aracılığı ile elde edilen deplasmanların, genellikle deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Nümerik yöntem ve farklı modeller aracılığı ile elde edilen sonuçların özellikle çatlama öncesi ve sonrası deneysel sonuçlarla yakınlık içerisinde olduğu sonucuna ulaşılmış, kirişlere uygulanan yükün kırılma anındaki yüke yaklaşmasıyla birlikte nümerik yöntemin diğer modellere göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Betonarme kirişlerde, FRP çekme donatısı oranının artırılmasıyla, deplasmanların önemli derecede azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yapılan parametrik çalışma sonuçlarından GFRP donatılı kirişlerde, uygulanan yükler etkisi altında ilk çatlak oluşuktan sonra BFRP ve özellikle CFRP donatılı kirişlere göre daha büyük bir deplasmanlar oluştuğu görülmüştür.
- ACI tarafından önerilen denklemler aracılığı ile elde edilen taşıma gücü moment kapasitelerinin deneysel sonuçlardan çoğunlukla daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum, gerek ACI yönteminde basınç donatısının hesaplarda göz önüne alınmamasından gerekse aynı modelde betonun ezilme birim kısalmasına ulaştığı anda en dış basınç lifindeki şekil değiştirme değerinin 0.003 kabul edilmesinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.
- FRP donatılı kiriş kesitinin denge altı olması durumunda beton basınç dayanımının taşıma gücü momenti üzerinde önemli bir etkiye sahip olmazken, kesitin denge üstü olması halinde beton basınç dayanımının önemli bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir.

- Eğilme analizine ait sonuçlar basit mesnetli kiriş örneklerinden elde edilen sonuçlar olup, özellikle kirişlerin iki veya daha fazla açıklıklı sürekli kiriş olması durumları için de elde edilecek sonuçların değerlendirilmesi gerekmektedir. Özellikle FRP donatılı sürekli kirişlerde, orta mesnet civarında kesitin üst kısmında oluşacak çatlamlara bağlı olarak davranışın daha detaylı bir şekilde araştırılması gerekmektedir.

Bu çalışmada ayrıca FRP ve çelik donatı içeren hibrit FRP-çelik-donatılı kirişlerin eğilme etkisi altındaki davranışı da irdelenmiştir. Hibrit FRP-çelik-donatılı kirişlerin eğilme etkisi altındaki analizi ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Daha önceden geliştirilmiş olan nümerik yöntem kullanılarak yapılan çalışma sonuçlarından, hibrit betonarme kirişlerde kırılma türünün denge üstü kırılma olması durumunda moment eğrilik ilişkisinin 3 kısımdan oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durumda ilk kısmın çatlak oluşana kadar olan eğriden oluştuğu, ikinci kısmın kesit içerisindeki çeliğin akma anına kadar olan eğri ve en son kısmın ise betonun ezilme birim kısalması anına kadar oluşan eğriden oluştuğu gözlemlenmiştir.

- FRP donatılı kiriş içerisine çelik donatı eklenmesiyle kirişin hem sünekliliği hem de rijitliğinin arttığı görülmüştür.

- Hibrit donatılı kirişlerde kesit için denge üstü donatılı tasarımın benimsenmesi, gerek FRP donatısını kırılmaya götürecekt aşırı deformasyonların önlenmesi gerekse sünek bir davranış gösterebilmesi açısından tavsiye edilmektedir.

Çalışma kapsamında FRP donatısı içeren betonarme kirişlerin kesme dayanımı farklı ülke yönetmelikleri ve standartlar tarafından önerilen modeller aracılığı ile elde edilerek bu modellerin karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımı için gerek beton gerekse kayma donatılarının katkısını da içerecek şekilde denklemler önerilmiş ve bu denklemlerin diğer yönetmelikler tarafından önerilen modellerle karşılaştırması da yapılmıştır. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

- ACI 440.1R-06 tarafından FRP donatılı kirişlerin kesme dayanımına ait beton katkısı için önerilen denklemden elde edilen değerlerin tüm modeller içinde gereğinden fazla

güvenli yönde sonuçlar verdiği görülmüştür. Bununla birlikte ISIS–M03-07 tarafından önerilen denklemin kesme dayanımını etkileyen tüm parametreleri denklemde göz önünde bulundurmamasına karşın yine de uygun sonuçlar verdiği görülmüştür. BISE tarafından önerilen denklemin de yönetmelikler içerisinde en uygun sonucu verdiği gözlemlenmiştir.

- Çalışma kapsamında FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımlarına ait gerek beton gerekse kayma donatısı katkısı için önerilen denklemlerin uygun sonuçlar verdiği görülmüştür.
- ISIS ve JSCE tarafından FRP donatılı betonarme kirişlerin kesme dayanımına ait kayma donatısı katkısı için önerilen modellerden elde edilen değerlerin, kirişlerin toplam kesme dayanımına olan katkısının oldukça düşük düzeyde olduğu bu nedenle bu modellerin deneysel sonuçlara göre oldukça düşük değerler verdiği görülmüştür.

