

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FRP İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERİN
BURULMA DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Müh. Onur ÖZTÜRK

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Şevket ÖZDEN

KOCAELİ, 2007

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**FRP ile GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERİN
BURULMA DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnşaat Müh. Onur ÖZTÜRK

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 4 Haziran 2007

Tezin Savunulduğu Tarih: 26 Haziran 2007

Tez Danışmanı Yrd.Doç.Dr.Şevket ÖZDEN (.....)	Üye Yrd.Doç.Dr.Fuat OKAY (.....)	Üye Yrd.Doç.Dr.S.Taner YILDIRIM (.....)
Üye Prof.Dr.Uğur ERSOY (.....)	Üye Doç.Dr.Alper İLKİ (.....)	

KOCAELİ,2007

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

FRP ile güçlendirilmiş betonarme kirişlerin basit burulma momenti etkisi altındaki davranışlarını incelemek amacıyla yapılmış olan deneysel çalışma Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma boyunca desteğini ve bilgisini benden esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Şevket ÖZDEN'e, deneylerde benimle birlikte çalışan Arş. Gör. Serkan ENGİN'e ve numunelerin hazırlanmasında bana yardım eden inşaat mühendisliği bölümü lisans öğrencilerine teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca gösterdikleri maddi ve manevi destek, ilgi ve anlayışları için AİLEME, yakınlarıma, ablam Betül ÖZTÜRK, teyzem Sibel ARCAN'a ve yüksek öğrenim hayatım boyunca yanımda bulunan nişanlıma teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	viii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR.....	xi
ÖZET	xiv
İNGİLİZCE ÖZET.....	xv
1. GİRİŞ	1
2. BASİT BURULMA DAVRANIŞI VE TEORİLERİ	3
2.1. Basit Burulma Davranışı	3
2.2. Burulma Teorileri.....	11
2.2.1. Uzay kafes analogisi	11
2.2.2. Elastik ve plastik teori.....	15
2.2.3. Yanal eğilme teorisi	18
2.3. Yönetmeliklere Göre Basit Burulma ve Donatı Hesabı.....	23
2.3.1. TS500/Şubat 2000 yönetmeliğine göre basit burulma ve donatı hesabı.....	23
2.3.2. ACI 318-02 yönetmeliğine göre basit burulma ve donatı hesabı.....	24
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	27
3.1. Güçlendirilmemiş Betonarme Kirişlerde Basit Burulma Deneyleri	27
3.1.1. A. Csikos ve I. Hegedus.....	27
3.1.2. Atef H. Bakhsh ve diğerleri	28
3.1.3. L. J. Rasmussen ve G. Baker.....	31
3.1.4. Nasr-Eddine Koutchoukali ve Abdeldjelil Belarbi	33
3.2. Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerde Basit Burulma Deneyleri	36
3.2.1. Güçlendirmede lif takviyeli polimerler (FRP) ve teknik özellikleri.....	36
3.2.2. Saravanan Panchacharam ve Abdeldjelil Belarbi	39
3.2.3. Constantin E. Chalioris	43
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	47
4.1. Malzeme Özellikleri.....	47
4.1.1. Agregalar.....	47
4.1.2. Çimento	48
4.1.3. Hiperakışkanlaştırıcı	50
4.1.4. Donatı çeliği	50
4.1.5. Lif takviyeli polimerler	52
4.2. Numune Özellikleri.....	55
4.2.1. Numune boyutları	55
4.2.2. Beton dökümü	56
4.2.3. Deney değişkenleri.....	59
4.2.4. Numunelerin adlandırılması.....	62
4.3. Malzeme Dayanımları.....	64
4.3.1. Beton kiriş eğilme deneyi	64

4.3.2. Silindir yarma deneyi	65
4.3.3. Silindir basınç deneyi.....	67
4.4. Deney Düzenegi.....	67
4.4.1. Okuma noktaları.....	69
5. DENEY SONUÇLARI	72
5.1. Burulma Momenti – Birim Dönme Açısı İlişkisi.....	72
5.2. Burulma Momenti – Toplam Boy Uzama İlişkisi.....	80
6. DENEY VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ	86
6.1. Çatlak Dağılımının Değerlendirilmesi	86
6.2. Burulma Momenti – Birim Dönme Açısı Grafiklerinin Değerlendirilmesi.....	89
6.2.1. NDB kırışlerde enine sargılamanın etkisi	89
6.2.2. YDB kırışlerde enine sargılamanın etkisi	97
6.2.3. NDB kırışlerde boyuna yapıştırmanın etkisi.....	102
6.2.4. YDB kırışlerde boyuna yapıştırmanın etkisi.....	109
6.3. Burulma Momenti – Toplam Boy Uzama Grafiklerinin Değerlendirilmesi.....	116
6.3.1. NDB kırışlerde toplam boy uzama etkisi.....	116
6.3.2. YDB kırışlerde toplam boy uzama etkisi	118
7. ANALİTİK MODELİN DEĞERLENDİRİLMESİ.....	120
7.1. Burulma Teorileri ile Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	120
7.2. Önerilen Analitik Model	123
7.2.1. Çatlama momentinin hesabı için önerilen analitik model.....	123
7.2.2. Burulma momenti kapasitesi hesabı için önerilen analitik model	127
7.3. Analitik Model Karşılaştırması	139
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	145
KAYNAKLAR	148
ÖZGEÇMİŞ	151

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Burulma etkisi ile eleman üzerinde oluşan kayma gerilmeleri ve asal gerilmeler (Ersoy, 1975)	4
Şekil 2.2: Çeşitli izostatik ve hiperstatik sistemler için denge burulması örnekleri (Ersoy, 1985).....	5
Şekil 2.3: İki farklı sistem için uygunluk burulması örnekleri (Ersoy, 1985).....	6
Şekil 2.4: Basit burulma altındaki donatılı bir kirişte gözlenen çatlaklar (Celep ve Kumbasar 1996)	7
Şekil 2.5: Basit burulma altındaki betonarme kirişlerde burulma momenti-birim dönme açısı ilişkisi (Dr.Hsu, PCA Deneyleri).....	8
Şekil 2.6: Enine ve boyuna donatılarda ölçülen birim uzamalar (Dr. Hsu, PCA Deneyleri).....	10
Şekil 2.7: Elastisite ve plastisiteye göre kesitte burulma nedeni ile oluşan gerilme dağılımı (Ersoy, 1985).....	11
Şekil 2.8: Dolu ve boşluklu kesitlerde taşınan burulma momenti-donatı oranı grafiği (Leet ve Bernal, 1997)	12
Şekil 2.9: Boşluklu kesit analogisi modeli (MacGregor ve Ghoneim, 1995).....	12
Şekil 2.10: Uzay kafes analogisi modeli (Macgregor ve Ghoneim,1995).....	13
Şekil 2.11: Uzay kafes analogisinde temsil edilen kuvvetler	13
Şekil 2.12: Her bir F kuvvetinin yapı elemanı üzerinde oluşturacağı burulma momenti	14
Şekil 2.13: Çeşitli deneylerden elde edilen çatlama momenti değerlerinden plastik teori kullanılarak elde edilen kayma gerilmeleri grafiği (Ersoy, 1975).....	20
Şekil 2.14: Çeşitli deneylerden elde edilen çatlama momenti değerlerinden elastik teori kullanılarak elde edilen kayma gerilmeleri grafiği (Ersoy, 1975).....	21
Şekil 2.15: Çeşitli deneylerden elde edilen çatlama momenti değerlerinden yanal eğilme teorisi kullanılarak elde edilen kayma gerilmeleri grafiği (Ersoy, 1975).....	22
Şekil 3.1: Burulma momenti beton basınç dayanımı ilişkisi (Bakhsh ve diğ., 1990)	30
Şekil 3.2: Burulma momenti birim dönme ilişkisi (Bakhsh ve diğ., 1990)	30
Şekil 3.3: Farklı dayanımlardaki numuneler için burulma momenti – çatlak genişliği ilişkisi (Rassmussen ve Baker, 1995).....	32
Şekil 3.4: Normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonarme kirişler için burulma momenti – birim dönme ilişkisi (Rassmussen ve Baker, 1995)	33
Şekil 3.5: Birinci grup numuneler için burulma momenti – birim dönme açısı ilişkisi (Koutchoukali ve Belarbi, 2001).....	35
Şekil 3.6: İkinci grup numuneler için burulma momenti – birim dönme açısı ilişkisi (Koutchoukali ve Belarbi, 2001).....	35

Şekil 3.7: Yapısal güçlendirmede kullanılan liflerin gerilme – birim deformasyon eğrileri (Gerritse ve Schurhoff, 1986).....	38
Şekil 3.8: Lif düzeni etkisine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafiği (Panchacharam ve Belarbi, 2002).....	40
Şekil 3.9: Sürekli ve aralıklı sargılamanın etkisine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafiği (Panchacharam ve Belarbi, 2002).....	41
Şekil 3.10: Her iki yönde beraber yapılan sargılamanın etkisine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafiği (Panchacharam ve Belarbi, 2002).....	41
Şekil 3.11: Dikdörtgen kesitli “a” grubu kirişlere ait burulma momenti – birim dönme açısı grafiği (Chalioris, 2006).....	45
Şekil 3.12: Dikdörtgen kesitli “b” grubu kirişlere ait burulma momenti – birim dönme açısı grafiği (Chalioris, 2006).....	45
Şekil 3.13: Tablalı kirişlere ait burulma momenti – birim dönme açısı grafiği (Chalioris, 2006).....	46
Şekil 4.1: Deneylerde kullanılan donatı (d = 8 mm).....	51
Şekil 4.2: Çelik çekme makinesi.....	51
Şekil 4.3: Donatı çeliğine ait gerilme - birim deformasyon eğrisi.....	51
Şekil 4.4: Kullanılan FRP’ler (a) GFRP, (b) CFRP-N ve (c) CFRP-H.....	52
Şekil 4.5: Numunelere ait boyut ve donatı özellikleri (ölçüler mm cinsinden verilmiştir).....	56
Şekil 4.6: Beton dökümü için hazırlanan kiriş kalıpları.....	57
Şekil 4.7: Numunelerin pahlanması.....	58
Şekil 4.8: Kiriş sıkılaştırma bölgesine takılan çelik kafes.....	59
Şekil 4.9: Boyuna yapıştırma (a ve c) ve enine (b ve d) sargılama detayları.....	61
Şekil 4.10: Deney değişkenlerinin şematik gösterimi.....	61
Şekil 4.11: Numunelerin adlandırılmasının şematik gösterimi.....	62
Şekil 4.12: Karşılaştırma numunesinin adlandırılmasının şematik gösterimi.....	63
Şekil 4.13: Eğilme kirişi numune kalıpları.....	65
Şekil 4.14: Beton kiriş eğilme deneyi.....	65
Şekil 4.15: Silindir numune kalıpları.....	66
Şekil 4.16: (a)Silindir yarma deneyi (b) Silindir basınç deneyi.....	66
Şekil 4.17: (a) Burulma deneyi düzeneği, (b) Burulma deneyi düzeneği şematik gösterimi.....	68
Şekil 4.18: Birim dönme açısının belirlenmesi amacıyla kullanılan 4 elektronik komparatörlerin yerleşimi.....	70
Şekil 4.19: Toplam boy uzamanın belirlenmesi amacıyla kullanılan 2 elektronik komparatörlerin yerleşimi (numunenin yandan görünüşü).....	71
Şekil 5.1: A grubu numunelere ait 1. ve 2. karşılaştırma numunesinin burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri.....	74
Şekil 5.2: A-N1G-L0 ve A-N1G-L1G numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri.....	74
Şekil 5.3: A-N2G-L0 ve A-N2G-L1G numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri.....	75
Şekil 5.4: A-N1CN-L0 ve A-N1CN-L1CN numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri.....	75
Şekil 5.5: A-N1CH-L0 ve A-N1CH-L1CH numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri.....	76

Şekil 5.6: A-N1G-L1CN ve A-N1G-L1CH numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri	76
Şekil 5.7: B grubu numunelere ait 1. ve 2. karşılaştırma numunesinin burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri	77
Şekil 5.8: B-N1G-L0 ve B-N1G-L1G numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri	77
Şekil 5.9: B-N2G-L0 ve B-N2G-L1G numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri	78
Şekil 5.10: B-N1CN-L0 ve B-N1CN-L1CN numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri	78
Şekil 5.11: B-N2CN-L0 ve B-N2CN-L1CN numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri	79
Şekil 5.12: B-N1CH-L0 ve B-N1CH-L1CH numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri	79
Şekil 5.13: B-N1G-L1CN ve B-N1G-L1CH numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri	80
Şekil 5.14: A grubu numunelere ait 1. ve 2. karşılaştırma numunesinin burulma momenti – toplam boy uzama grafiği	81
Şekil 5.15: A-N1G-L0, A-N2G-L0, A-N1G-L1G ve A-N2G-L1G numunelerine ait burulma momenti – toplam boy uzama grafiği	81
Şekil 5.16: A-N1CN-L0, A-N1CN-L1CN, A-N1CH-L0 ve A-N1CH-L1CH numunelerine ait burulma momenti – toplam boy uzama grafiği	82
Şekil 5.17: A-N1G-L1CN ve A-N1G-L1CH numunelerine ait burulma momenti – toplam boy uzama grafiği	82
Şekil 5.18: B grubu numunelere ait 1. ve 2. karşılaştırma numunesinin burulma momenti – toplam boy uzama grafiği	83
Şekil 5.19: B-N1G-L0, B-N2G-L0, B-N1G-L1G ve B-N2G-L1G numunelerine ait burulma momenti – toplam boy uzama grafiği	83
Şekil 5.20: B-N1CN-L0, B-N2CN-L0, B-N1CN-L1CN ve A-N2CN-L1CN numunelerine ait burulma momenti – toplam boy uzama grafiği	84
Şekil 5.21: B-N1CH-L0 ve B-N1CH-L1CH numunelerine ait burulma momenti – toplam boy uzama grafiği	84
Şekil 5.22: B-N1G-L1CN ve B-N1G-L1CH numunelerine ait burulma momenti – toplam boy uzama grafiği	85
Şekil 6.1: NDB giriş çatlak dağılımı	87
Şekil 6.2: YDB giriş çatlak dağılımı	87
Şekil 6.3: A-N1CN-L0 numunesinin $\varnothing=0.10$ rad/m anındaki çatlak dağılımı	88
Şekil 6.4: A-N1CN-L1CN numunesinin $\varnothing=0.10$ rad/m anındaki çatlak dağılımı... ..	89
Şekil 6.5: A-REF 1, A-REF 2, A-N1G-L0 ve A-N2G-L0 numunelerinin burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri	91
Şekil 6.6: A-REF 1, A-REF 2 ve A-N1CN-L0 numunelerinin burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri	93
Şekil 6.7: Yüksek elastisite modüllü karbon elyafın çatlakla birlikte açılması durumu	95
Şekil 6.8: A-REF 1, A-REF 2 ve A-N1CH-L0 numunelerinin burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri	95
Şekil 6.9: Enine sargılanmış normal dayanımlı betonarme girişlere ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri	96

Şekil 6.10: B-REF 1, B-REF 2, B-N1G-L0 VE B-N2G-L0 numunelerinin burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri	98
Şekil 6.11: B-REF 1, B-REF 2, B-N1CN-L0 ve B-N2CN-L0 numunelerinin burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri	99
Şekil 6.12: B-REF 1, B-REF 2 ve B-N1CH-L0 numunelerinin burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri	101
Şekil 6.13: Enine sargılanmış yüksek dayanımlı betonarme kirişlere ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri	102
Şekil 6.14: A-REF 1, A-REF 2, A-N1G-L0, A-N1G-L1G, A-N2G-L0 ve A-N2G-L1G numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri.....	103
Şekil 6.15: A-REF 1, A-REF 2, A-N1CN-L0 ve A-N1CN-L1CN numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri	105
Şekil 6.16: A-REF 1, A-REF 2, A-N1CH-L0 ve A-N1CH-L1CH numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri	107
Şekil 6.17: A-REF 1, A-REF 2, A-N1G-L0, A-N1G-L1G, A-N1G-L1CN ve A-N1G-L1CH numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri.....	108
Şekil 6.18: B-REF 1, B-REF 2, B-N1G-L0, B-N1G-L1G, B-N2G-L0 ve B-N2G-L1G numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri.....	111
Şekil 6.19: B-REF 1, B-REF 2, B-N1CN-L0, B-N1CN-L1CN, B-N2CN-L0 ve B-N2CN-L1CN numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri.....	112
Şekil 6.20: B-REF 1, B-REF 2, B-N1CH-L0 ve B-N1CH-L1CH numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri	114
Şekil 6.21: B-REF 1, B-REF 2, B-N1G-L0, B-N1G-L1G, B-N1G-L1CN ve B-N1G-L1CH numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri.....	115
Şekil 7.1: Güçlendirilmemiş numunelerde kalıcı burulma momenti değeri	129
Şekil 7.2: Enine sargılı numunelerde burulma momenti kapasitesi katkı oranları	131
Şekil 7.3: GFRP enine sargıda k_2 katsayısı için α_t ve β_t değerleri.....	132
Şekil 7.4: CFRP-N enine sargıda k_2 katsayısı için α_t ve β_t değerleri.....	132
Şekil 7.5: CFRP-H enine sargıda k_2 katsayısı için α_t ve β_t değerleri.....	132
Şekil 7.6: Enine sargılı numunelerde burulma momenti kapasitesi katkı oranları	134
Şekil 7.7: NDB kirişlerde boyuna yapıştırırmada k_3 katsayısı için α_l ve β_l değerleri	135
Şekil 7.8: YDB kirişlerde boyuna yapıştırırmada k_3 katsayısı için α_l ve β_l değerleri	136

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1: Burulma İçin St.Venant Katsayıları (Beer ve Johnston, 1992)	16
Tablo 2.2: Dikdörtgen ve Tablalı Kirişler İçin Elastik ve Plastik Teori Denklemleri (Ersoy, 1975)	17
Tablo 2.3: Değişik Kesitler İçin Yaklaşık Burulma Dayanım Momentleri (TS500/Şubat 2000).....	23
Tablo 3.1: Deneylerden ve Hesaplardan Elde Edilen Çatlama Momenti Değerleri (Csikos ve Hegedus, 1998).....	28
Tablo 3.2: Deneysel ve Teorik Olarak Elde Edilen Burulma Dayanımları (Atef H. Bakhsh ve diğ., 1990).....	29
Tablo 3.3: Deney Sonuçları (Rasmussen ve Baker, 1995).....	32
Tablo 3.4: Numune Beton ve Donatı Özellikleri (Koutchoukali ve Belarbi, 2001)	34
Tablo 3.5: Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar (Koutchoukali ve Belarbi, 2001)	34
Tablo 3.6: Yapısal Güçlendirmede Kullanılan Liflerin Mekanik Özellikleri (Mallick, 1988).....	38
Tablo 3.7: Numune Beton ve Donatı Özellikleri (Panchacharam ve Belarbi, 2002).....	39
Tablo 3.8: Deney Sonuçları (Panchacharam ve Belarbi, 2002).....	40
Tablo 3.9: Deney Sonuçları ve Analitik Modelden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırması (Panchacharam ve Belarbi, 2002).....	43
Tablo 3.10: Numune Donatı ve Sargılama Şekilleri (Chalioris, 2006).....	44
Tablo 3.11: Deney Sonuçları (Chalioris, 2006)	44
Tablo 4.1: Kullanılan Agregaların Fiziksel Özellikleri.....	48
Tablo 4.2: Kullanılan Agregaların İncelik Modülleri	48
Tablo 4.3: Kullanılan Çimentonun Fiziksel Özellikleri.....	49
Tablo 4.4: Kullanılan Çimentonun Kimyasal Özellikleri	49
Tablo 4.5: Kullanılan Çimentonun Mekanik Özellikleri	49
Tablo 4.6: Kullanılan hiperakışkanlaştırıcının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	50
Tablo 4.7: Kullanılan Cam Lifi Takviyeli Polimerlerin Teknik Özellikleri	52
Tablo 4.8: Kullanılan Normal Elastisite Modüllü Karbon Lifi Takviyeli Polimerlerin Teknik Özellikleri	53
Tablo 4.9: Kullanılan Yüksek Elastisite Modüllü Karbon Lifi Takviyeli Polimerlerin Teknik Özellikleri (SikaWrap-300C Himod NW).....	53
Tablo 4.10: Sikadur-330 Epoksi Bazlı Likit Yapıştırıcısının Teknik Özellikleri	54
Tablo 4.11: Sikadur-300 Epoksi Bazlı Likit Yapıştırıcısının Teknik Özellikleri	55
Tablo 4.12: Deneylerde Kullanılan Beton Karışımları (1 m ³ için)	57
Tablo 4.13: Kullanılan Numune Detayları.....	63
Tablo 4.14: Numunelerin Eğilmede Çekme Dayanımları.....	64
Tablo 4.15: Numunelerin Yarmada Çekme Dayanımları	66
Tablo 4.16: Numunelerin Basınç Dayanımları	67