## KAYNAKLAR

Abdalla, H.A., “Evaluation of deflection in concrete members reinforced with fibre reinforced polymer (FRP) bars”, *Journal of Composite Structures* 56(1), 63–71, 2002.

Aiello, M.A. and Ombres, L., “Structural performances of concrete beams with hybrid (fiber reinforced polymer-steel) reinforcements”, *Journal of Composite for Construction* 6(2), 133–140, 2002.

Alkhrdaji, T., Wideman, M., Belarbi, A., and Nanni, A., “Shear strength of GFRP RC beams and slabs”, *Proceedings of the international conference, composites in construction-CCC 2001*, Porto/Portegiz, 409–414, 2001.

AlMusallam, T.H., Al-Salloum, Y.A., Alsayed, S.H. and Amjad, M.A., “Behavior of concrete beams doubly reinforced by FRP bars”, *Proceedings of the third international symposium on non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures (FRPRCS-3):2*, Japonya, 471–478, 1997.

Alsayed, S., Al-Salloum, Y., Almusallam, T. and Amjad M., “Evaluation of shear stresses in concrete beams reinforced by FRP bars”, *Proceeding of the Second International Conference on Advanced Composite Materials for Bridges and Structures (ACMBS-II)*, Montreal Quebec, Kanada 173-179, 1996.

Alsayed, S., Al-Salloum, Y. and Almusallam, T., “Shear design of GFRP bars”, *Proceeding of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) reinforcement for concrete structures:2*, Sapporo, Japonya, 285-292, 1997.

Alsayed, S.H., “Flexural behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars”, *Cement and Concrete Composite* 20(1), 1–11, 1998.

Alsayed, S.H., Al-Salloum, Y.A. and Almusallam, T.H., “Performance of glass fiber reinforced plastic bars as a reinforcing material for concrete structures”, *Composite Part* 31, 555–567, 2000.

American Concrete Institute (ACI)., “Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars”, *Technical Committee Document No. 440.1R-06*, Farmington Hills, Mich, 2006.

Ashour, A.F. and Family, M., “Tests of concrete flanged beams reinforced with CFRP bars”, *Magazine Concrete of Research* 58(9), 627–639, 2006.

Ashour, A.F., “Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars”, *Construction and Building Materials* 20, 1005–1015, 2006.

Ashour, A.F. and Habeeb, M.N., “Continuous concrete beams reinforced with CFRP bars”, *Structural Building* SB6, 349–357, 2008.

Barris, C., Torres, L.I. and Turon, A., Baena, M., Catalan, A., “An experimental study of the flexural behaviour of GFRP RC beams and comparison with prediction models”, *Composite Structures* 91, 286–295, 2009.

Benmokrane, B., Chaallal, O. and Masmoudi, R., “Glass fibre reinforced plastic (GFRP) rebars for concrete structures”, *Construction and Building Materials* 9(6), 353–364, 1995.

Benmokrane, B., Chaallal, O. and Masmoudi, R., “Flexural response of concrete beams reinforced with FRP reinforcing bars”, *ACI Structural Journal* 91(2), 46–55, 1996.

Bischoff, P.H., “Reevaluation of deflection prediction for concrete beams reinforced with steel and fiber–reinforced polymer bars”, *Journal of Structural Engineering*, 131(5), 752–67, 2005.

British Institution of Structural Engineers (BISE)., “Interim guidance on the design of reinforced concrete structures using fiber composite reinforcement”, *IstructE, SETO Ltd.*, London, 1999.

Brown, V.L. and Bartholomew, C.L., “FRP reinforcing bars in reinforced concrete members”, *ACI Materials Journal* 90(1), 34–93, 1993.

Canadian Standards Associations (CSA)., “Design and construction of building components with fibre-reinforced polymers”, *Canadian Standards S806-02*, Rexdale, Ontario, Kanada, 2002.

Deitz, D.H., Harik, I.E. and Gesund, H., “One-way slabs reinforced with glass fiber reinforced polymer reinforcing bars”, *Proceedings of the 4th international symposium, fiber reinforced polymer reinforcement for reinforced concrete structures*, MI, 279–286, 1999.

Duranovic, N., Pilakoutas, K. and Waldron, P., “Tests on concrete beams reinforced with glass fibre reinforced plastic bars”, *Proceedings of the third international symposium on non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures (FRPRCS 3)*:2, Japonya, 479–486, 1997.

El-Sayed, A.K., El-Salakawy, E.F. and Benmokrane, B., “Shear strength of one way concrete slabs reinforced with FRP composites bars”, *Journal of Composite for Construction* 9(2), 147–157, 2005.