Tablo 5.1: Normal Dayanımlı Numunelerin (A - $f_{ck}=20$ MPa) Deney Sonuçları.....	73
Tablo 5.2: Yüksek Dayanımlı Numunelerin (B - $f_{ck}=60$ MPa) Deney Sonuçları.....	73
Tablo 6.1: A-REF ORT, A-N1G-L0 ve A-N2G-L0 Numunelerine Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları.....	90
Tablo 6.2: A-REF ORT ve A-N1CN-L0 Numunelerine Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları.....	92
Tablo 6.3: A-REF ORT ve A-N1CH-L0 Numunelerine Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları.....	94
Tablo 6.4: B-REF ORT, B-N1G-L0 ve B-N2G-L0 Numunelerine Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları.....	97
Tablo 6.5: B-REF ORT, B-N1CN-L0 ve B-N2CN-L0 Numunelerine Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları.....	99
Tablo 6.6: B-REF ORT ve B-N1CH-L0 Numunelerine Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları.....	100
Tablo 6.7: Cam Elyaf Kullanılarak Enine ve Boyuna Güçlendirilen Numunelere Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları.....	103
Tablo 6.8: Normal Elastisite Modüllü Karbon Elyaf Kullanılarak Enine ve Boyuna Güçlendirilen Numunelere Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları.....	104
Tablo 6.9: Yüksek Elastisite Modüllü Karbon Elyaf Kullanılarak Enine ve Boyuna Güçlendirilen Numunelere Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları.....	106
Tablo 6.10: A-N1G-L0, A-N1G-L1G, A-N1G-L1CN ve A-N1G-L1CH Numunelerine Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları	108
Tablo 6.11: Cam Elyaf Kullanılarak Enine ve Boyuna Güçlendirilen Numunelere Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları.....	110
Tablo 6.12: Normal Elastisite Modüllü Karbon Elyaf Kullanılarak Enine ve Boyuna Güçlendirilen Numunelere Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları.....	112
Tablo 6.13: Yüksek Elastisite Modüllü Karbon Elyaf Kullanılarak Enine ve Boyuna Güçlendirilen Numunelere Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları.....	113
Tablo 6.14: B-N1G-L0, B-N1G-L1G, B-N1G-L1CN ve B-N1G-L1CH Numunelerine Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları.....	115
Tablo 7.1: Normal Dayanımlı Numunelere Ait Deneysel ve Analitik Sonuçlar	122
Tablo 7.2: Yüksek Dayanımlı Numunelere Ait Deneysel ve Analitik Sonuçlar	122
Tablo 7.3: Normal Dayanımlı Numuneler İçin Önerilen Analitik Model Kullanılarak Hesaplanan Çatlama Momenti Değerleri.....	126
Tablo 7.4: Yüksek Dayanımlı Numuneler İçin Önerilen Analitik Model Kullanılarak Hesaplanan Çatlama Momenti Değerleri.....	127
Tablo 7.5: Kompozitin Burulma Momenti Katkısı İçin Çatlama Momenti Küçültme Faktörü	128
Tablo 7.6: k_2 Hesabında α_t ve β_t Değerlerinin Elde Edilmesi İçin Kullanılan Deneysel Değerler.....	131
Tablo 7.7: GFRP, CFRP-N ve CFRP-H Sargı Tipleri İçin α_t ve β_t Değerleri.....	133

Tablo 7.8: k_3 Hesabında α_l ve β_l Değerlerinin Elde Edilmesi İçin Kullanılan Deneysel Değerler.....	135
Tablo 7.9: NDB ve YDB Kirişler İçin α_l ve β_l Değerleri	136
Tablo 7.10: Deneysel ve Analitik k_3 Değerlerinin Karşılaştırılması.....	137
Tablo 7.11: Normal Dayanımlı Numuneler İçin Önerilen Analitik Model Kullanılarak Hesaplanan Burulma Momenti Kapasitesi Değerleri.....	138
Tablo 7.12: Yüksek Dayanımlı Numuneler İçin Önerilen Analitik Model Kullanılarak Hesaplanan Burulma Momenti Kapasitesi Değerleri.....	139
Tablo 7.13: Enine FRP Sargılanmış Numunelerin Çatlama Momenti Hesabı İçin Analitik Modellerin Karşılaştırılması	140
Tablo 7.14: Enine FRP Sargılanmış Numunelerin Burulma Momenti Kapasitesi Hesabı İçin Analitik Modellerin Karşılaştırılması	141
Tablo 7.15: Boyuna FRP Yapıştırılmış Numunelerin Çatlama Momenti Hesabı İçin Analitik Modellerin Karşılaştırılması.....	142
Tablo 7.16: Boyuna FRP Yapıştırılmış Numunelerin Burulma Momenti Kapasitesi Hesabı İçin Analitik Modellerin Karşılaştırılması	142
Tablo 7.17: Numune Boyutları ve Özellikleri (Chalioris, 2006)	143
Tablo 7.18: Önerilen Analitik Model Kullanılarak Hesaplanan Çatlama Momenti Değerleri	143
Tablo 7.19: Önerilen Analitik Model Kullanılarak Hesaplanan Burulma Momenti Kapasitesi Değerleri	144

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

A_c	: Kesitin alanı
A_e	: Burulma için çekirdek alan
A_g	: Elemanın toplam kesit alanından boşluklar çıkarıldıktan sonra kalan alan
A_o	: Kayma akısının takip ettiği yolun içinde kalan alan
A_{oh}	: Enine donatının merkezinden geçen eksenler arasında kalan alan
A_{ot}	: Enine donatı kesit alanı
A_{sl}	: Kesitte, burulma için gerekli, toplam boyuna donatı alanı
$A_{sl,min}$: Burulma için gerekli minimum boyuna donatı alanı
$A_{l,min}$: Burulma için gerekli minimum boyuna donatı alanı
A_t	: Enine donatının bir bacağına kesit alanı
$A_{t,min}$: Burulma için gerekli minimum etriye donatısı kesit alanı
a_i	: F kuvvetlerinin yapı elemanının başlangıç noktasına olan uzaklıkları
b	: Betonarme yapı elemanı içerisindeki boy donatı aralığına
b_l	: Boyuna yapıştırma yapılan FRP şeridinin genişliği
b_t	: Enine sargılama yapılan FRP şeridinin genişliği
b_w	: Dikdörtgen kesitin genişliği
c_1	: St. Venant katsayısı
d_b	: Boyuna donatı çapı
D	: Diyagonal basınç kuvvetleri
E_c	: Betonun elastisite modülü
E_l	: Boyuna yapıştırma yapılan FRP'nin elastisite modülü
E_t	: Enine sargılanan FRP'nin elastisite modülü
E_{fu}	: FRP şeridinin maksimum elastisite modülü
F	: Yapı elemanı üzerinde çatlak oluşturacak kuvvet
f_{ck}	: Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_{cd}	: Betonun hesap basınç dayanımı
f_{ctk}	: Betonun karakteristik çekme dayanımı
f_{ctd}	: Betonun hesap çekme dayanımı
f_{ctf}	: Betonun eğilmede çekme dayanımı
$f_{ct\bar{s}}$: Betonun yarmada çekme dayanımı
f_c	: Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_{cu}	: Betonun küp basınç dayanımı
f'_{sp}	: Betonun yarmada çekme dayanımı
f_{yk}	: Boyuna donatının karakteristik akma dayanımı
f_{yw}	: Enine donatının akma dayanımı
f_{yl}	: Boyuna donatının akma dayanımı
f_{ywk}	: Enine donatının karakteristik akma dayanımı
f_{ywd}	: Enine donatının hesap akma dayanımı
G_c	: Betonun kayma modülü
h	: Dikdörtgen kesitin yüksekliği
k_1	: Önerilen analitik model içerisinde betonun etkinlik faktörü
k_2	: Önerilen analitik model içerisinde enine sargı etkinlik faktörü

- k_3 : Önerilen analitik model içerisinde boyuna yapıştırma etkinlik faktörü
 K : Elektronik komparatörlerden okunan, deformasyon değerleri
 L : Numune test bölgesi uzunluğu
 L_k : Alüminyum kol açıklığı
 ΔL : Numune test bölgesi boy uzaması
 m : Kesit içi, donatı özelliklerine göre bulunan katsayı
 P_c : Kesitin dış çevresi toplamı
 P_h : Enine donatının merkezlerinden geçen, eksenler arasında kalan alan
 S : Şekil faktörü
 s : Enine donatı aralığı
 s_f : Enine sargılanan FRP şeritlerinin merkezinden merkezine olan mesafe
 R_0 : Çatlamamış kesitin burulma rijitliği
 R : Çatlamış kesitin burulma rijitliği
 T : Taşınan burulma momenti
 T_c : Kesitte betonun taşıdığı burulma momenti
 T_{cr} : Kesitin çatlama momenti
 T_{cr_den} : Deneysel olarak elde edilen çatlama momenti
 T_{cr_c} : Beton tarafından karşılanan çatlama momenti
 T_{cr_l} : Boyuna yapıştırılan FRP şeridi tarafından karşılanan çatlama momenti
 T_{cr_t} : Enine sargı tarafından karşılanan çatlama momenti
 T_{cr} : Önerilen analitik modelden elde edilen çatlama momenti
 T_{cr_panc} : Panchacharam ve Belarbi tarafından önerilen analitik modelden elde edilen çatlama momenti
 T_{F_l} : Boyuna yapıştırılan FRP şeridi tarafından karşılanan burulma momenti kapasitesi
 T_{F_t} : Enine sargı tarafından karşılanan burulma momenti kapasitesi
 T_d : Tasarım burulma momenti
 T_e : Elastisite teorisinden hesaplanan çatlama momenti
 T_{max} : Kesitin beton ezilmesi olmadan taşıyabileceği en büyük moment değeri
 T_{np} : Donatısız kesitin burulma taşıma kapasitesi
 T_p : Plastisite teorisinden hesaplanan çatlama momenti
 T_n : Kesitin burulma momenti değeri
 T_s : Kesitte donatının taşıdığı burulma momenti
 T_{sb} : Yanal eğilme teorisinden hesaplanan çatlama momenti
 T_{sl} : Boy donatının karşıladığı burulma momenti
 T_{st} : Etriyenin karşıladığı burulma momenti
 T_u : Kesitin taşıdığı en büyük burulma momenti değeri
 T_{u_c} : Kompozitin burulma momenti kapasitesine katkısı
 T_u : Önerilen analitik modelden elde edilen burulma momenti kapasitesi
 T_{u_panc} : Panchacharam ve Belarbi tarafından önerilen analitik modelden elde edilen burulma momenti kapasitesi
 t_e : Kutu kesit duvar kalınlığı
 t_l : Boyuna yapıştırılan FRP şeridinin kalınlığı
 t_t : Enine sargılanan FRP şeridinin kalınlığı
 U_c : Kesitin çevresi
 U_e : A_e alanının çevresi
 V_f : Betona ilave edilen çelik lif oranı
 X : Boy donatıda meydana gelen iç kuvvetler
 x_i, x : Kesitin kısa kenarı

x_l	: Enine donatının merkezden merkeze kısa kenarı
Y	: Etriye de meydana gelen iç kuvvetler
y_b, y	: Kesitin uzun kenarı
y_l	: Enine donatının merkezden merkeze uzun kenarı
α	: St. Venant katsayısı
α_e	: Elastisite katsayısı
α_l	: Boyuna yapıştırmanın burulma momenti kapasitesi etkinlik faktörü sabiti
α_p	: Plastisite katsayısı
α_t	: Enine sargının burulma momenti kapasitesi etkinlik faktörü sabiti
β_i	: y_i/x_i oranına bağlı katsayı
β_l	: Boyuna yapıştırmanın burulma momenti kapasitesi etkinlik faktörü sabiti
β_t	: Enine sargının burulma momenti kapasitesi etkinlik faktörü sabiti
σ_b^*	: Betonun silindir basınç mukavemeti
σ_s	: Boyuna donatıda oluşan gerilme
σ_{sw}	: Enine donatıda oluşan gerilme
ε	: Donatıda oluşan birim deformasyon
ε_l	: Boyuna yapıştırılan FRP şeritinde oluşan birim deformasyon
ε_t	: Enine sargıda oluşan birim deformasyon
ε_{f_lu}	: Boyuna yapıştırılan FRP şeritinde oluşan maksimum birim deformasyon
ε_{f_tu}	: Enine sargıda oluşan maksimum birim deformasyon
ε_{den_l}	: Deneysel olarak belirlenen boyuna şeritteki birim deformasyon
ε_{ana}	: Boyuna yapıştırmada oluşan maksimum birim deformasyon ile k_3 katsayısının çarpımıyla elde edilen boyuna yapıştırmadaki birim deformasyon
$\varepsilon_{ke,f}$: FRP sargıda oluşan efektif birim deformasyon
\emptyset	: Kesitin birim dönme açısı
\emptyset_{cr}	: Kesitin çatlama momentine karşı gelen, birim dönme açısı
\emptyset_u	: Kesitin taşıdığı en büyük momente karşı gelen, birim dönme açısı
τ_t	: Burulma kayma gerilmesi
τ_{max}	: Taşınabilecek en büyük burulma kayma gerilmesi
θ	: Basınç çubuklarının yatla yaptığı açı
$\rho_{wt,min}$: Burulma için gerekli en az enine donatı oranı
ρ_{wo}	: Kesitte bulunan enine donatı oranı
ρ_l	: Boyuna yapıştırılan FRP'nin hacimsel oranı
ρ_t	: Enine sargı hacimsel oranı
ω_l	: Boyuna yapıştırmanın çatlama momenti etkinlik faktörü
ω_t	: Enine sargının çatlama momenti etkinlik faktörü

Kısaltmalar

FRP	: Lif takviyeli polimer
GFRP	: Cam lifi takviyeli polimer
CFRP-N	: Normal elastisite modüllü karbon lifi takviyeli polimer
CFRP-H	: Yüksek elastisite modüllü karbon lifi takviyeli polimer
NDB	: Normal dayanımlı beton
YDB	: Yüksek dayanımlı beton

FRP İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BETONARME KİRİŞLERİN BURULMA DAVRANIŞI

Onur ÖZTÜRK

Anahtar Kelimeler: Burulma, Betonarme Kiriş, FRP, Lif Takviyeli Polimer, Güçlendirme

Özet: Bu çalışmada Lif Takviyeli Polimer'ler (FRP) kullanılarak burulma güçlendirilmesi yapılan betonarme kirişlerin basit burulma momenti etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Bu amaçla 12 adet normal dayanımlı ve 14 adet yüksek dayanımlı betondan imal edilmiş toplam 26 adet betonarme kiriş hazırlanmıştır. Tüm numunelerde kesit boyutları ve beton basınç dayanımı, donatı oranı ile düzeni sabit tutulmuştur. Tüm numunelerde etriye ve boy donatı olarak 8 mm çapında nervürlü donatı kullanılmış ve güçlendirme malzemesi olarak cam lifi (GFRP), normal elastisite modüllü karbon lifi (CFRP-N) ve yüksek elastisite modüllü karbon lifi (CFRP-H) takviyeli polimerler kullanılmış ve karşılaştırma numuneleri hariç diğer tüm numuneler üç farklı FRP kullanılarak sargılanmıştır. Sargılama düzeni etriyeye paralel (enine) ve boy donatıya paralel (boyuna) olarak yapılmıştır. Tüm numunelerde enine sargılama uygulanmış ancak katman sayısı ile boyuna yapıştırma değişken olarak alınmıştır. Enine sargılama bir ve iki kat, boyuna yapıştırma ise tek kat olarak uygulanmıştır. Enine ve boyuna doğrultuda kullanılan tüm FRP'ler 40 mm genişliğindedir. Enine sargılamada sargıların merkezinden merkezine olan aralıklar 100 mm alınmıştır.

Karşılaştırma numuneleri ve sargılanan tüm numuneler basit burulma deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler sırasında numuneler üzerinden uygulanan yük, birim dönme açısı ve birim uzama miktarları elektronik veri toplama sistemi yardımıyla kaydedilmiştir. Deneylerden elde edilen veriler kullanılarak tüm numunelere ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri ile burulma momenti – toplam boy uzama grafikleri çizilerek karşılaştırılmıştır.

TORSIONAL BEHAVIOR of REINFORCED CONCRETE BEAMS STRENGTHENED with FIBRE REINFORCED POLYMERS

Onur ÖZTÜRK

Key Words: Torsion, Reinforced Concrete Beam, FRP, Fibre Reinforced Polymer, Strengthening

Abstract: In this study, behavior of reinforced concrete beams strengthened with fibre reinforced polymer's (FRP) under pure torsion were investigated. For this purpose, 26 reinforced concrete beams (12 normal strength and 14 high strength concrete beams) were prepared. Cross sectional dimension, compressive strength of concrete, reinforcement ratio and reinforcement orientation were kept constant for all beams. Glass fibre reinforced polymer (GFRP), normal modulus carbon fibre reinforced polymer (CFRP-N) and high modulus carbon fibre reinforced polymer (CFRP-H) were used for strengthening of test beams. All test beams, except reference specimens, were strengthened with various FRP orientations. Fibre orientations were parallel to the stirrups (transverse) and parallel to the longitudinal reinforcement (longitudinal). All strengthened beams were wrapped in transverse direction. Number of the transverse layer and existence of strengthening in the longitudinal direction were the test variables. Strengthening in transverse direction was applied through one and two layers, while longitudinal FRP was applied in one layer. Width of all FRP sheets, applied in both longitudinal and transverse directions, were 40 mm. Center to center spacing of the FRP sheets was 100 mm for transverse directions.

Reference specimens and all the specimens strengthened with FRP composites were tested under monotonically increasing pure torsion. During the tests, electronic data logger system was used to record the applied load, angle of twist and crack width. Relationships between torsional moment – angle of twist and torsional moment – total elongation were investigated by using the test results.

1. GİRİŞ

Burulma, kirişli plak sistemindeki betonarme binaların kenar kirişlerinde; farklı yük veya açıklığa sahip komşu döşemelerin arasındaki kirişlerde; merdiven kirişlerinde veya eksenleri planda eğrisel olan kirişlerde sıklıkla görülmektedir. Burulma etkisi yapı elemanı üzerinde ilave kayma gerilmeleri meydana getirmekte, bu etkinin artması veya yapı elemanının malzeme kalitesinin proje değerlerinin altına düşmesi yapı elemanı için hesaplanan kayma donatısının yetmemesine ve yapı elemanında eğik çatlaklar formunda hasarların oluşmasına neden olur.

Betonarme yapılar, proje aşamasındaki hatalı hesaplamalardan, imalat aşamasındaki standart altı malzeme dayanımından veya kullanım yüklerinin artmasından dolayı güçlendirmeye ihtiyaç duyabilirler. Betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesi için günümüzde malzeme bilimindeki ilerlemeyle birlikte yeni yöntemler geliştirilmiştir. Betonarme veya çelik yapı elemanı ilavesi, ard germe uygulaması veya lif takviyeli polimer kullanılması gibi yöntemler yaygın olarak uygulama alanı bulan yöntemlerdir.

Betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesinde lif takviyeli polimer (FRP) kullanımı diğer yöntemlere oranla son yirmi yılda daha yaygınlaşmıştır. Bu durumun nedenleri arasında; 1- Uygulama süresinin kısa oluşu dolayısıyla iş süresinden zaman kazancı, 2- Yapı elemanına bir ara bağlayıcı malzeme (epoksi) kullanılması suretiyle uygulanmasının kolay oluşu. 3- Diğer yöntemlerde ihtiyaç duyulan demir-kalıp işçiliğini gerektirmemesi, 4- Uygulandığı yapı elemanının korozyona ve kimyasal etkilere karşı direncini artırması, 5- Uygulandığı yapı elemanına istenilen süneklik ve dayanımı kazandırması, 6- Yüksek çekme dayanımı ve elastisite modülüne sahip olması; sayılabilir.

Burada verilen çalışmada kiriş yüzeyine yapıştırılarak uygulanan Lif Takviyeli Polimer'lerin basit burulma altındaki betonarme kirişlerin burulma kapasitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Bu amaçla normal (NDB) ve yüksek (YDB) dayanımlı betondan toplam 26 adet kiriş üretilmiş ve bu kirişlerin yüzeyine etriye ve boy donatı formunda lif takviyeli polimerler yapıştırılarak güçlendirilmiştir. Güçlendirme uygulamasında etriye formundaki FRP'lere ilave olarak boy donatı formundaki FRP'lerin yapıştırılıp yapıştırılmaması yanında etriye ve boy donatı FRP'lerinin elastisite modülleri de değişken olarak incelenmiştir. Kiriş üzerine FRP yapıştırılarak kirişte oluşan çatlak genişliğinin azaltılması, emilen enerjinin artması, kirişin sünekliğinin artması ve tüm bunların sonucunda kirişin burulma kapasitesinin arttırılması amaçlanmıştır.

2. BASİT BURULMA DAVRANIŞI VE TEORİLERİ

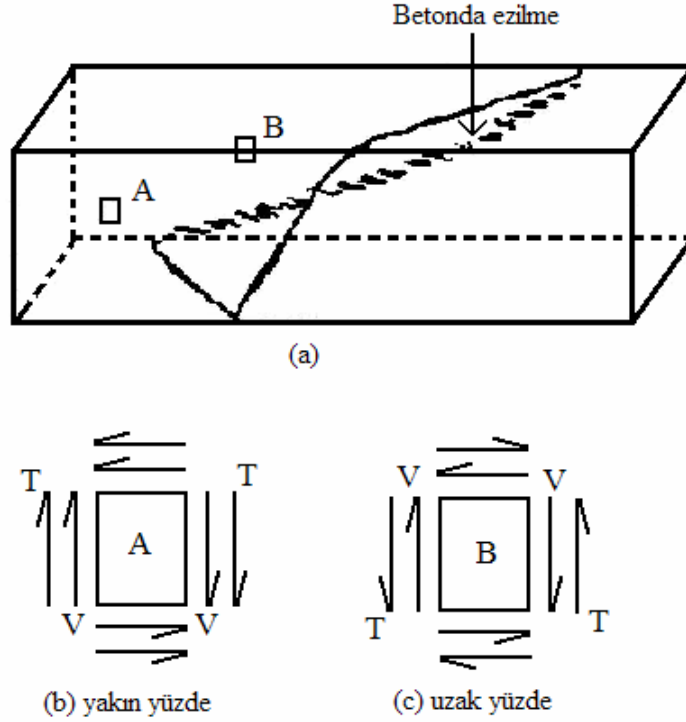
Bu bölümde basit burulma davranışı incelenecektir. Basit burulma ile ilgili literatür içerisinde en çok kullanılan teorilerden ve farklı yönetmeliklere göre burulma hesabı denklemlerinden bahsedilecektir.

2.1. Basit Burulma Davranışı

Betonarme yapı elemanları iç ve dış yükler altında kesme ve eğilme etkilerinin yanı sıra birde burulma momenti etkisine maruz kalır. Burulma etkisi betonarme yapıların monolitik özelliğe sahip olması nedeniyle taşıyıcı sistemin geometrisinden veya simetrik olmayan yük uygulamalarından kaynaklanabilir (Berktaş, 1995). Bu tanımlamaya göre, bir yapıdaki bütün elemanlar az veya çok burulma momentine maruzdur. Ancak, çoğu kez bu burulma momentinin mertebesi küçük olduğundan ihmal edilebilir. Pratikte burulma hesabına en çok kenar kirişler, merdiven ve balkon kirişleri gibi elemanlarda rastlanır. Ayrıca ızgara sistemler, düzleminde eğri köprüler ve ortotropik kabuklarda burulma sistemin ayrılmaz bir parçasıdır (Ersoy, 1975).

Hesabı yapılan elemana etkileyen burulma momentinin saptanması, bunun diğer elemanlara dağılışı, betonarmenin monolitik özelliği ve doğrusal elastik olmayan davranışı yüzünden son derece karmaşık ve kesin çözümü olanaksız bir sorun olarak ortaya çıkar. Elemana gelen burulma momenti doğru olarak saptanabilse bile, kesit mukavemetinin kesin olarak hesaplanabilmesi oldukça zordur. Bilindiği gibi, burulma momenti elemanda kayma gerilmeleri meydana getirir. Bu kayma gerilmeleri, elemanın bir yüzünde kesme kuvvetinin oluşturduğu kayma gerilmeleri ile aynı yönde, diğer yüzünde ise ters yöndedir (Şekil 2.1). Bu durumda kayma gerilmelerinin aynı yönde olduğu yüzde meydana gelen eğik asal çekme gerilmeleri oldukça yüksek seviyelere ulaşırlar. Betonarmenin en önemli sorunlarından olan asal

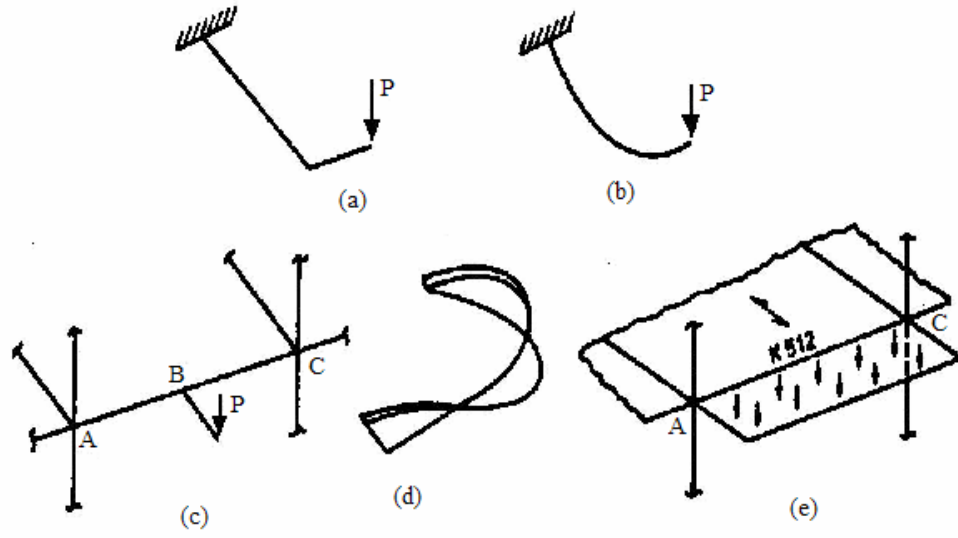
çekme gerilmelerini arttırması açısından, burulma etkisi önemlidir ve üzerinde dikkatle durulması gerekir. Unutulmamalıdır ki burulmanın bulunmadığı durumlarda dahi, eğik çekme gerilmeleri sorunu son derece karmaşıktır. Burulma momentinin de katılması ile sorunun çok daha karmaşık bir duruma geleceği açıktır (Ersoy, 1975).



Şekil 2.1: Burulma etkisi ile eleman üzerinde oluşan kayma gerilmeleri ve asal gerilmeler (Ersoy, 1975)

Yapıda meydana gelen burulma momenti denge ve uygunluk burulması olarak ikiye ayrılarak ele alınabilir.

Denge Burulması : Yapı sisteminde veya elemanında dengeyi sağlayabilmek için burulma momentine gereksinme varsa, burulma “denge burulması”dır. Sözü edilen gereksinme, elastik aşamadaki değil, kırılma aşamasındaki gereksinmedir. (Ersoy, 1985). Şekil2.2’de izostatik ve hiperstatik sistemler için çeşitli denge burulması örnekleri görülmektedir.

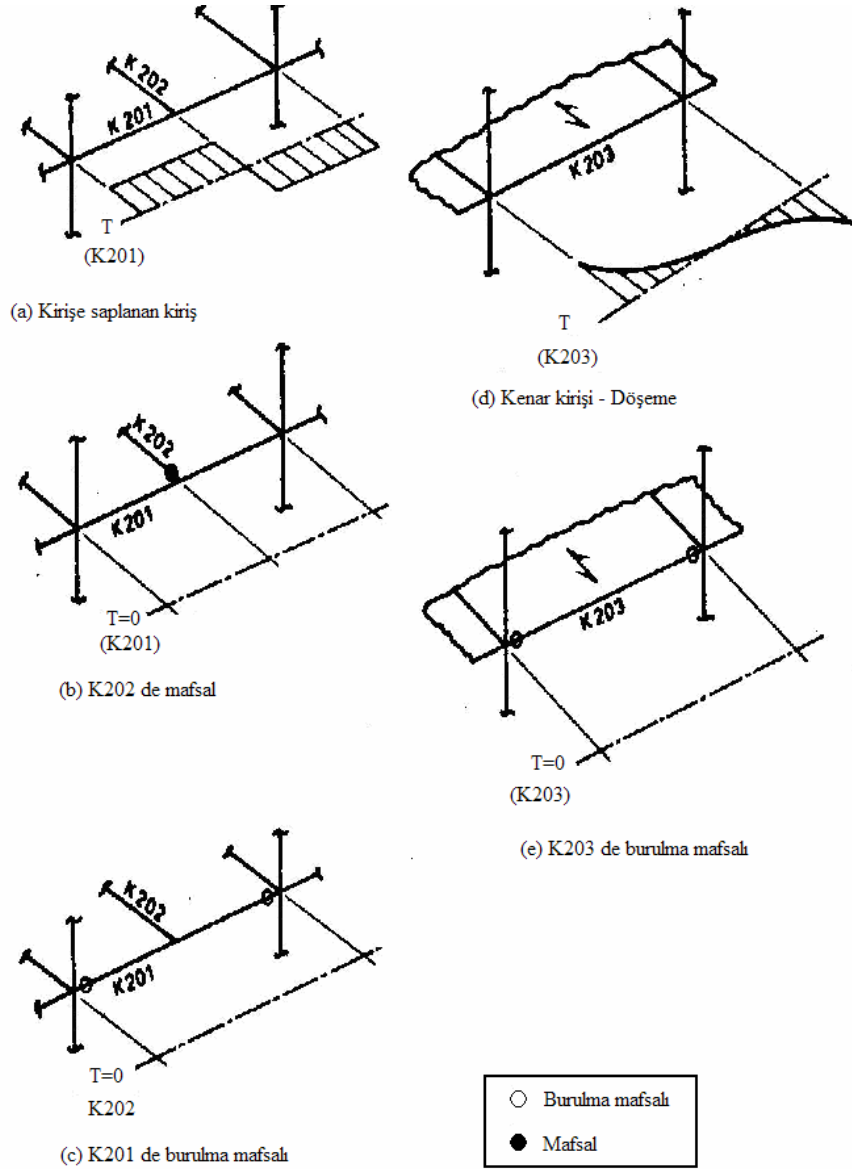


Şekil 2.2: Çeşitli izostatik ve hiperstatik sistemler için denge burulması örnekleri (Ersoy, 1985).

Şekil 2.2(a) ve (b) de verilmiş olan izostatik sistemde konsol yapı elemanı uç noktasına etkiyen P yükü eleman üzerinde denge burulması oluşturmaktadır. Şekil 2.2(c) de verilmiş olan vinç kirişinde kısa kiriş ucuna uygulanan P yükü A-C kirişinde denge burulması oluşturmaktadır. Şekil 2.2(d) de verilmiş olan döner merdiven sahip olduğu geometriden dolayı denge burulması etkisi altındadır. Şekil 2.2(e) de verilen konsol çalışan balkon plağı K512 kirişinde denge burulması oluşturmaktadır.

Denge burulmasında, burulma momenti sistemin ayrılmaz bir parçasıdır, eleman davranışı doğrusal olsa da olmasa da vardır. Denge burulması olan sistemlerde, klasik yöntemlere göre (doğrusal – elastik) hesaplanan burulma momenti ihmal edilemez veya azaltılamaz (Ersoy, 1985).

Uygunluk Burulması : Sistemde oluşan burulma momentinin belirlenmesinde, denge denklemlerinin yeterli olmadığı burulma türüdür. Statik açıdan belirsiz burulma etkisi olarak da adlandırılır. Bu tür burulma momentinin ihmal edilmesi taşıyıcı sistemde çatlamalara ve etkilerin yeniden dağılarak dengenin tekrar oluşmasına sebep olur. Bu tür burulma oluşmasında ilgili elemanın burulma rijitliğinin diğer elemanların rijitliklerine olan oranı etkili olur (Celep ve Kumbasar, 1996). Şekil2.3'te iki farklı sistem için uygunluk burulması örnekleri görülmektedir.

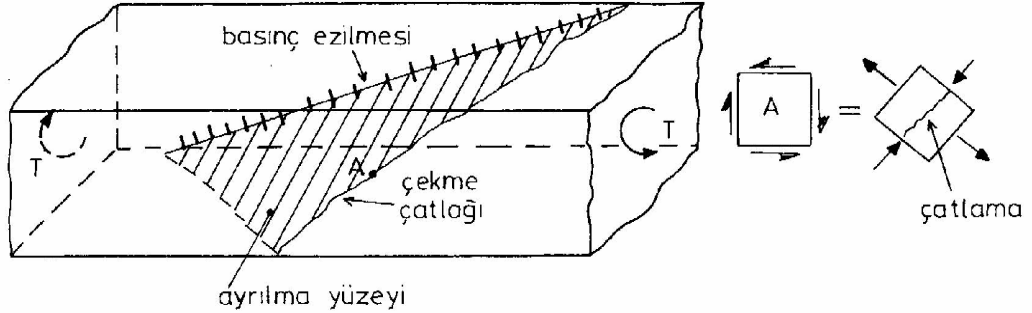


Şekil 2.3: İki farklı sistem için uygunluk burulması örnekleri (Ersoy, 1985)

Şekil 2.3(a) incelendiği zaman K201 kirişine saplanan K202 kirişinin saplandığı kirişte burulma momenti oluşturduğu görülmektedir. Şekil 2.3(a) nın bir adım sonrası ise Şekil 2.3(b) ve (c) de görülmektedir. Şekil 2.3(b) de K201 kirişine saplanmış olan K202 kirişinde oluşan mafsalsal nedeniyle artık K202 kirişi K201 kirişine burulma momenti aktaramaz ancak sistem hala stabil bir sistem olduğu için burulma momenti mevcuttur ancak artık uygunluk burulması durumunu almıştır. Aynı durumda Şekil 2.3(c) incelendiği zaman K201 kirişinde oluşan burulma mafsalları nedeniyle sistemde denge için burulma momentine gerek kalmaz ve sistem uygunluk burulması

halini alır. Dikkat edilmelidir ki K201 kirişinin iki ucunda oluşan burulma mafsalları nedeniyle denge için burulmaya gerek kalmasa da verilen sistemin dengede kalabilmesi için uygunluk şartı olarak mafsalların oluştuğu kesitlerin dönme kapasitelerinin yeterli olması gerekmektedir. Şekil 2.3(d) incelendiği zaman ise K203 kenar kirişinde meydana gelen burulma momenti bu kirişe döşeme tarafından aktarıldığı görülmektedir. Ancak aynı sistemde K203 kirişinin iki ucunda burulma mafsallarının oluşması ile sistemin artık denge için burulma momentine gereksinimi kalmaz (Şekil 2.3(e)), sistem uygunluk burulması halini almıştır.

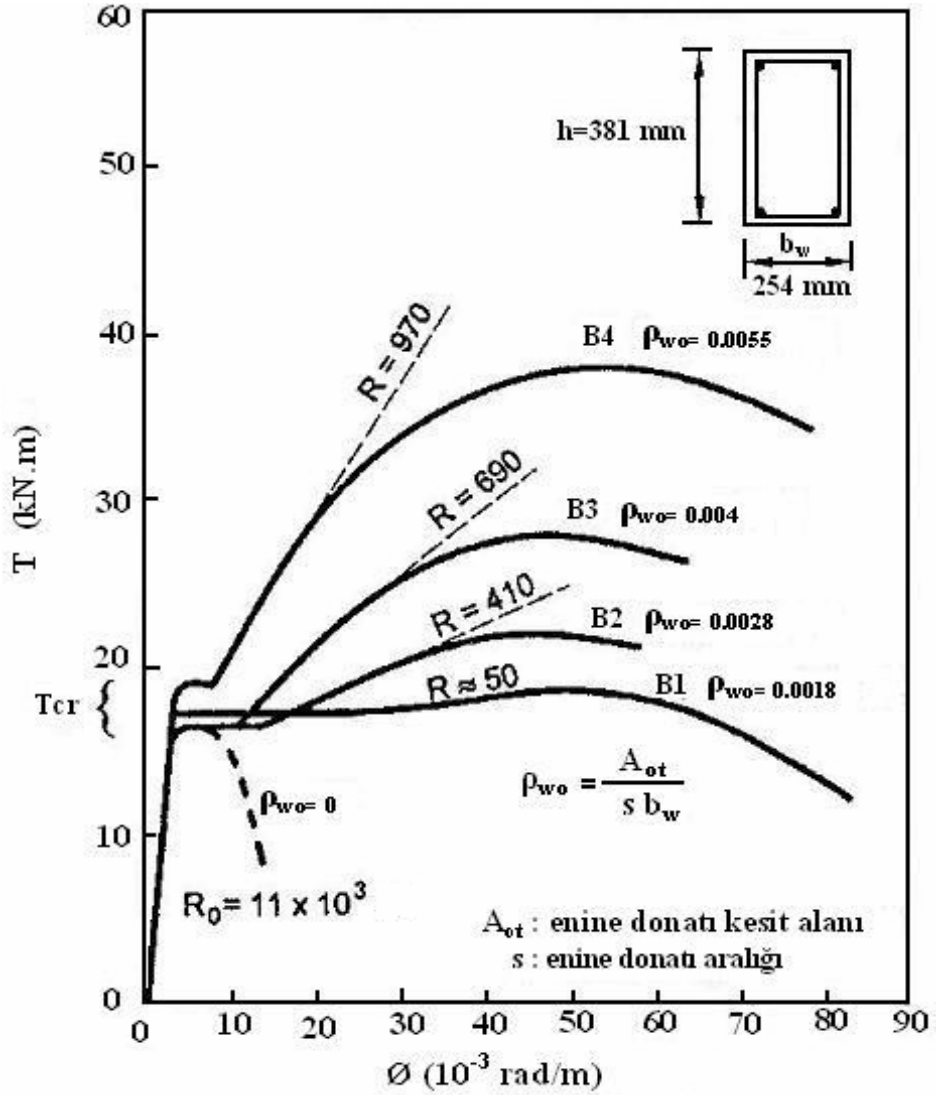
Burulma momentinin arttırılması ile kayma gerilmeleri ve bunlardan dolayı oluşan asal çekme ve basınç gerilmeleri artacaktır. Betonun çekme dayanımı basınç dayanımından çok daha küçük olduğu için eleman üzerinde çatlaklar oluşmaktadır. Ancak çatlağın tek bir bölgede ortaya çıkmasıyla kesitin davranışı tamamen değişir ve eleman Şekil 2.4’de görüldüğü gibi taralı yüzeyden ayrılır. Ayrıca Şekil 2.4’de çekme nedeniyle oluşan çatlağın yanında kesitin diğer tarafında ayrılmayı oluşturan basınç ezilmesi de gösterilmiştir. Betonun çekme dayanımına erişilerek güç tükenmesine gelindiği için kırılma ani ve gevrek olur (Celep ve Kumbasar, 1996).