El-Sayed, A.K., El-Salakawy, E.F. and Benmokrane, B., “Shear strength of FRP-reinforced concrete beams without transverse reinforcement”, *ACI Structural Journal* 103(2), 235–243, 2006.

El-Sayed, A.K., El-Salakawy, E.F. and Benmokrane, B., “Shear capacity of high-strength concrete beams reinforced with FRP bars”, *ACI Structural Journal* 103(3), 383–389, 2006.

Ersoy, U. ve Özcebe G., “Betonarme” *Evrım Yayınevi*, İstanbul, 2012.

Grace, N.F., Soliman, A.K., Abdel-Sayed, G. and Saleh, K.R., “Behavior and ductility of simple and continuous FRP reinforced beams”, *Journal of Composite for Construction* 2(4), 186–194, 1998.

Fico, R., “Limit States Design of Concrete Structures Reinforced with FRP Bars”, PhD Thesis, *University of Naples Federico II*, 2006.

Gross, S.P., Yost, J.R., Dinehart, D.W., Svensen, E. and Liu, N., “Shear strength of normal and high strength concrete beams reinforced with GFRP reinforcing bars”, *Proc of the Int Conference on High Performance Materials in Bridges*, ASCE, 426–437, 2003.

Gross, S.P., Dinehart, D.W., Yost, J.R. and Theisz, P.M., “Experimental tests of high-strength concrete beams reinforced with CFRP bars”, *Proceedings of the 4th international conference on advanced composite materials in bridges and structures (ACMBS-4)*, Calgary, Alberta, Kanada, 8, 20-23 Temmuz 2004.

ISIS Canada., “Reinforcing concrete structures with fiber reinforced polymers”, *ISIS-M03-07, Canadian network of centers of excellence on intelligent sensing for innovative structures*, Univ. of Winnipeg, Winnipeg, Man, 2007.

Japan Society of Civil Engineers (JSCE)., Machida, A., editor, “Recommendations for design and construction of concrete structures using continuous fibre reinforced materials”, *Concrete Engineering Series 23*, Tokyo, Japonya, 1997.

Kara, I.F. and Ashour A.F., “Flexural performance of FRP reinforced concrete beams”, *Composite Structures*, 94, 1616–1625, 2012.

Kara, I.F. and Ashour A.F., “Flexural behaviour of hybrid FRP/steel reinforced concrete beams”, *Composite Part:B (incelemede)*, 2014.

Kassem, C., Farghaly, A.S. and Benmokrane, B., “Evaluation of flexural behavior and serviceability performance of concrete beams reinforced with FRP Bars”, *Journal of Composite for Construction* 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000216, 2011.

Lubell, A., Sherwrvod, T., Bents, E. and Collins, M.P., “Safe shear design of large”, *Wide Beams Concrete International* 26(1), 67–79, 2004.

Masmoudi, R., Thériault, M. and Benmokrane, B., “Flexural behavior of concrete beams reinforced with deformed fiber reinforced plastic reinforcing rods”, *ACI Structural Journal* 95(6), 665–676, 1998.

Matta, F., Nanni, A., Hernandez, T.M. and Benmokrane, B., “Scaling of strength of FRP reinforced concrete beams without shear reinforcement”, *Fourth international conference on FRP composites in civil engineering (CICE 2008)*, Zurich, İsviçre, 6, 2008.

Mizukawa, Y., Sato, Y., Ueda, T. and Kakuta, Y., “A study on shear fatigue behavior of concrete beams with FRP rods”, *Proceedings of the third international symposium on non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures (FRPRCS-3)*, Japan Concrete Institute, Sapporo, Japonya, 2, 309–316, 1997.

Mostafa, E.M., Amr, E.R. and Ehab, E.S., “Flexural behavior of continuous FRP reinforced concrete beams”, *Journal of Composite for Construction* 14(6), 669–680, 2010.

Nagasaka, T., Fukuyama, H. and Tanigaki, M., “Shear performance of concrete beams reinforced with FRP stirrups”, *American Concrete Institute ACI SP-138*, Detroit, Mich, 789–811, 1993.

Nakamura, H. and Higai, T., 1995a “Evaluation of shear strength of RC beam section based on extended modified compression field theory”, *Concrete Library International Process Japanese Society of Civil Engineering* 25, 93–105, 1995.

Nakamura, H. and Higai, T., 1995b “Evaluation of shear strength of concrete beams reinforced with FRP”, *Concrete Library International Process Japanese Society of Civil Engineering* 26, 111–123, 1995.

Ovitigala, T., “Structural behavior of concrete beams reinforced with basalt fiber polymer (BFRP) bars” Doktora Tezi, *Illinois Üniversitesi*, Illinois, Chicago, 2012.

Pecce, M., Manfredi, G. and Cosenza, E., “Experimental response and code models of GFRP RC beams in bending”, *Journal of Composite for Construction* 4(4), 182–190, 2000.