Şekil 2.4: Basit burulma altındaki donatılı bir kirişte gözlenen çatlaklar (Celep ve Kumbasar 1996)

Dr. Hsu burulma etkisindeki betonarme kirişlerin deformasyon özelliklerini saptamak için bir dizi deney gerçekleştirmiştir. Bu deney serisinde burulma donatısı dışındaki tüm özellikler sabit tutulmuştur. Seride yer alan kirişlerde farklı enine donatı oranları kullanılmış ve enine donatıya eşit hacimde boyuna donatı kullanılmıştır. Bu deneyler sonucunda kirişlere ait burulma momenti-birim dönme

açısı ($T-\theta$) ilişkileri tespit edilmiştir. Elde edilen bu ilişki Şekil 2.5’de verilmiştir. Burulma momenti-birim dönme açısı ($T-\theta$) ilişkisi eğrilerinin eğimi elemanların burulma rijitliğini göstermektedir (Dr.Hsu, PCA Deneyleri).



Şekil 2.5: Basit burulma altındaki betonarme kirişlerde burulma momenti-birim dönme açısı ilişkisi (Dr.Hsu, PCA Deneyleri)

Şekil 2.5’de verilen burulma momenti-birim dönme açısı ilişkisi grafiğinden de görüleceği gibi, burulma çatlama anının olduğu T_{cr} değerine kadar tüm numuneler için davranış doğrusaldır. Eğrinin bu doğrusal kısmı tüm deney numunelerinde aynı olduğu için burulma çatlama anına kadarki burulma rijitliğinin tüm numunelerde aynı olduğu söylenebilir. Bu bulgu çatlama olana kadarki burulma rijitliğinin donatıdan bağımsız olduğunu göstermektedir. Burulma momenti-birim

dönme açısı ($T- \emptyset$) eğrisinin çatlama kadar olan doğrusal kısmının eğimi olan burulma rijitliği elastisite teorisine göre aşağıda verilen;

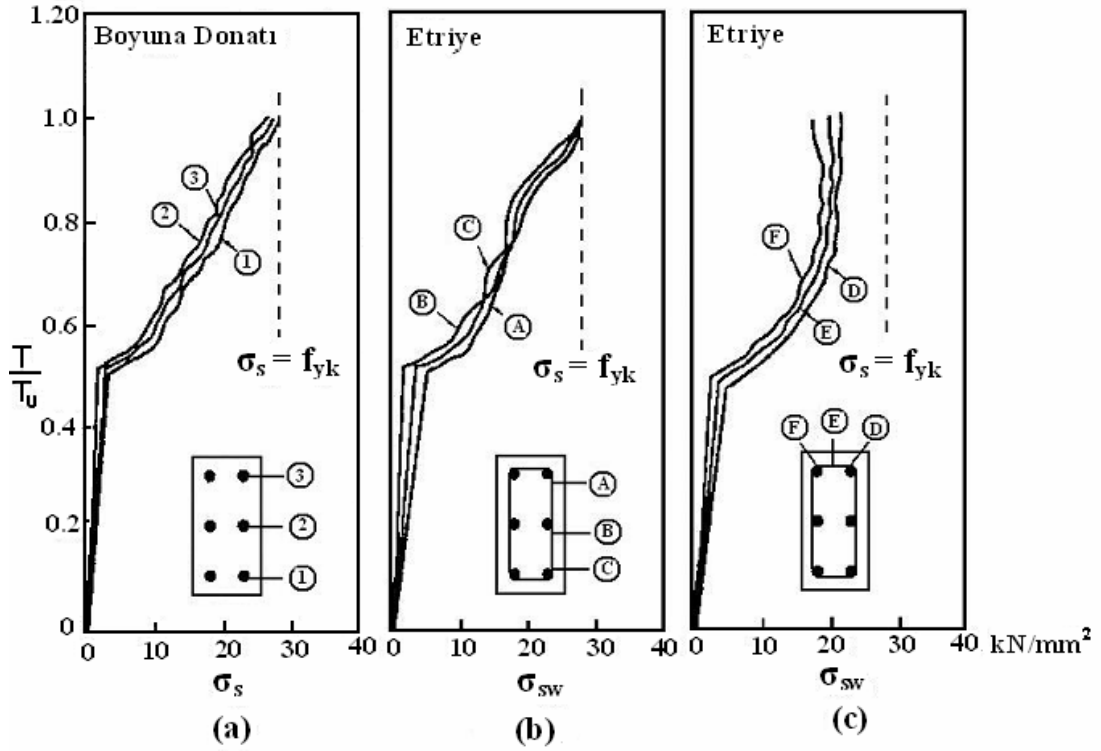
$$R_0 = \frac{T_{cr}}{\phi_{cr}} = G_c \sum \beta_i x_i^3 y_i \quad (2.1)$$

denklemleri yardımıyla bulunabilir. Denklem 2.1’de yer alan T_{cr} yapı elemanın çatlama momentini, \emptyset_{cr} bu çatlama momentine karşı gelen çatlama birim dönme açısını göstermektedir. G_c betonun kayma modülüdür ve daha detaylı bir hesap gerektirmedikçe betonun elastisite modülü değerinin % 40’ı kayma modülü olarak hesaplarda kullanılabilir. Aynı denklemde x_i, y_i dikdörtgen kesitlerde sırasıyla kısa ve uzun kenarı ifade etmektedir. Eğer kesit, tablalı kesit ise, dikdörtgenlere ayrılarak hesaplar yapılabilir. β_i ise y_i/x_i oranına bağlı bir katsayıdır ve betonarme için yaklaşık 1/3 alınabilir (Ersoy ve Özcebe, 2001).

Deneysel olarak yapılan ölçümler burulmanın etkisi altında çatlama oluncaya kadar enine ve boyuna donatıdaki birim deformasyonların ihmal edilebilecek kadar az olduğunu ancak burulma çatlama oluşması ile birlikte, burulma rijitliğinin ani olarak düştüğünü ve donatının etkili olmaya başladığını göstermektedir. Dr. Hsu’nun deneylerinde burulma rijitliği $R_0=11000 \text{ kN.m}^2$ iken burulma çatlama oluşması ile donatı oranına bağlı olarak $R=50-970 \text{ kN.m}^2$ arasında bir değere düşmektedir (Şekil 2.5). Bu da çatlama sonrasındaki burulma rijitliğinin çatlama öncesi duruma göre 1/100-1/10’u arasına düştüğü anlamına gelmektedir. Uygulamada karşımıza çıkan elemanların, Şekil 2.5’de gösterilen B1 ve B2 numunelerinin taşıdığı oranda enine donatı içerdiği düşünülürse, burulma çatlama ile burulma rijitliğinin sıfıra yakın değerlere düştüğü görülebilir. Burulma rijitliğindeki bu azalma sonucunda kesitin neredeyse sabit kalan bir burulma momenti altında serbestçe dönerek zorlamaları diğer yapı elemanlarına aktaracağı çok açıktır. Bu durumda yapı sisteminde oluşacak çatlama sonrasındaki yük dağılımı değişimi ihmal edilemeyecek düzeylere ulaşır (Ersoy ve Özcebe, 2001).

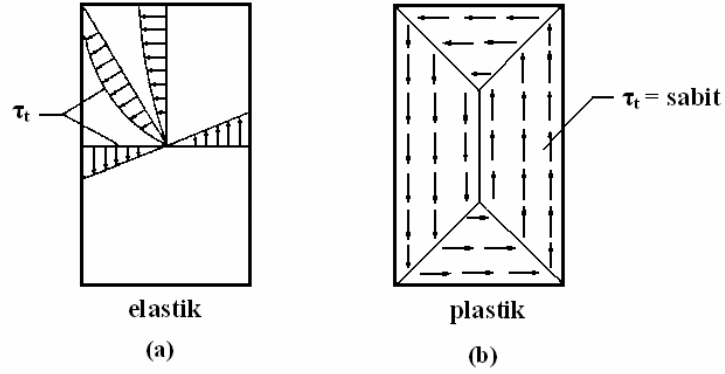
Dr. Hsu yaptığı deneylerde kesitin çeşitli düzeylerinde bulunan enine ve boyuna donatılardaki birim uzamaları dikkate alınarak donatılarda oluşan gerilme değerlerini

tespit etmiştir (Şekil 2.6). Grafikten görüldüğü gibi boy donatı ve her iki etriye kolundaki gerilmeler aynı burulma momenti seviyesi için sabittir. Bu da etriye ve boy donatılarının çatladıktan sonra dayanıma katkılarının eşit olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.6: Enine ve boyuna donatılarda ölçülen birim uzamalar (Dr. Hsu, PCA Deneyleri)

Yakın zamana kadar burulma momenti etkisindeki betonarme elemanlarda oluşan kayma gerilmeleri Şekil 2.7(a)'da, gerilme dağılımı gösterilen, elastisite teorisine göre hesaplanıyordu. Ancak Dr.Hsu' nun yaptığı deneylerden elde ettiği sonuçlar Şekil 2.7(b)'de verilen ve plastisite teorisinden elde edilen gerilme dağılımının, Şekil 2.7(a)'da verilen ve elastisite teorisinden elde edilen dağılıma göre gerçeğe daha yakın olduğunu göstermiştir. Kesitteki kayma gerilmelerinin sabit kalması, burulma altındaki betonarme elemanlarda elastisite teorisi yerine, plastisite teorisinin daha sağlıklı sonuçlar verebileceğini göstermektedir (Hsu, 1968).



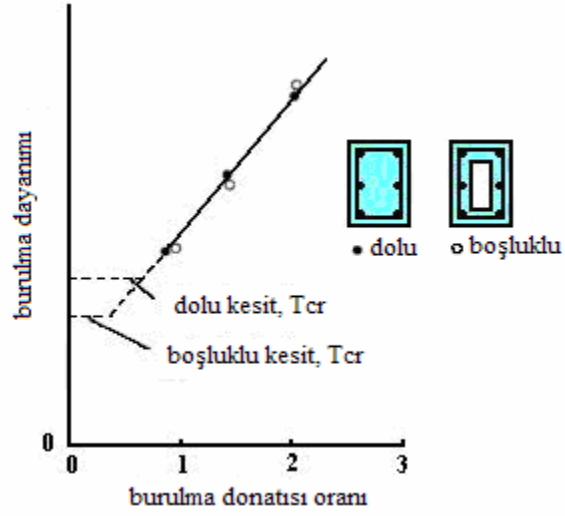
Şekil 2.7: Elastisite ve plastisiteye göre kesitte burulma nedeni ile oluşan gerilme dağılımı (Ersoy, 1985)

2.2. Burulma Teorileri

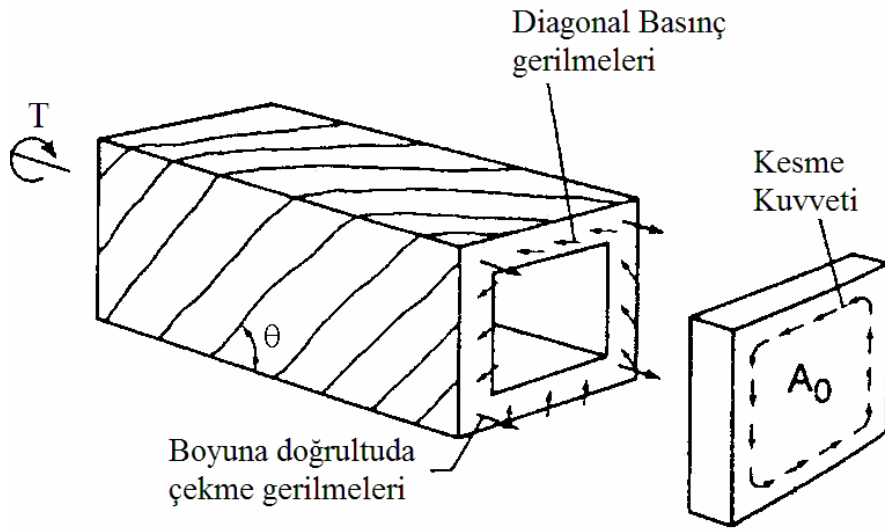
Betonarme bir yapı elemanının burulma davranışının analizi için geçmişten günümüze kadar çeşitli teoriler ortaya konmuştur. Bu bölümde literatürde sıkça karşımıza çıkan uzay kafes analojisi, elastik ve plastik teori ile yanal eğilme teorisi ile ilgili kısa bilgiler verilecektir.

2.2.1. Uzay kafes analojisi

Burulma momentine maruz kalan bir betonarme yapı elemanı ile ilgili ilk teori Rausch tarafından 1929 tarihinde ortaya konulmuştur. Teorinin ilk adımı olarak, model oluşturacak kesitin şekli içi boşluklu kesit olarak seçilmiştir. Tabii yapılan bu seçimdeki kabul teorik temellere dayanmaktadır. Yani bu seçim yapılırken kesitin orta bölgesindeki gerilmelerin kesitin çeperlerindeki gerilmelere oranla daha küçük olduğu düşünülerek yapılmıştır. Buda göstermektedir ki boşluklu yada dolu kesitlerin maksimum burulma kapasiteleri yaklaşık aynıdır. Dolu ve boşluklu kesitin taşıdığı burulma momenti-burulma donatısı oranı grafiğine bakıldığı zaman (Şekil 2.8) her iki kesitinde çatlama momentleri farklılık göstermesine rağmen taşıma kapasitelerinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Şekil 2.9'da uzay kafes analojisinin başlangıç noktasını oluşturan boşluklu kesit analojisinin (ince cidarlı tüp analojisi) modeli verilmiştir (Csikos ve Hegedus, 1998).

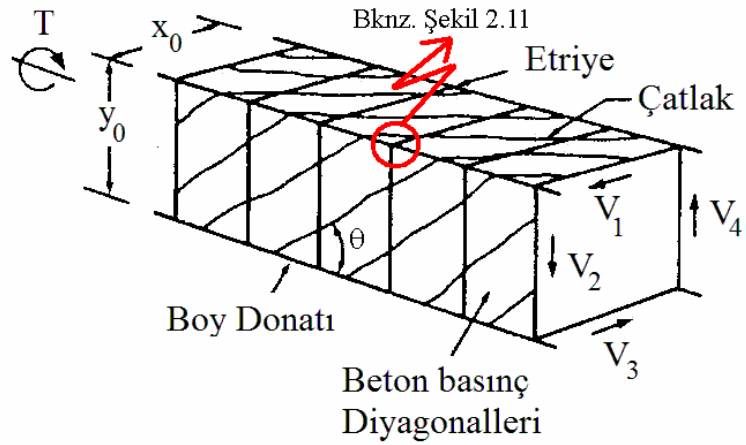


Şekil 2.8: Dolu ve boşluklu kesitlerde taşınan burulma momenti-donatı oranı grafiği (Leet ve Bernal, 1997)

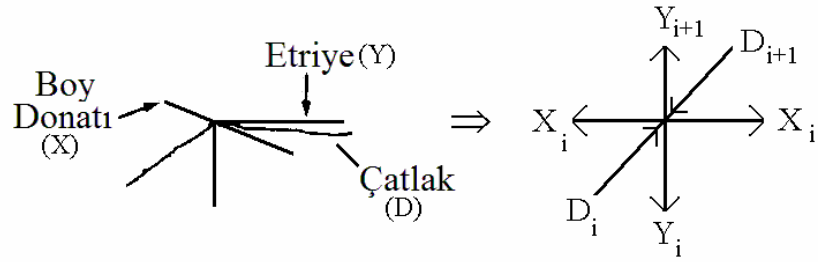


Şekil 2.9: Boşluklu kesit analogisi modeli (MacGregor ve Ghoneim, 1995)

Çatlama sonrasında beton oluşan çatlaklar nedeni ile helezoidik parçalara ayrılır ve bu helezoidik beton parçalarının boyuna donatı ve etriye ile etkileşimi, uzay kafes sistem kabul edilir. Bu şekilde uzay kafes içerisinde yer alan elemanların yük analizi yapılabilir (Csikos ve Hegedus, 1998). Şekil 2.10'da uzay kafes analogisine ait sistem modeli verilmiştir.



Şekil 2.10: Uzay kafes analogisi modeli (Macgregor ve Ghoneim,1995)



Şekil 2.11: Uzay kafes analogisinde temsil edilen kuvvetler

Uzay kafes modelinde boyuna donatıda meydana gelen iç kuvvetler “X”, etriyede meydana gelen iç kuvvetler “Y” ve diyagonal beton basınç kuvvetleri de “D” harfleriyle temsil edilmektedir. Kuvvetlerin gösterilişleri Şekil 2.11’de detaylı olarak verilmiştir. Betonarme yapı elemanı üzerinde meydana gelen helezolik çatlakların yapı elemanını n adet parçaya böldüğü düşünülürse yapı elemanı üzerinde çatlak oluşturacak F kuvveti n adet parçaya ait F_i kuvvetlerinin toplamına eşit olmaktadır. Şekil 2.11’de yer alan basitleştirilmiş uzay kafes modeli incelendiği zaman; yatay yönlü kuvvetlerin eşitliğine bakıldığında “D” kuvvetinin sabit olduğu görülmektedir, aynı şekilde “D” ekseninde kuvvet eşitliği incelendiğinde “D” kuvvetleri sabit olduğu için “Y” kuvvetlerinin de sabit olduğu görülmektedir. Bu bilgiler ışığında Denklem 2.2 yazılabilir.

$$D = X \cdot \cos \theta + Y \cdot \sin \theta \quad (2.2)$$

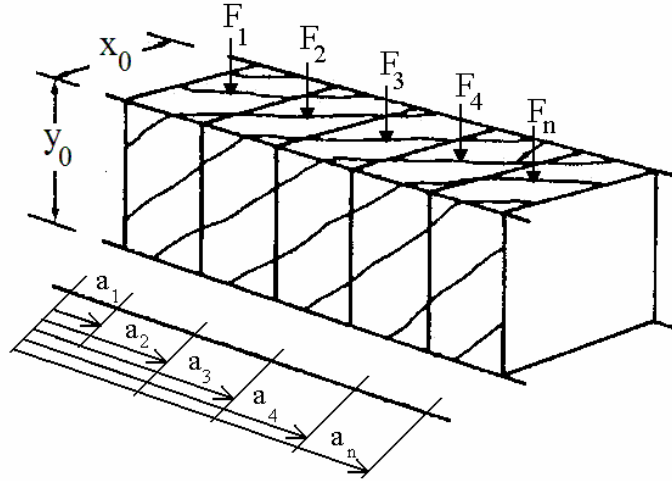
Yapı elemanı üzerine gelen F kuvvetinin formülü uzay kafes modelinden aşağıdaki eşitlikle bulunur.

$$F = D \cdot \sin \theta \quad (2.3)$$

Denklem 2.3 içerisinde “ D ” yerine Denklem 2.2’de verilmiş olan eşitlik yazılırsa;

$$F = (X \cdot \cos \theta + Y \cdot \sin \theta) \cdot \sin \theta \quad (2.4)$$

değeri elde edilir.



Şekil 2.12: Her bir F kuvvetinin yapı elemanı üzerinde oluşturacağı burulma momenti

Şekil 2.12’den de görülebileceği gibi uzay kafes analogisi yöntemiyle bulunan F kuvvetlerinin başlangıç noktasına olan uzaklıkları a_i ($i=1$ ’den n ’ye kadar) olarak alınırsa bu kuvvetlerin başlangıç noktasında oluşturacağı burulma momenti bu kuvvetlerin oluşturacağı ayrı ayrı momentler toplamına eşit olur.

$$T = \sum_{i=1}^n F_i \cdot a_i = F \cdot \sum_{i=1}^n a_i = (X_i \cdot \cos \theta + Y_i \cdot \sin \theta) \cdot \sin \theta \cdot \sum_{i=1}^n a_i \quad (2.5)$$

Betonarme yapı elemanı içerisindeki boy donatı aralığına b , bir adet etriye içerisinde kapalı kalan alana A_e dersek;

$$T = (X_i \cdot \cos \theta + Y_i \cdot \sin \theta) \cdot \sin \theta \cdot \sum_{i=1}^n \frac{2 \cdot A_{ei}}{b} = (X_i \cdot \cos \theta + Y_i \cdot \sin \theta) \cdot \sin \theta \cdot \frac{2 \cdot A_e}{b} \quad (2.6)$$

Boy donatının ve etriyenin maksimum burulma momenti kapasitesinde aktığı ve çatlama açısının $\theta = 45^\circ$ olduğu kabul edilirse, maksimum burulma momenti kapasitesi için iki farklı formül elde edebiliriz.

$$T_{u1} = \frac{2 \cdot A_e \cdot A_{sl} \cdot f_{yk}}{s} \quad (2.7)$$

$$T_{u2} = \frac{2 \cdot A_e \cdot A_{sw} \cdot f_{yw}}{s} \quad (2.8)$$

Burada ;

A_{sl} : Boyuna donatı kesit alanı

A_{sw} : Etriye kesit alanı

f_{yk} : Boyuna donatı akma dayanımı

f_{yw} : Etriye akma dayanımı

s : Etriye aralığı

2.2.2. Elastik ve plastik teori

Bu iki yöntem çatlama öncesi davranışta çatlama yükünü hesaplayabilmek için kullanılmaktadır. Elastik teori için Saint-Venant tarafından önerilen eşitlikte çatlama anındaki elastik burulma momenti (T_e) aşağıdaki gibidir.

$$T_e = \alpha_e \cdot x^2 \cdot y \cdot f_{ctk} \quad (2.9)$$

Yukarıdaki formülde x ve y betonarme kirişin boyutlarını, α Saint-Venant sabitini, f_{ctk} ise betonun karakteristik çekme dayanımını göstermektedir. Saint-Venant sabiti yapı elemanı kesit boyutlarına göre Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1: Burulma İçin St.Venant Katsayıları (Beer ve Johnston, 1992)

y/x	1.0	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	10.0	∞
α	0.208	0.219	0.231	0.246	0.258	0.267	0.282	0.291	0.312	0.333

Elastik teoriye ait Denklem 2.9'daki problem, elde edilen sonuçların yaklaşık %50 sinin tutarsız sonuçlar vermesidir. Elastik teoriye göre hesaplanan burulma momenti değerlerinin gerçek değerlerden daha düşük değerler verdiği rapor edilmiştir. Bu aradaki ilave burulma dayanımı betonun plastik davranışından kaynaklanabilir. Elastik teoride olduğu gibi plastik teoride de, göçmenin maksimum çekme gerilmelerinin betonun çekme dayanımına (f_{ctk}) ulaştığı anda oluştuğu kabul edilir (Baksh, Wafa ve Akhtaruzzaman, 1990). Nylander bu aradaki büyük farklılığı ortadan kaldırmak için 1955 yılında ilk olarak plastik yöntemi kullanmıştır. Nylander elastik teori denklemini baz alarak ve Nadai'ye ait plastik sabiti de denklem içerisinde kullanarak plastik yöntemle ait denklemi ortaya çıkarmıştır (Csikos ve Hegedus, 1998). Bu denklem;

$$T_p = \alpha_p \cdot x^2 \cdot y \cdot f_{ctk} \quad (2.10)$$

$$\alpha_p = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{6} \cdot \frac{x}{y} \right) \quad (2.11)$$

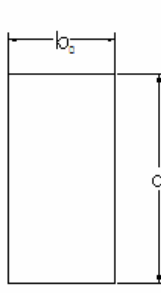
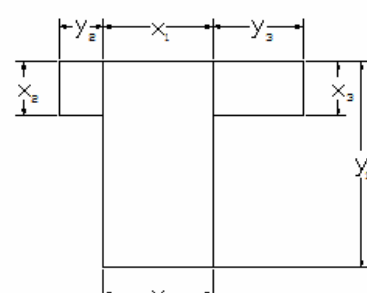
Plastik teori elastik teorinin bir adım ötesi olmasına rağmen betonarme bir kirişte burulma momenti sonucu gerçekleşen göçme tam anlamıyla plastik değildir.

Plastisite teorisi ile burulma hesabında, bütün kesitin plastik olduğu ve kayma gerilmelerinin kesitin her noktasında aynı olduğu kabul edilir. Hesapları kolaylaştırmak amacıyla genellikle "Kum Tümseği Analojisi" kullanılır. Bu anoloji Prandtl'in membran analogisine benzer. Yatay vaziyette tutulan kesit üzerine dökülen kohezyonsuz kumun aldığı şeklin, plastik yöntemdeki gerilme fonksiyonuna benzemesine dayanan bu analogide, kum tümseğinin eğimi, kayma gerilmesine eşit kabul edilirse, tümseğin hacmi, kesitin taşıyabileceği burulma momentinin yarısına eşittir (Ersoy, 1975).

Bilindiği gibi, tablalı kesitlerde elastisite teorisine göre çözüm çok karmaşık bir hale geldiğinden, başta Rausch ve Bach olmak üzere çeşitli araştırmacılarca çeşitli yaklaşık denklemler önerilmiştir. Bunlardan Bach tarafından önerilen yaklaşımda kesit dikdörtgenlere bölünerek çözülmektedir. Plastik teori için bu paralelde bir yaklaşım Mattock tarafından önerilmiştir. Tablo 2.2’de dikdörtgen ve tablalı kirişler için plastik ve elastik yöntemlere göre elde edilen denklemler verilmiştir. Ayrıca, her iki yöntem için önerilen yaklaşık denklemler de Tablo 2.2 içerisinde verilmiştir (Ersoy, 1975).

Tablo 2.2’de verilen denklemlerde; τ_t burulma kayma gerilmesini, T burulma momentini, α elastik teori sabitini, G_c betonun kayma modülünü, x , y , b ve d notasyonları ise kiriş boyutlarını temsil etmektedir

Tablo 2.2: Dikdörtgen ve Tablalı Kirişler İçin Elastik ve Plastik Teori Denklemleri (Ersoy, 1975)

			Tablalı Kesitler İçin Yaklaşık Denklemler
Elastik Teori	$\tau_{\max} = \frac{T}{\alpha \cdot b_0^2 \cdot d_0}$ $\theta = \frac{T}{G_c \cdot \alpha \cdot b_0^3 \cdot d_0}$	-	$\tau_t = \frac{T \cdot b_0}{\sum \alpha \cdot x_i^2 \cdot y_i}$
Plastik Teori	$\tau_t = \frac{2 \cdot T}{b_0^2 \cdot (d_0 - \frac{b_0}{3})}$	$\tau_t = \frac{2 \cdot T}{b_0^2 \cdot (d_0 - \frac{b_0}{3}) + d^2 \cdot (b - b_0)}$	$\tau_t = \frac{2 \cdot T}{\sum x_i^2 \cdot (y_i - \frac{x_i}{3})}$

2.2.3. Yanal eğilme teorisi

Çatlama öncesi davranışta çatlama yükünü hesaplayabilmek için kullanılan bir diğer yöntem ise yanal eğilme yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemin temeli burulma ile ilgili yapılmış olan testlerden alınan sonuçlara dayanmaktadır (Csikos ve Hegedus, 1998). Bu yöntemle göre elde edilen burulma dayanımı formülü;

$$T_{sb} = \frac{x^2 \cdot y}{3} \cdot f_{cts} \quad (2.12)$$

Denklem 2.12'de verilen denklemde T_{sb} yanal eğilme teoremine göre hesaplanan burulma momentini, f_{cts} betonun yarmada çekme dayanımını, x ve y ise kirişe ait boyutları temsil etmektedir.

Yanal eğilme teorisi ayrıntılı olarak incelenecek olursa bu teorinin Rausch'un uzay kafes analogisine göre daha yeni bir teori olduğu görülmektedir. Bu teori ilk olarak 1958 yılında Lessig tarafından ortaya atılmıştır. Yanal eğilme teorisinin temel karakteristiği yanal göçme yüzeyi kabulüdür. Dörtgen bir kirişin üç yüzeyinin helezoik çatlaklarla kuşatıldığı ve dördüncü yüzeyinin beton basınç bölgesi olduğu görülmektedir. Bazı matematiksel hesaplar sonucunda Hsu 1968 yılında Denklem 2.13 ve 2.14'ü önermiştir (Csikos ve Hegedus, 1998).

$$T_{usb} = \frac{x^2 \cdot y}{3} \cdot (2,4 \cdot \sqrt{f_{ck}}) + \sqrt{m} \cdot \frac{f_{yk}}{f_{yw}} \left(1 + 0,2 \cdot \frac{x}{y}\right) \cdot \frac{x \cdot y \cdot A_{st} \cdot f_{yw}}{s} \quad (2.13)$$

$$T_{usb} = \frac{x^2 \cdot y}{3} \cdot (2,4 \cdot \sqrt{f_{ck}}) + \alpha \cdot \frac{x \cdot y \cdot A_{st} \cdot f_{yw}}{s} \quad (2.14)$$

Burada;

$$m = \frac{2 \cdot A_{st} \cdot s}{2 \cdot A_{st} \cdot (x + y)} \quad (2.15)$$

Burada x ve y kesitin en dış lifine olan mesafelerdir yani x_0 ve y_0 a pas payları ilave edildikten sonra bulunan dıştan dışa kesit boyutlarıdır.

Yukarıda anlatılan elastik, plastik ve yanal eğilme teorilerini kendi içinde karşılaştıracak olursak her üç teorinin de boyut ($x^2.y$) çarpanını içerdiği rahatlıkla görülmektedir. Bu üç teori arasındaki fark ise formüllerdeki sabit sayılar ve malzeme sabitleridir. Elastik ve plastik teoride f_{ctk} (Karakteristik beton çekme dayanımı) çarpanı yer almaktayken yanal eğilme teorisinde bu çarpan yerine f_{cts} (Yarmada çekme dayanımı) çarpanı yer almaktadır.

Kesit çatlama dayanımının belirlenmesi için bugüne kadar önerilen bütün denklemleri Denklem 2.16'da verildiği şekilde genelleylebiliriz (Ersoy, 1975).

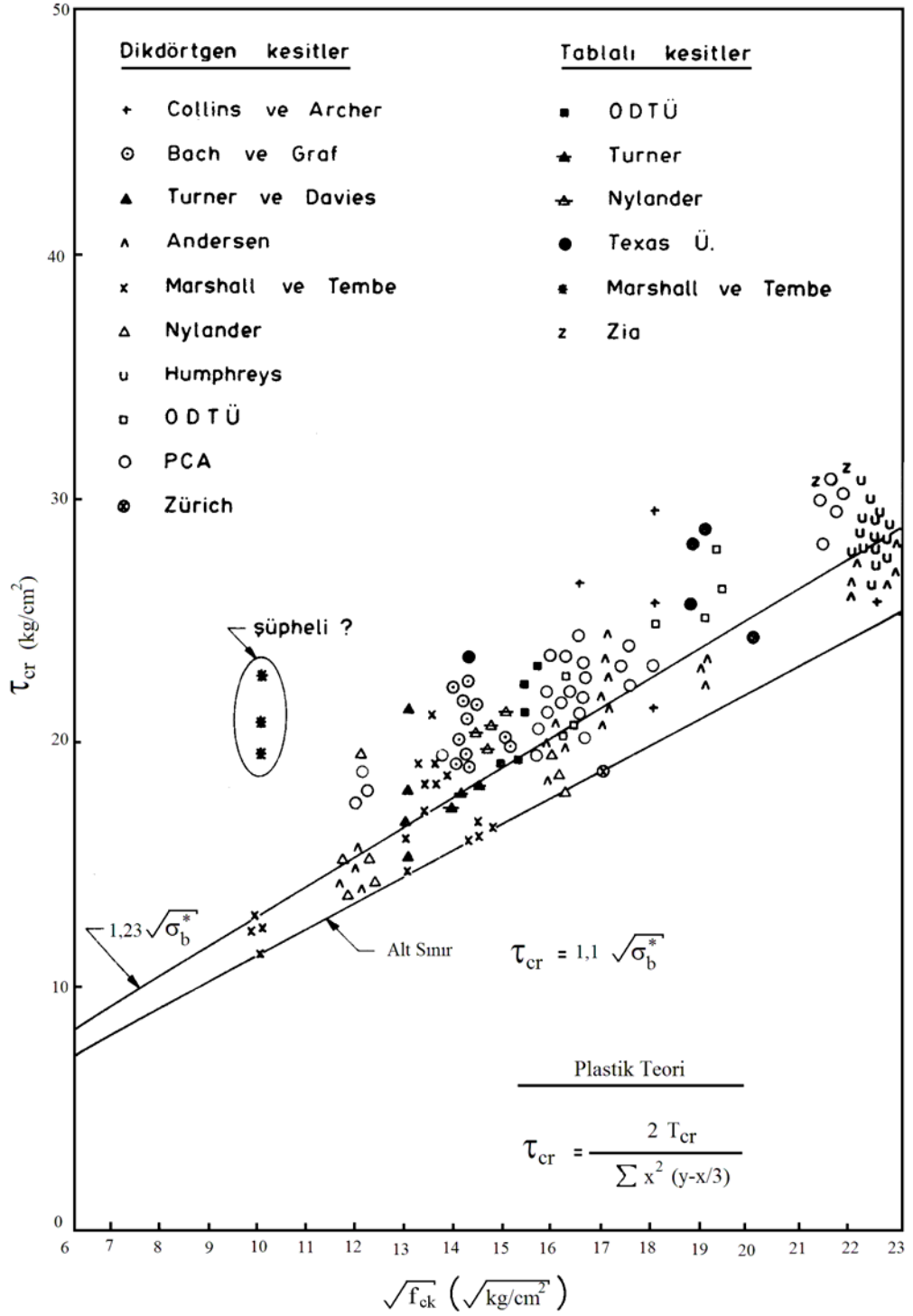
$$T_{cr} = \tau_t . S \quad (2.16)$$

Denklem 2.16'da yer alan S şekil faktörü olup yapı elmanı kesitine ait boyutları temsil etmektedir. Bilindiği gibi bir yönde çekme, diğer yönde basınç basınca maruz beton elemanların çekme mukavemeti, basit çekme mukavemetinden azdır. Laboratuvar deneyleri, bu mukavemetin yaklaşık olarak $f_{ctk} = 1,23 \cdot \sqrt{f_{ck}}$ olduğunu göstermiştir (Doudak ve Ersoy, 1969).

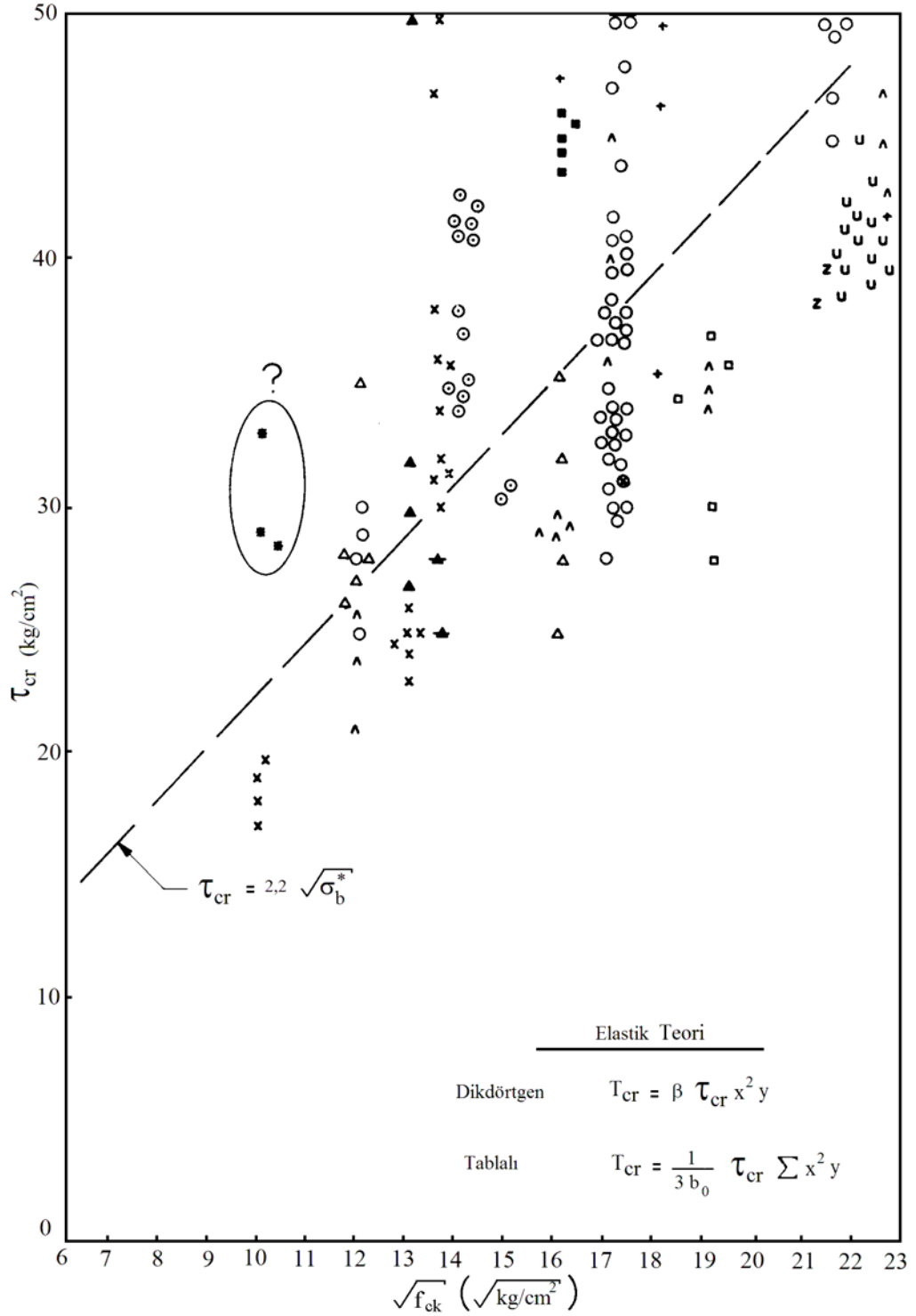
Şekil 2.13, 2.14 ve 2.15'te çeşitli deneylerden elde edilen çatlama momenti değerlerinden elastik, plastik ve yanal eğilme teorileri kullanılarak elde edilen kayma gerilmeleri, $\sqrt{f_{ck}}$ nın bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Bu üç grafikten aşağıda iki madde halinde verilen sonuçlar çıkarılabilir (Ersoy, 1975).

- En fazla dağılım elastisite teorisine göre hesaplanan kayma gerilmelerinde görülmektedir. En az dağılım ise plastik teoriye göre hesaplanan gerilmelerde olmaktadır.
- $\tau_{cr} = 1,23 \sqrt{f_{ck}}$ değerine en yakın değerlerin plastik teoriden elde edildiği görülmektedir.