Rafi, M.M., Nadjai, A., Ali, F. and Talamona, D., “Aspects of behaviour of CFRP reinforced concrete beams in bending”, *Construction and Building Materials* 22, 277–285, 2008.

Razaqpur, A.G., Isgor, B.O., Greenaway, S. and Selley, A., “Concrete contribution to the shear resistance of fiber reinforced polymer reinforced concrete members”, *Journal of Composite for Construction* 8(5), 452–460, 2004.

Shehata, E., “Fibre-reinforced polymer (FRP) for shear reinforcement in concrete structures” Doktora Tezi, *Manitoba Üniversitesi*, Winnipeg, Manitoba, 1999.

Swamy, N. and Aburawi, M., “Structural implications of using GFRP bars as concrete reinforcement”, *Proceedings of the third international symposium on nonmetallic (FRP) reinforcement for concrete structures (FRPRCS-3)*, vol. 2, *Japan Concrete Institute*, Sapporo, Japonya, 503–510, 1997.

Tariq, M. and Newhook, J.P., “Shear testing of FRP reinforced concrete without transverse reinforcement”, *Proceedings of CSCE 2003-annual conference*, Moncton, NB, Kanada, 10, 2003.

The´riault, M. and Benmokrane, B., “Effects of FRP reinforcement ratio and concrete strength on flexural behavior of concrete beams”, *Journal of Composite for Construction* 2(1), 7–16, 1998.

Thiagarajan, G., “Experimental and analytical behavior of carbon fiber-based rods as flexural reinforcement” *Journal of Composite for Construction* 7(1), 64–72, 2003.

Tottori, S. and Wakui, H., “Shear capacity of RC and PC beams using FRP reinforcement”, *Fiber-reinforced-plastic reinforcement for concrete structures*, SP-138, Detroit, *American Concrete Institute*, 615–632, 1993.

Toutanji, H.A. and Saafi, M., “Flexural behavior of concrete beams reinforced with glass fiber-reinforced polymer (GFRP) bars” *ACI Structural Journal* 97(5), 712–719, 2000.

Tureyen, A.K. and Frosch, R.J., “Shear tests of FRP-reinforced concrete beams without stirrups”, *ACI Structural Journal* 99(4), 427–434, 2002.

Yavuz, G., “Lif Takviyeli Polimerlerin Betonarme Kirişlerde Donatı Olarak Kullanımı”, “Inetnational Participated Construction Congress” *Elazığ Fırat Üniversitesi* Elazığ/Türkiye 2011.

Yost, J.R., Goodspeed, C.H. and Schmeckpeper, E.R., “Flexural performance of concrete beams reinforced with FRP grids” *Journal of Composite for Construction* 5(1), 18–25, 2001.

Yost, J.R., Gross, S.P. and Dinehar, D.W., “Shear strength of normal strength concrete beams reinforced with deformed GFRP bars”, *Journal of Composite for Construction* 5(4), 268–275, 2001.

Zhao, W., Mayama, K. and Suzuki, H., “Shear behaviour of concrete beams reinforced by FRP rods as longitudinal and shear reinforcement”, *Proceedings of the second international RILEM symposium on non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures (FRPRCS-2)*, Ghent, Belçika, 352–359, 1995.

## ÖZ GEÇMİŞ

Fatih Cullazoğlu 1975 tarihinde Niğde’de doğdu. İlk orta ve lise öğretimini Niğde’de tamamladı. 1993 yılında girdiği İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden Temmuz 1997’de mezun oldu.

1971 yılında Niğde’de aile şirketi olarak kurulan Cullazoğlu İnşaat ve Taahhüt firmasında dönemsel olarak proje sorumluluğu, şantiye şefliği gibi çeşitli teknik ve idari görevler aldı.

2000 yılında Niğde’de kurulan Cullazoğlu Mühendislik bünyesinde projelendirme, proje-emlak danışmanlık hizmetlerinde bulundu. Gayrimenkul değerleme, mühendislik ve müşavirlik hizmetleri, inşaat-taahhüt ve yap-sat alanlarında faaliyet gösteren Cullazoğlu İnşaat-Taahhüt ve Mühendislik firmasında gayrimenkul değerleme, proje danışmanlık ve yapı mühendisliği hizmetlerini yürüttü. Hakediş, metraj, keşif ve raporlama konularında görev aldı.

2010-2011 Öğretim yılında Niğde Üniversitesi Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans öğrenimine başladı.

İş güvenliği uzmanlığı, yapı denetim proje ve uygulama denetimi, riskli yapıların analizi, enerji kimlik belgesi uzmanlığı alanlarında uzmanlık belgelerine sahip olan Fatih Cullazoğlu halen serbest İnşaat Mühendisi olarak çalışmaktadır.