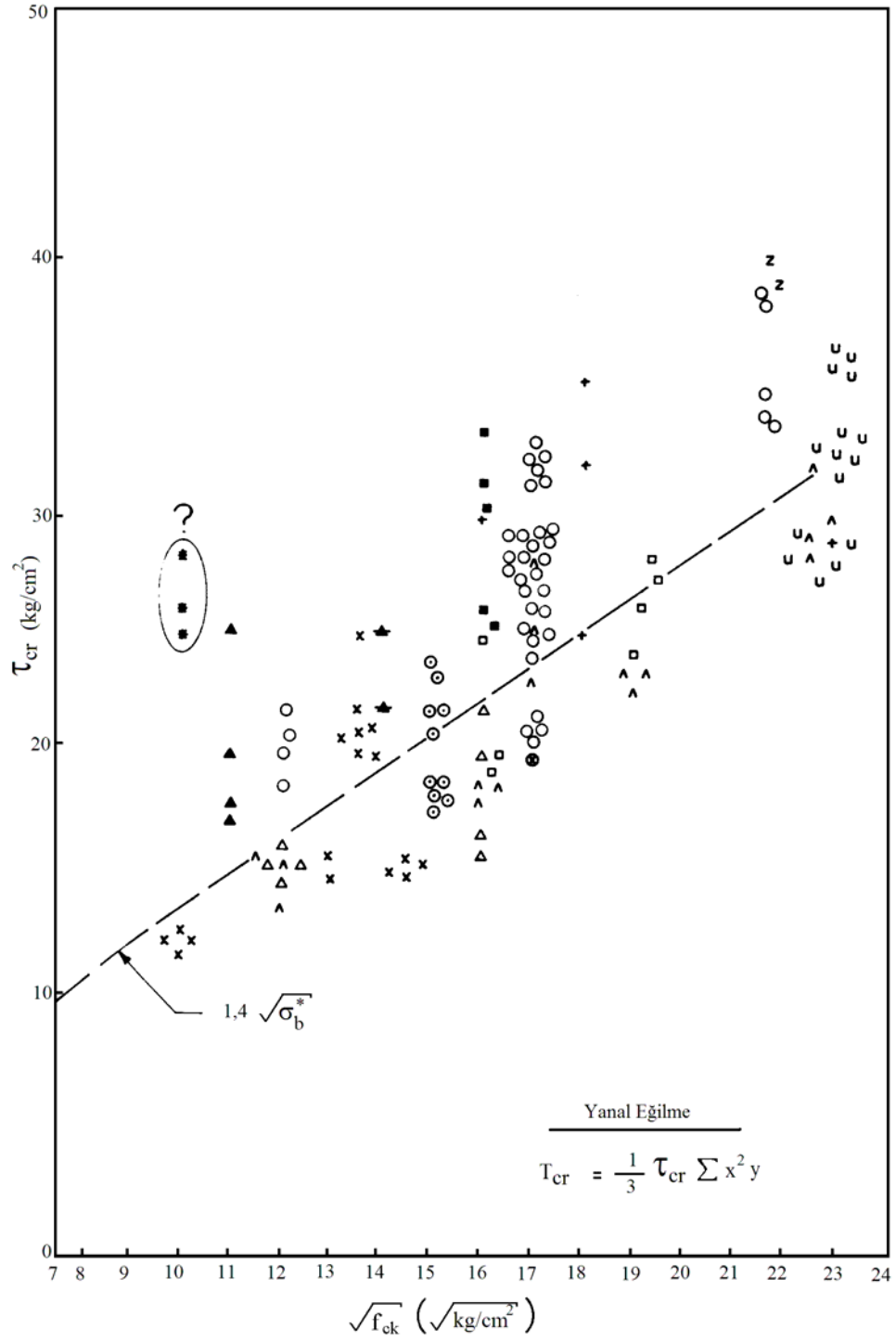
Özetlersek, en az dağılımın görüldüğü plastik teoriye göre hesaplanan kayma gerilmesi değerleri, deneylerden elde edilen sonuçlara yakın sonuçlar vermektedir. Dağılım arttıkça deneylerle analitik hesap sonucu elde edilen verilerde farklılıklar olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 2.13: Çeşitli deneylerden elde edilen çatlama momenti değerlerinden plastik teori kullanılarak elde edilen kayma gerilmeleri grafiği (Ersoy, 1975)



Şekil 2.14: Çeşitli deneylerden elde edilen çatlama momenti değerlerinden elastik teori kullanılarak elde edilen kayma gerilmeleri grafiği (Ersoy, 1975)



Şekil 2.15: Çeşitli deneylerden elde edilen çatlama momenti değerlerinden yanal eğilme teorisi kullanılarak elde edilen kayma gerilmeleri grafiği (Ersoy, 1975)

2.3. Yönetmeliklere Göre Basit Burulma ve Donatı Hesabı

Bu bölümde ülkemizde kullanılmakta olan TS500/Şubat 2000 yönetmeliği ve Amerikan Beton enstitüsüne ait ACI 318-02 yönetmeliğinde basit burulma hesabı için yer alan eşitlikler anlatılacaktır.

2.3.1. TS500/Şubat 2000 yönetmeliğine göre basit burulma ve donatı hesabı

TS500 de T_{cr} (burulmada çatlama dayanımı) için Denklem 2.17 önerilmektedir.

$$T_{cr} = 1,35 \cdot f_{ctd} \cdot S \quad (2.17)$$

Denklem 2.17 içerisinde yer alan S burulma dayanım momentidir ve bu değer Tablo 2.3'ten alınabilir.

Tablo 2.3: Değişik Kesitler İçin Yaklaşık Burulma Dayanım Momentleri (TS500/Şubat 2000)

Dikdörtgen kesit	$S = \frac{b_w^2 \cdot h}{3}$
Tablalı kesit	$S = \frac{\sum x^2 \cdot y}{3}$
Dairesel veya çok kenarlı kesit	$S = \frac{\pi \cdot \phi^3}{12}$
İnce çeperli kutu kesitler	$S = 2 \cdot A_e \cdot t_e$

Tablo 2.3 içerisinde yer alan eşitliklerde;

A_e : Kesit köşelerindeki donatı merkezlerini birleştiren sınır içinde kalan alan.

Kutu kesitlerde duvar kalınlığı ortasından geçen çevre içinde kalan alan.

t_e : Kutu kesit duvar kalınlığı.

x, y : Tablalı kesiti oluşturan dikdörtgenlerin kısa ve uzun kenarları.

b_w : Kiriş gövde genişliği.

h : Kiriş yüksekliği.

Hesabı yapılacak olan kirişin tasarım burulma momenti (T_d) burulmada çatlama momentine (sadece uygunluk burulması durumunda) eşit kabul edilmektedir.

$$T_d = T_{cr} \quad (2.18)$$

Yönetmelik şartlarına göre eğer $T_d \leq 0,65 \cdot f_{ctd} \cdot S$ ise burulma ihmal edilebilir. Bu durumda kirişte minimum etriye koşulu yalnızca kesme için hesaplanır.

Burulma için gerekli minimum etriye alanı Denklem 2.19'dan hesaplanmaktadır.

$$A_{ot} = \frac{T_d}{2 \cdot A_e \cdot f_{ywd}} \cdot S \quad (2.19)$$

Burulmanın söz konusu olduğu durumlarda, A_e alanını çevreleyen etriyenin kesit alanı A_{ot} den az olamaz ve burulma için gerekli etriyeye eşit hacimde boyuna donatı bulundurulması zorunludur. Gerekli boyuna donatı Denklem 2.20'den hesaplanmalıdır.

$$A_{sl} = \frac{A_{ot}}{s} \cdot u_e \cdot \frac{f_{ywd}}{f_{yd}} \quad (2.20)$$

2.3.2. ACI 318-02 yönetmeliğine göre basit burulma ve donatı hesabı

Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) tarafından yayınlanan 318-02 yönetmeliğinde burulma dayanımı hesaplamak için önerilmiş olan eşitlikler aşağıdaki gibidir.

Dolu kesitlerin burulmada çatlama dayanımı;

$$T_{cr} = \frac{\sqrt{f_c}}{3} \cdot \left(\frac{A_c^2}{P_c} \right) \quad (2.21)$$

olarak tanımlanmaktadır.

Boşluklu kesitlerin burulmada çatlama dayanımı;

$$T_{cr} = \frac{\sqrt{f_c'}}{3} \cdot \left(\frac{A_c^2}{P_c}\right) \cdot \left(\frac{A_g}{A_c}\right) \quad (2.22)$$

Burada;

T_{cr} : Burulmada çatlama dayanımı (kN.m)

A_c : Elemanın tüm kesit beton alanı (mm²)

P_c : Kesitin dış çevresi toplamı (mm)

f_c' : Beton basınç dayanımı (MPa)

A_g : Elemanın toplam kesit alanından boşluklar çıkarıldıktan sonra kalan alan (mm²)

ACI 318-02 yönetmeliğinde, burulma çatlakları oluşuktan sonra betonarme bir yapı elemanının burulma dayanımının esas olarak (uzay kafes analogisinde olduğu gibi) kapalı etriyeler, boy donatı ve diyagonal beton basınç kuvvetleri tarafından karşılandığı kabul edilmektedir (Fang and Chui, 2005). Kesitin burulma momenti değeri (T_n) Denklem 2.23'te, kesitte bulunması gerekli boy donatı miktarı Denklem 2.24'te verilmiştir.

$$T_n = \frac{2 A_o A_{ot} f_{yw}}{s} \cot \theta \quad (2.23)$$

$$A_{sl} = \frac{A_{ot}}{s} \cdot P_h \cdot \left(\frac{f_{yw}}{f_{yd}}\right) \cdot \cot^2 \theta \quad (2.24)$$

A_{ot} : Kesitteki burulma donatısı (enine donatı) alanı (mm²)

A_{sl} : Kesitteki burulma donatısı (boyuna donatı) alanı (mm²)

f_{yw} : Enine donatı akama dayanımı (MPa)

f_{yd} : Boyuna donatının akama dayanımı (MPa)

s : Enine donatı aralığı (mm)

θ : 30° - 60° arasında bir değer alan çatlak açısı

A_o : Kayma akısının takip ettiği yolun içinde kalan alan (mm²)

A_{oh} : Enine donatının merkezinden geçen eksenler arasında kalan alan (mm²)

P_h : Enine donatının merkezinden geçen eksenler arasında kalan alanın çevresi (mm)
 A_o değerinin $0.85A_{oh}$ kabul edilmesi durumu haricindeki durumlarda, A_o hesapla
bulunacaktır. A_{oh} ise enine donatının merkezinden geçen eksenler arasındaki alanı
ifade eder.

Basit burulma için gerekli minimum etriye donatısı ACI 318-02’de Denklem 2.25 ve
2.26’da verildiği şekilde tanımlanmıştır.

$$2.A_{t,\min} = 0,062 \cdot \sqrt{f'_c} \frac{b_w \cdot s}{f_{yw}} \quad (2.25)$$

$$2.A_{t,\min} \geq 0,35 \cdot \frac{b_w \cdot s}{f_{yw}} \quad (2.26)$$

Basit burulma için gerekli minimum boyuna donatı ACI 318-02’de Denklem 2.27’de
verildiği şekilde tanımlanmıştır.

$$A_{t,\min} = \frac{5 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot A_c}{12 \cdot f_{yd}} - \left(\frac{A_t}{s} \right) \cdot P_h \cdot \frac{f_{yw}}{f_{yd}} \quad (2.27)$$

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde ilk olarak basit burulma davranışı incelenecektir. Burulma davranışı ile ilgili teorilerden bahsedilecek, lif takviyeli polimer kullanımının burulma dayanımı üzerindeki etkileri incelenecek ve bu konu ile ilgili olarak yapılmış olan çalışmalar anlatılacaktır.

3.1. Güçlendirilmemiş Betonarme Kirişlerde Basit Burulma Deneyleri

Bu bölümde çeşitli araştırmacılar tarafından son yirmi yıl içerisinde güçlendirme yöntemleri uygulanmamış betonarme kirişlerde, basit burulma ile ilgili yapılmış olan deneysel çalışmalara kısa kısa değinilecektir.

3.1.1. A. Csikos ve I. Hegedus

Csikos ve Hegedus tarafından 1998 yılında 15 adet donatılı ve donatısız kiriş numunesi üzerinde basit burulma deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada elde edilen deneysel verilerle yönetmeliklerde önerilen hesap yöntemlerinden elde edilen teorik değerlerin karşılaştırılması amaçlanmıştır. Kiriş boyutları, kullanılan beton kalitesi tüm numunelerde aynı alınmıştır. Deneylerde değişken olarak donatının olup olmadığı ve donatı miktarı parametreleri göz önünde tutulmuştur.

Bu çalışmada burulma hesabının temellerini oluşturan elastik, plastik ve yanal eğilme teorileri ile hesaplanan burulma kapasitelerinin deneyler sonucunda elde edilen gerçek burulma kapasitesi değerleri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Deneylerden ve hesaplardan elde edilen çatlama momenti değerlerini özetleyen değerler Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Deneylelerden ve Hesaplardan Elde Edilen Çatlama Momenti Değerleri (Csikos ve Hegedus, 1998) (Kullanılan değerler kN.m cinsindedir)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	DeneySEL Sonuçlar	Elastik Teori	(1)/(2)	Plastik Teori	(1)/(4)	Yanal Eğilme Teorisi	(1)/(6)
A-1	1,61	1,13	1,42	1,81	0,89	1,54	1,05
A-2	1,69	1,32	1,28	2,11	0,80	1,79	0,94
A-3	-	1,24	-	1,98	-	1,68	-
B-1	-	1,45	-	2,32	-	1,97	-
B-2	1,4	1,51	0,93	2,42	0,58	2,05	0,68
B-3	1,64	1,43	1,15	2,3	0,71	1,95	0,84
C-1	1,79	1,47	1,22	2,36	0,76	2,01	0,89
C-2	1,89	1,47	1,29	2,36	0,80	2,01	0,94
C-3	1,63	1,41	1,16	2,26	0,72	1,92	0,85
D-1	1,73	1,29	1,34	2,07	0,84	1,76	0,98
D-2	1,69	1,49	1,13	2,4	0,70	2,04	0,83
D-3	1,69	1,47	1,15	2,36	0,72	2,01	0,84
E-1	2,25	1,55	1,45	2,49	0,90	2,12	1,06
E-2	1,69	1,48	1,14	2,38	0,71	2,02	0,84
E-3	2,06	1,52	1,36	2,44	0,84	2,07	1,00

Tablo 3.1'den elde edilen çatlama momenti değerleri karşılaştırıldığı zaman elastik teori ile hesaplanan çatlama momenti değerleri plastik teoriye göre hesaplanan değerlere göre daha anlamlı sonuçlar vermektedir. Ancak en iyi tahmin yanal eğilme teorisine göre hesaplanan sonuçlardan elde edilmektedir.

Sonuç olarak tasarım amaçlı uygun çatlama momenti değerleri bulunmak isteniyorsa elastik teori kullanılması uygundur fakat modelleme için gerçek değere en yakın sonuç elde edilmek isteniyorsa yanal eğilme teorisi kullanılması uygundur.

3.1.2. Atef H. Bakhsh ve diğerleri

Atef H. Bakhsh ve diğerleri tarafından 1990 yılında 13 kiriş numunesi üzerinde basit burulma deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmanın amacı ACI yönetmeliğinde herhangi bir tasarım formülü yer almayan yüksek dayanımlı yapı elemanlarının basit burulma altında davranışlarını araştırmaktır. Çalışmada kullanılan beton basınç dayanımı 40 ile 90 MPa arasında değişmektedir. Kiriş numunelerinin boyutları her numune için sabit tutulmuş, hiçbir numunede donatı kullanılmamış ve tek değişken olarak beton kalitesi alınmıştır.

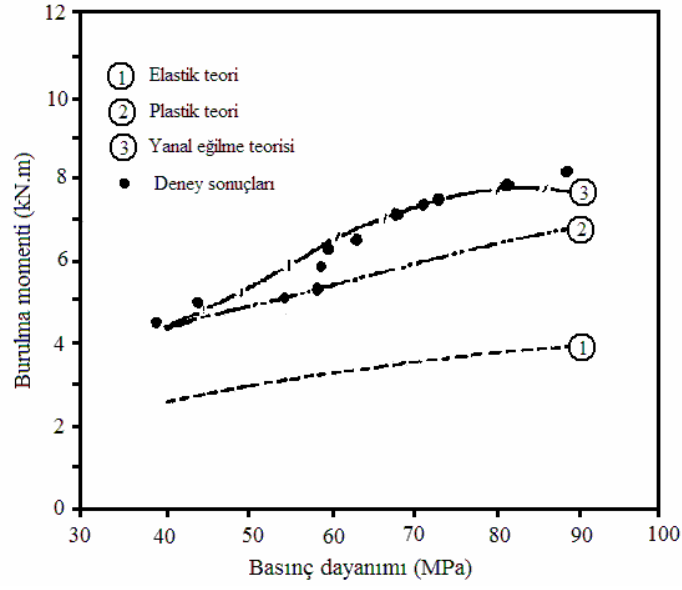
Tablo 3.2’de Atef H. Bakhsh ve diğeri tarafından yapılan deney sonucunda elde edilen burulma dayanımları ve elastik, plastik ve yanal eğilme teorileri kullanılarak hesaplanan teorik sonuçlar birlikte verilmiştir. Deneysel sonuçlar ile teorik sonuçların arasındaki yakınlık oranını bulmak için Tablo 3.2’de yer alan T_{den}/T_{teo} hesabında teorik değerler deneysel verilere en yakın sonucu veren yanal eğilme teorisinden elde edilen değerlerdir.

Tablo 3.2: Deneysel ve Teorik Olarak Elde Edilen Burulma Dayanımları
(Atef H. Bakhsh ve diğ., 1990)

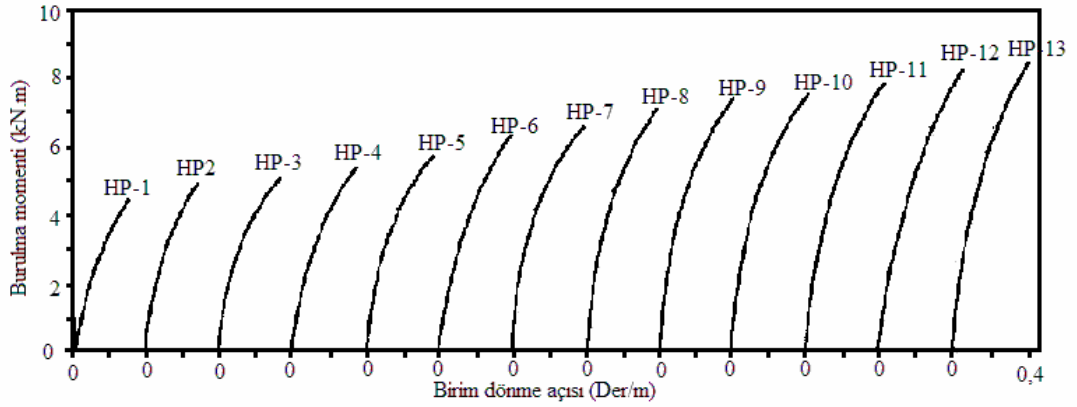
	Deneysel Sonuçlar (kN.m)	Elastik Teori (kN.m)	Plastik Teori (kN.m)	Yanal Eğilme Teorisi (kN.m)	T_{den}/T_{teo}^*
HP-1	4,44	2,53	4,29	4,43	1,00
HP-2	4,95	2,68	4,54	4,48	1,10
HP-3	5,02	2,98	5,05	5,18	0,97
HP-4	5,29	3,10	5,25	5,49	0,96
HP-5	5,81	3,10	5,25	5,85	0,99
HP-6	6,23	3,21	5,44	6,45	0,97
HP-7	6,49	3,33	5,64	6,60	0,98
HP-8	7,10	3,41	5,78	6,82	1,04
HP-9	7,32	3,41	5,78	7,42	0,99
HP-10	7,54	3,44	5,83	7,55	1,00
HP-11	7,61	3,48	5,89	7,59	1,00
HP-12	7,78	3,63	6,15	7,68	1,01
HP-13	8,07	3,82	6,48	7,81	1,03

* Teorik burulma momenti değeri, yanal eğilme teorisine göre hesaplanan değerlerdir.

Şekil 3.1’de Tablo 3.2’de özetlenen değerler burulma momenti – basınç dayanımı grafiği elastik teori, plastik teori ve yanal eğilme teorileri için gösterilmiştir. Şekil 3.2’de her bir deney numunesi için burulma momenti – birim dönme açısı grafiği gösterilmiştir. Burulma - dönme eğrisi maksimum burulma dayanımının yaklaşık %50 sine kadar lineer bir davranış göstermektedir.



Şekil 3.1: Burulma momenti beton basınç dayanımı ilişkisi (Bakhsh ve diğ., 1990)



Şekil 3.2: Burulma momenti birim dönme ilişkisi (Bakhsh ve diğ., 1990)

Atef H. Bakhsh ve diğeri yapmış oldukları çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçları çıkarmışlardır.

- Donatısız yüksek dayanımlı beton kirişler basit burulma momenti etkisi altında ani ve gevrek bir davranış göstererek geçmektedirler.
- Yanal eğilme teorisi, donatısız yüksek dayanımlı beton kirişlerin burulma dayanımı tahmini için kullanılabilir en yakın sonuçları vermektedir.
- Burulma dayanımı hesabı için yarmada çekme dayanımı değerleri kullanılması yakın hesap için daha uygundur.

3.1.3. L. J. Rasmussen ve G. Baker

Rasmussen ve Baker tarafından 1995 yılında normal dayanımlı betonlar ile yüksek dayanımlı betonların basit burulma momenti etkisi altındaki davranışlarını karşılaştırmak amacıyla dörtgen kesitli betonarme kirişler kullanılarak deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada normal dayanımlı beton sınıfında amaçlanan hedef basınç dayanımı 30 MPa, yüksek dayanımlı beton sınıfı için hedeflenen basınç dayanımı ise 50, 70 ve 110 MPa olarak belirlenmiştir. Her bir beton sınıfı için 3 adet numune hazırlanmıştır. Deneyde kullanılacak her bir numune için kullanılan donatı miktarları ve aralıkları sabit tutulmuştur. Tüm numunelere konulan donatı miktarı hem boy donatı olarak hem de etriye olarak göçme anında donatıların akmayacağı oranda konulmuştur.

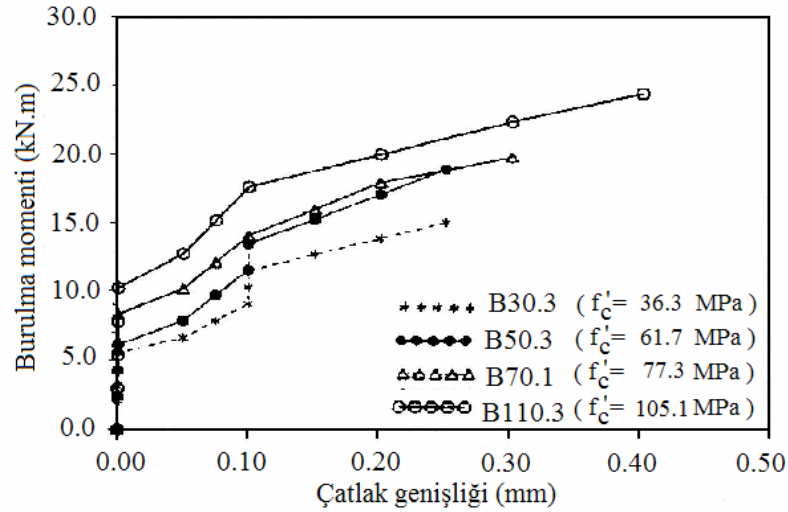
12 adet; yüksek dayanımlı (YDB) ve normal dayanımlı beton (NDB) kullanılarak hazırlanan betonarme kirişin deney sonuçları Tablo 3.3’de verilmiştir.

Deneysel çalışma esnasında yapılan gözlemler sırasında NDB ve YDB kirişlerin çatlama şekillerinin birbirinden farklı olduğu saptanmıştır. YDB kirişler NDB kirişlere göre içerisinde sadece matris çatlakları olmaması bunun yanı sıra agrega çatlama da gerçekleşmesi nedeniyle daha gevrek şekilde kırılırlar. Basit burulmaya maruz YDB kirişler NDB kirişlere göre daha fazla çatlak oluşmaması ile birlikte YDB kirişlerde oluşan çatlaklar NDB kirişlerde oluşan çatlaklara göre daha düzdür. Çatlak sayısı ilk çatlak meydana geldikten sonra göçmenin olduğu ana kadar her dayanımdaki beton için aynı kalmıştır.

Şekil 3.3’de farklı beton sınıflarına ait kirişlerin ortalama çatlak genişlikleri eğrileri verilmiştir. Şekil 3.3’ten açıkça görülmektedir ki beton basınç dayanımının artması, basit burulma etkisinde betonarme bir kiriş için ilk çatlak oluşumunu ertelemeye yaramaktadır. Ancak ilk çatlak oluşuktan sonra çatlak genişlemesi her kiriş için yaklaşık olarak aynı olmuştur.

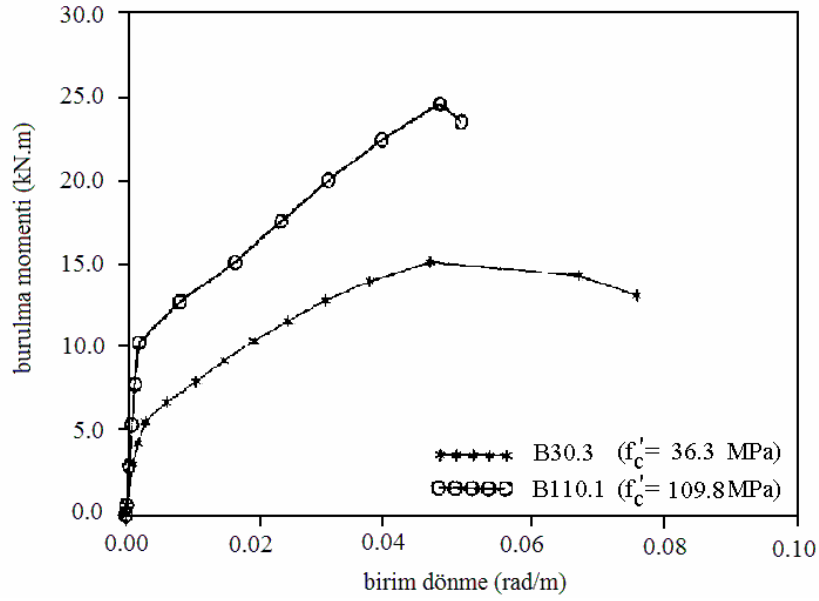
Tablo 3.3: Deneysel Sonuçları (Rasmussen ve Baker, 1995)

Numune	Burulma Dayanımı (kN.m)	Birim Dönme (rad/m)
B30.1	16,62	0,0517
B30.2	15,29	0,0507
B30.3	15,25	0,0449
B50.1	19,95	0,0445
B50.2	18,46	0,0540
B50.3	19,13	0,0459
B70.1	20,06	0,0418
B70.2	20,74	0,0408
B70.3	20,96	0,0467
B110.1	24,72	0,0462
B110.2	23,62	0,0514
B110.3	24,77	0,0478



Şekil 3.3: Farklı dayanımlardaki numuneler için burulma momenti – çatlak genişliği ilişkisi (Rasmussen ve Baker, 1995)

Şekil 3.4’te normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonarme kirişler için burulma – birim dönme ilişkisi gösterilmiştir. Kiriş çatlama öncesi beklediği gibi burulma birim dönme eğrisi lineer davranış göstermektedir. Şekil 3.4’ten açıkça görülmektedir ki yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin çatlak öncesi burulma rijitliği daha yüksektir. Çatlak oluştuğundan sonra burulma rijitliği önemli ölçüde azalmaktadır. Burulma rijitliği yüksek dayanımlı betonarme kirişler için çatlama sonrasında daha hızlı azalmaktadır. Bunun nedeni ise yüksek dayanımlı betonlardaki çatlama formunun daha gevrek olmasıdır. Buna karşın çatlama sonrası NDB ve YDB kirişlerde burulma rijitlikleri yaklaşık eşit olduğu Şekil 3.4’te görülmektedir.



Şekil 3.4: Normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonarme kirişler için burulma momenti – birim dönme ilişkisi (Rasmussen ve Baker, 1995)

Sonuç olarak basit burulma momenti etkisine maruz betonarme kirişlerde diyagonal basınç ve çekme etkileri gözlenmiştir. Hem normal dayanımlı hem de yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde ilk çatlak diyagonal olarak meydana gelmiş ve bu çatlaklar kesme kuvvetlerinin geniş yüzeyde daha büyük olması nedeniyle geniş yüzeyde oluşmuştur. Göçme anında toplam birim dönme miktarı; hem normal dayanımlı hem de yüksek dayanımlı betonarme kirişler için yaklaşık olarak aynıdır. Bu deneyler sonucunda basit burulma altındaki betonarme bir kirişte; belirli burulma momenti ve belirli kesit alanı için normal dayanımlı beton yerine yüksek dayanımlı beton kullanmak şu avantajları sağlamaktadır. Daha küçük çatlak genişlikleri, donatının korozyonunda daha düşük risk, daha yüksek burulma rijitliği, daha düşük donatı gerilmeleri, daha düşük miktarda donatı gereksinimi ve daha küçük boy uzama. Ek olarak NDB kullanılması yerine YDB kullanıldığı zaman daha yüksek çatlama momenti ve daha yüksek burulma momenti kapasitesi elde edilmektedir.

3.1.4. Nasr-Eddine Koutchoukali ve Abdeldjelil Belarbi

Nasr-Eddine Koutchoukali ve Abdeldjelil Belarbi tarafından 2001 yılında betonarme kirişlerde yüksek dayanımlı betonların basit burulma üzerindeki etkilerini araştırmak için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada dokuz adet betonarme kiriş test

edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan temel parametreler basınç dayanımı ve donatı miktarıdır. 50, 60, 80 ve 95 MPa olmak üzere dört farklı beton basınç dayanımı hedeflenmiştir. Donatı miktarı gerekli minimum donatı miktarından daha küçük miktardan başlayarak dengeli donatı oranı miktarına kadar değiştirilerek kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan betonarme kirişlerin beton ve donatı özellikleri Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4: Numune Beton ve Donatı Özellikleri (Koutchoukali ve Belarbi, 2001)

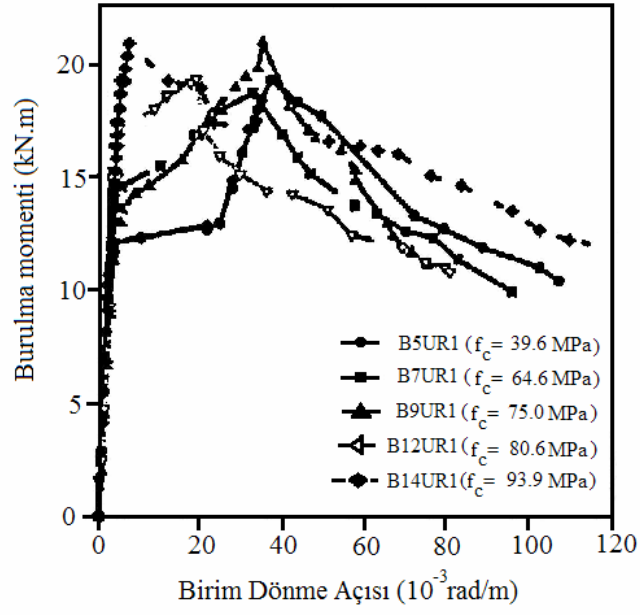
Numune	Boy donatı çapı (mm)	Etriye		Beton basınç dayanımı (MPa)
		Çap (mm)	Aralık (mm)	
B5UR1	4Ø12.7	9.5	108	39.6
B7UR1	4Ø12.7	9.5	108	64.6
B9UR1	4Ø12.7	9.5	108	75.0
B12UR1	4Ø12.7	9.5	108	80.6
B14UR1	4Ø12.7	9.5	108	93.9
B12UR2	4Ø12.7	9.5	102	76.2
B12UR3	4Ø12.7	9.5	95	72.9
	2Ø9.5			
B12UR4	6Ø12.7	9.5	90	75.9
B12UR5	4Ø15.9	9.5	70	76.7

Deneyleri yapılmış olan; dokuz adet yüksek dayanımlı beton kullanılarak hazırlanmış olan betonarme kirişlerden elde edilen veriler Tablo 3.5’de verilmiştir. Çatlama öncesi kirişin davranışı elastiktir. Burulmaya esas olarak beton direnir.

Tablo 3.5: Deneylerden Elde Edilen Sonuçlar (Koutchoukali ve Belarbi, 2001)

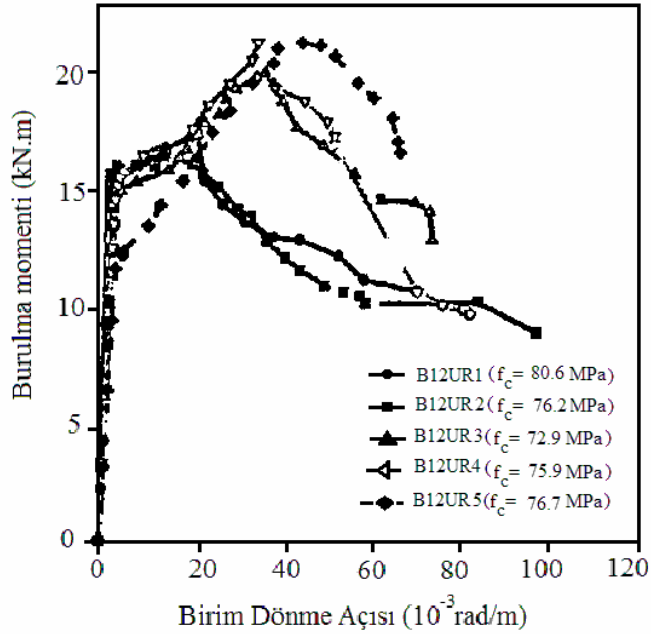
Numune	Çatlama momenti (kN.m)	Burulma kapasitesi (kN.m)	Birim dönme açısı* (der/m)
B5UR1	11.6	19.4	2.18
B7UR1	14.1	18.9	1.93
B9UR1	13.0	21.1	2.05
B12UR1	16.2	19.4	1.14
B14UR1	19.3	21.0	0.21
B12UR2	17.8	18.4	0.75
B12UR3	16.0	22.5	2.02
B12UR4	16.9	23.7	1.93
B12UR5	13.6	24.0	2.50

*Birim dönme açısı, burulma kapasitesine ulaşılan anda okunan değerlerdir.



Şekil 3.5: Birinci grup numuneler için burulma momenti – birim dönme açısı ilişkisi (Koutchoukali ve Belarbi, 2001)

Tüm numuneler için burulma momenti – birim dönme açısı ilişkisi Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da iki farklı grup halinde verilmiştir. B12UR4 ve B12UR5 kirişlerindeki donatı göçme moduna yakın bir anda akmışlardır buda bu kirişlerdeki donatı oranlarının dengeli donatı oranına çok yakın bir miktarda olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.6: İkinci grup numuneler için burulma momenti – birim dönme açısı ilişkisi (Koutchoukali ve Belarbi, 2001)

Nasr-Eddine Koutchoukali ve Abdeldjelil Belarbi yaptıkları deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçları çıkarmışlardır. ACI 318-95 yönetmeliği tarafından önerilen minimum burulma donatısı miktarı yüksek dayanımlı betonarme kirişler için yetersiz kalmaktadır. Minimum donatı ve altında donatı miktarına sahip betonarme kirişlerin burulma dayanımı beton basınç dayanımından bağımsızdır. Yüksek dayanımlı kirişlerin göçme modu esas olarak boyuna donatıdaki birim deformasyon miktarı tarafından kontrol edilmektedir. Çatlak genişliğinde boyuna donatı miktarı etriye miktarına göre daha etkin bir davranış sergilemektedir.

3.2. Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerde Basit Burulma Deneyleri

Bu bölümde ilk olarak güçlendirmede yaygın olarak kullanılan lif takviyeli polimerler ve teknik özelliklerinden bahsedilecek ayrıca çeşitli araştırmacılar tarafından son yirmi yıl içerisinde lif takviyeli polimerler kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerde, basit burulma ile ilgili yapılmış olan deneysel çalışmalara kısa kısa değinilecektir.

3.2.1. Güçlendirmede lif takviyeli polimerler (FRP) ve teknik özellikleri

FRP ürünleri ilk olarak 1950 yıllarının ortalarında kullanılmaya başlanmıştır (Rubinsky ve Rubinsky, 1954; Wines ve diğ., 1966). Yüksek dayanımlı, yüksek rijitliğe sahip, düşük yoğunluklu, boron, karbon ve aramid gibi lifli malzemeler göstermiş oldukları üstün özelliklerden dolayı uzay keşiflerinde ve hava yolculuklarında ticari amaçlarla 1960 ve 1970 yıllarında kullanılmıştır. İlk zamanlarda bu üstün performanslı FRP kompozitlerinin maliyetlerinin çok yüksek olması bu ürünlerin savunma sanayinde ve diğer çalışma alanlarında kullanılmasını engellemiştir. 1980'lerin sonları 1990'ların başlarında lif ve FRP üreticileri bu sektörün büyümesi için fiyatlarda indirimde gitmişlerdir. Fiyatların indirilmesi FRP kompozitlerin her sektörde kullanımının yaygınlaşmasını sağlamıştır (Bakis ve diğ., 2002).

1986 yılında dünyada ilk kez Almanya da kompozit güçlendirme elemanları kullanılarak karayolu köprüsü inşa edilmiştir. Bu tarihten itibaren Avrupada ve yakın zamanlarda da Kuzey Amerika ve Japonyada köprüler inşa edilmeye devam edilmiştir (Nanni ve diğ., 1996). Günümüzde FRP ürünleri çubuk, kablo, iki ve üç boyutlu ızgara, tabakalı malzeme, levha formları almıştır (Nichols, 1988). Sayısız FRP ürünü dünya genelinde üretilmiş ve üretilmeye devam etmektedir. Japonya ve Avrupa FRP ürünlerinin üretimi konusunda Amerika'ya göre daha ileridedir. 1993 yılının sonlarında FRP kompozitlerini aktif olarak pazarlayan 9 firma bulunmaktadır (Nanni ve diğ., 1996).

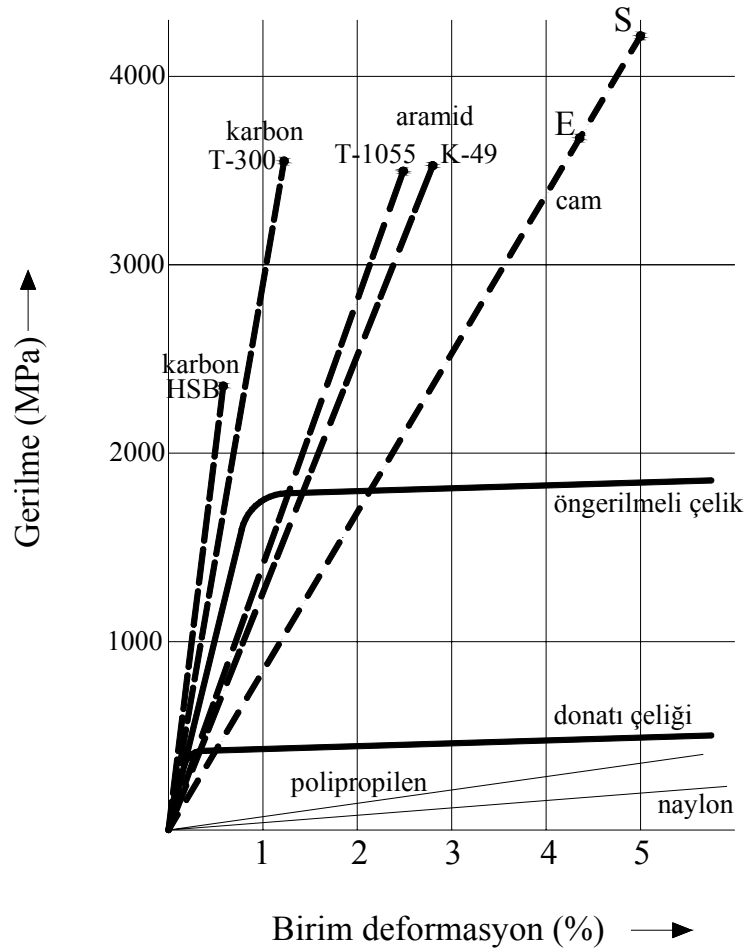
Betonarme yapılarda tasarım hatası, uygulama hatası ve depremler gibi etkenlerle zaman içerisinde çeşitli hasarlar meydana gelmektedir. Hasar gören binaların tamamen yıkılması ekonomik olarak oldukça zordur. Bu nedenle yıkım yerine bu tür binaların onarılması yoluna gidilmektedir. Çeşitli güçlendirme yöntemleri göz önünde bulundurulduğunda malzeme teknolojisinde son yıllarda meydana gelen önemli ilerlemelerle birlikte yeni malzemeler kullanılmaya başlandığı görülmektedir. Bu nedenlerle betonarme yapıların güçlendirilmesi amacıyla üstün fiziksel özelliklere sahip olan FRP kullanımı yapı sektöründe oldukça yaygınlaşmıştır.

Lif Takviyeli Polimerlerin Teknik Özellikleri: FRP kompozitleri lif takviyeli polimer matrisi olarak tanımlanabilir. Polimer matris termo plastik veya termoset plastik olabilir. Termoset plastik polimer matrisleri polyester, vinil ester, epoksi ve fenolik, termo plastik matrisleri ise naylon içerirler. Takviye lifleri kendi yapısal özelliklerine göre matrise kompozit malzeme özelliği sağlar. Bu kompozit birleşimde matrisin rolü lifleri çevresel ve mekanik etkilere karşı korumak ve üzerine gelen yükü lifler arasında dağıtmaktır (De Rose, 1997).

Tablo 3.6'da yapısal güçlendirme alanında kullanılan lif tipleri ve bu liflerin sahip olduğu mekanik özellikler gösterilmiştir. Şekil 3.7'de ise bu lif tiplerine ait gerilme – birim deformasyon eğrileri verilmiştir.

Tablo 3.6: Yapısal Güçlendirmede Kullanılan Liflerin Mekanik Özellikleri (Mallick, 1988)

	Lif Tipi	Elastisite Modülü (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Göçme Deformasyonu (%)
Cam	E-Cam	72.400	3.450	4,8
	S-Cam	86.900	4.300	5,0
Karbon	T-300	231.000	3.650	1,4
	AS	220.000	3.100	1,2
	t-40	276.000	5.650	2,0
	HSB	344.500	2.430	0,58
Aramid	Kevlar 49	131.000	3.620	2,8
	Twaron 1055	127.000	3.600	2,5



Şekil 3.7: Yapısal güçlendirmede kullanılan liflerin gerilme – birim deformasyon eğrileri (Gerritse ve Schurhoff, 1986)

Güçlendirme amaçlı FRP kullanımı diğer geleneksel güçlendirme tekniklerine göre birçok avantaja sahiptir. Örneğin hafif malzeme olan bu ürünlerin uygulaması çok kolaydır ve diğer malzemelere göre daha az işçilik ve daha az ekipmanla uygulanabilirler. Ek olarak bu malzemeler zararlı kimyasalların ve kloridin geçişini engelleyerek üzerine uygulanan yapı malzemesinin durabilitesini artırır. Sonuç olarak cam, karbon ve aramid kompozitler yüksek dayanıma sahiptirler ve büyük bir oranda betonarme kesitlerin dayanımını arttırlar (De Rose, 1997).

3.2.2. Saravanan Panchacharam ve Abdeldjelil Belarbi

Saravanan Panchacharam ve Abdeldjelil Belarbi tarafından 2002 yılında FRP kompozit kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin burulma dayanımını araştırmak amacıyla deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada; lif düzeni (kiriş eksenine paralel ya da düz), kirişin güçlendirilen yüzey sayısı (kirişin 3 ya da 4 yüzü), sargılama şekli (sürekli veya aralıklı), ankaraj etkisi (U ankraj) parametreleri değişken olarak kullanılmıştır. Betonarme kirişlere ait beton basınç dayanımı ve donatı özellikleri Tablo 3.7’de verilmiştir.

Tablo 3.7: Numune Beton ve Donatı Özellikleri (Panchacharam ve Belarbi, 2002)

Numune	Boy donatı çapı (mm)	Etriye		Beton basınç dayanımı (MPa)
		Çap (mm)	Aralık (mm)	
A	4Ø12.70 4Ø9.53	9.53	152.4	34
B	4Ø12.70 4Ø9.53	9.53	152.4	26
C	4Ø12.70 4Ø9.53	9.53	152.4	31

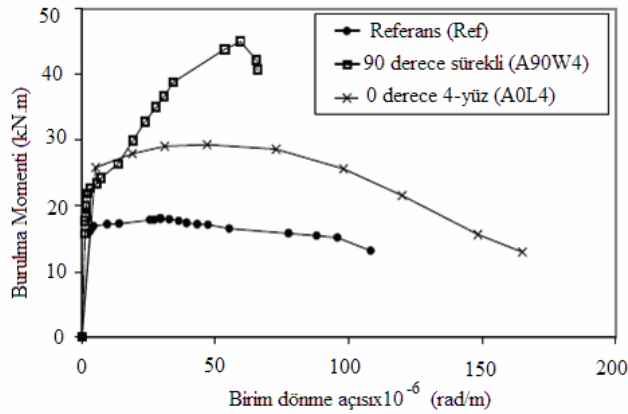
GFRP (cam lifi takviyeli polimer) kullanılarak güçlendirilen 8 adet betonarme kirişin basit burulma momenti altında yapılan deneylerinin sonuçları Tablo 3.8’de verilmiştir. Numune isimlerinde ilk harf numunenin beton basınç dayanımını temsil etmektedir. 90 ve 0 rakamları sargılamanın kiriş eksenine göre yapıldığı doğrultuyu temsil etmektedir, 90 enine yapılan sargılamayı ve 0 boyuna yapılan yapıştırmayı göstermektedir. W, S ve L yapılan sargılamanın sırasıyla sürekli, aralıklı ve boyuna

doğrultuda yapıldığını temsil etmektedir. U ise, kirişte sargılama sırasında 3 yüzün sargılandığını ve sargının uçlarının kiriş içerisine ankre edildiğini temsil etmektedir. En son rakam ise güçlendirmenin kirişin kaç yüzeyinde (3 veya 4) yapıldığını temsil etmektedir.

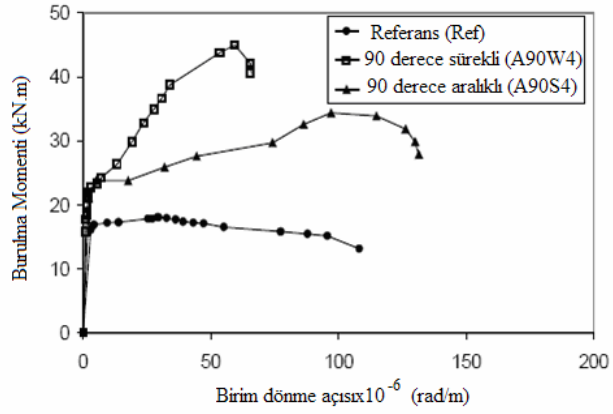
Tablo 3.8: Deney Sonuçları (Panchacharam ve Belarbi, 2002)

Numune	Çatlama Burulma Momenti (kN.m)	Çatlama Burulma Momentinin % artış oranı	Maksimum Burulma kapasitesi (kN.m)	Maksimum Burulma kapasitesinin % artış oranı
A90W4	22	29	45	149
A90S4	21	25	34	90
A0L4	26	53	29	62
A0L3	25	47	26	43
B0L4/90S4	22	29	35	96
B90U3-Ank	21	24	25	39
C90U3	20	20	24	35
Ref	17	----	18	----

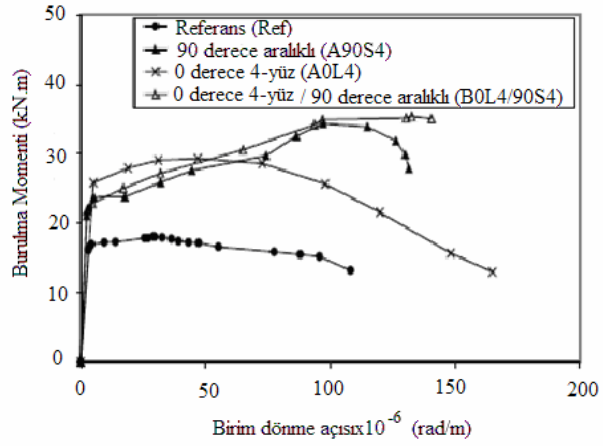
Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da sırasıyla lif düzeninin etkisi, sürekli ve aralıklı sargılamanın etkisi ile her iki yönde beraber yapılan sargılamanın etkisini gözlemlemek amacıyla deney sonuçları referans numune sonucuyla beraber karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 3.8: Lif düzeni etkisine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafiği (Panchacharam ve Belarbi, 2002)



Şekil 3.9: Sürekli ve aralıklı sargılamamanın etkisine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafiği (Panchacharam ve Belarbi, 2002)



Şekil 3.10: Her iki yönde beraber yapılan sargılamamanın etkisine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafiği (Panchacharam ve Belarbi, 2002)

Saravanan Panchacharam ve Abdeldjelil Belarbi yapmış oldukları deneysel çalışma sonucunda elde ettikleri verileri kullanarak sargılanmış numuneye ait çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesini önceden belirlemek amacıyla analitik bir model önermişlerdir. Çatlama momentinin hesabı için önerdikleri model içerisinde Denklem 3.1’de verilmiş olan efektif öngerilme’yi tanımlamışlardır.

$$efektif _ öngerilme = \frac{\varepsilon_f \cdot E_f}{2} \quad (3.1)$$

Burada ε_f kullanılan FRP şeridinin çekme birim deformasyonu, E_f kullanılan FRP şeridinin elastisite modülüdür. Efektif öngerilme kullanılarak Denklem 3.2’de verilen sargılanmış numuneye ait çatlama momenti değeri belirlenebilir.

$$T_{cr} = c_1 \cdot b^2 \cdot h \cdot f_{ctf} \cdot \sqrt{1 + \frac{\text{efektif _ öngerilme}}{f_{ctf}}} \quad (3.2)$$

Burada; c_1 St. Venant sabiti, b kirişe ait genişlik, h kirişe ait yükseklik ve f_{ctf} betonun eğilmede çekme dayanımını vermektedir.

Burulma momentinin hesabı için önerilen analitik model iki bileşenden oluşturulmuştur. Modelin birinci parçası betonarme kirişe ait burulma momenti kapasitesini (Denklem 3.3) ikinci parçası ise sargılanmış olan FRP’nin burulma momentine olan katkısını (Denklem 3.4) temsil etmektedir.

$$T_{u,RC} = \frac{2 A_e A_{ot} f_{yw}}{s} \cot(\theta) \quad (3.3)$$

$$T_{u,FRP} = 2 \cdot \varepsilon_{ke,f} \cdot E_{fu} \frac{t_f \cdot b_f}{s_f} \cdot b \cdot h \cdot \cot(\theta) \quad (3.4)$$

Burada $\varepsilon_{ke,f}$ efektif FRP birim şekil değiştirme miktarının karakteristik değeri, E_{fu} FRP’ye ait elastisite modülü, t_f FRP kalınlığı, b_f FRP genişliği, s_f FRP aralığı olarak alınmıştır. Sargılanmış betonarme kirişe ait toplam burulma momenti kapasitesi Denklem 3.5’te verilmiştir.

$$T_u = T_{u,RC} + T_{u,FRP} \quad (3.5)$$

Tablo 3.9’da deneysel olarak elde edilen verilerle analitik modelden elde edilen çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesi sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 3.9: Deneysel Sonuçları ve Analitik Modelden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırması (Panchacharam ve Belarbi, 2002)

Numune	Çatlama Momenti (kN.m)			Burulma Momenti Kapasitesi (kN.m)		
	Deneysel	Analitik	Den./Ana.	Deneysel	Analitik	Den./Ana.
Ref	17,1	15,7	1,09	18,2	16,9	1,07
A90W4	22,9	20,8	1,10	47,1	45,4	1,04
A90S4	22,1	17,7	1,25	36,0	36,4	0,99
A0L4	27,0	29,9	0,90	30,7	29,9	1,03
A0L3	26,3	28,8	0,91	27,8	28,8	0,97
B0L4/90S4	20,1	24,4	0,82	32,6	35,9	0,91
B90U3-Ank	22,0	18,2	1,20	26,3	28,1	0,94
C90U3	20,6	19,1	1,08	24,6	26,4	0,93

Saravanan Panchacharam ve Abdeldjelil Belarbi yaptıkları deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçları çıkarmışlardır. Burulmaya maruz betonarme kirişler GFRP ile güçlendirildikleri zaman çatlama momenti, maksimum burulma kapasitesi ve maksimum birim dönme deformasyonunda önemli bir artış gözlenir. Kiriş eksenine göre 90 derece açıyla yapılmış olan sürekli sargılamanın (A90W4) etkili bir güçlendirme olduğu gözlenmiştir. Bu güçlendirme ile maksimum burulma kapasitesinde %150 oranında bir artış elde edilmiştir. Kiriş boyuna doğrultuda güçlendirilirse çatlama momentinde önemli bir artış gözlenmektedir. FRP tabakalarının kirişin 3 veya 4 yüzüne sargılanması hemen hemen aynı sonuçları vermektedir. FRP plakaları hem düşey hem de boyuna doğrultuda kombine bir şekilde uygulanırsa kirişin çatlama momenti, maksimum burulma kapasitesi ve sünekliğinde artış gözlenmiştir. Önerilen analitik modelden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla yaklaşık aynı sonuçları vermektedir.

3.2.3. Constantin E. Chalioris

Constantin E. Chalioris tarafından 2006 yılında karbon lif takviyeli polimer kullanımı ile dikdörtgen kesitli ve tablalı kirişlerin güçlendirilmesi ve bunların basit burulma davranışlarını gözlemlemek amacıyla deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu deneylerde etriyeli ve sargısız betonarme kirişlerle etriyesiz ve sargılı betonarme kirişler kullanılmıştır. Çalışmada 14 adet dikdörtgen ve tablalı kiriş kullanılmıştır. 14 adet numunenin 11 tanesi dikdörtgen kesitli kiriş 3 tanesi ise tablalı kiriş olarak hazırlanmıştır. Numunelerde kullanılan donatı ve sargılama şekilleri Tablo 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.10: Numune Donatı ve Sargılama Şekilleri (Chalioris, 2006)

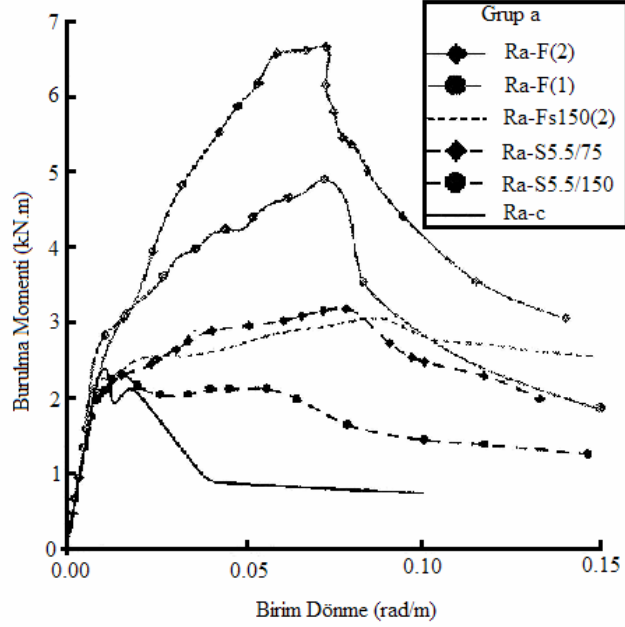
Numune	Boyuna Donatı Çapı (mm)	Etriye Çapı (mm)	Karbon FRP Kullanılarak Yapılan Güçlendirme Şekli
Ra-c	4Ø8	-	-
Ra-F(1)	4Ø8	-	Sürekli Sargı
Ra-F(2)	4Ø8	-	Sürekli Sargı
Ra-Fs150(2)	4Ø8	-	Aralıklı Sargı
Ra-S5.5/150	4Ø8	Ø5.5/150	-
Ra-S5.5/75	4Ø8	Ø5.5/75	-
Rb-c	4Ø8	-	-
Rb-F(1)	4Ø8	-	Sürekli Sargı
Rb-Fs200(1)	4Ø8	-	Aralıklı Sargı
Rb-Fs300(1)	4Ø8	-	Aralıklı Sargı
Rb-S5.5/160	4Ø8	Ø5.5/160	-
T-c	6Ø8	-	-
T-FU(1)	6Ø8	-	U-Ceketleme
T-FU(2)	6Ø8	-	U-Ceketleme

Deneysel sonuçlarda çatlama anında ölçülen burulma momenti (T_{cr}), çatlama anında ölçülen birim dönme açısı (ϕ_{cr}), maksimum burulma kapasitesi (T_u) ve maksimum birim dönme açısı (ϕ_u) değerleri Tablo 3.11’de verilmiştir. 6 adet kiriş ilk çatlama momentinden sonra bu moment değerini aşamamıştır.

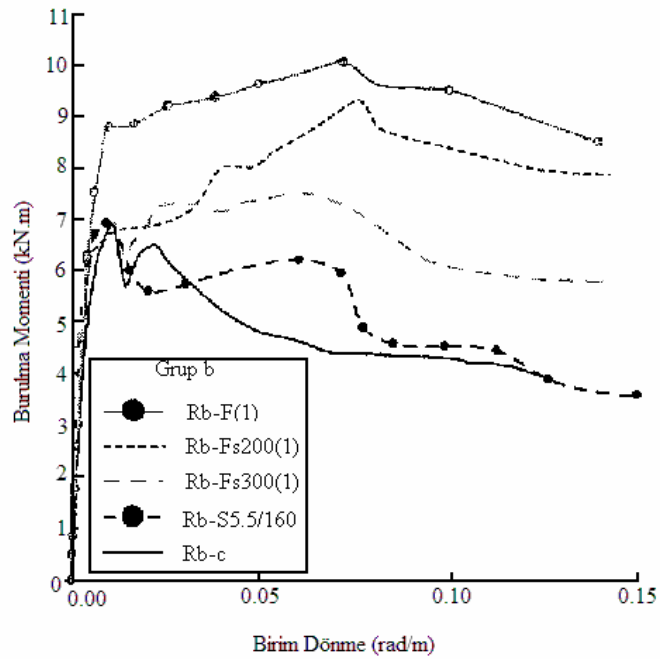
Tablo 3.11: Deneysel Sonuçları (Chalioris, 2006)

Numune	T_{cr} (kN.m)	ϕ_{cr} (rad/m)	T_u (kN.m)	ϕ_u (rad/m)
Ra-c	2.389	0.011	-	-
Ra-F(1)	2.800	0.013	4.868	0.072
Ra-F(2)	2.830	0.011	6.650	0.072
Ra-Fs150(2)	2.219	0.009	3.018	0.088
Ra-S5.5/150	2.300	0.015	-	-
Ra-S5.5/75	2.250	0.013	3.156	0.078
Rb-c	6.951	0.010	-	-
Rb-F(1)	8.794	0.009	10.050	0.071
Rb-Fs200(1)	6.278	0.010	9.315	0.075
Rb-Fs300(1)	6.960	0.010	7.520	0.058
Rb-S5.5/160	6.924	0.009	-	-
T-c	8.481	0.003	-	-
T-FU(1)	8.994	0.004	-	-
T-FU(2)	8.775	0.004	9.450	0.022

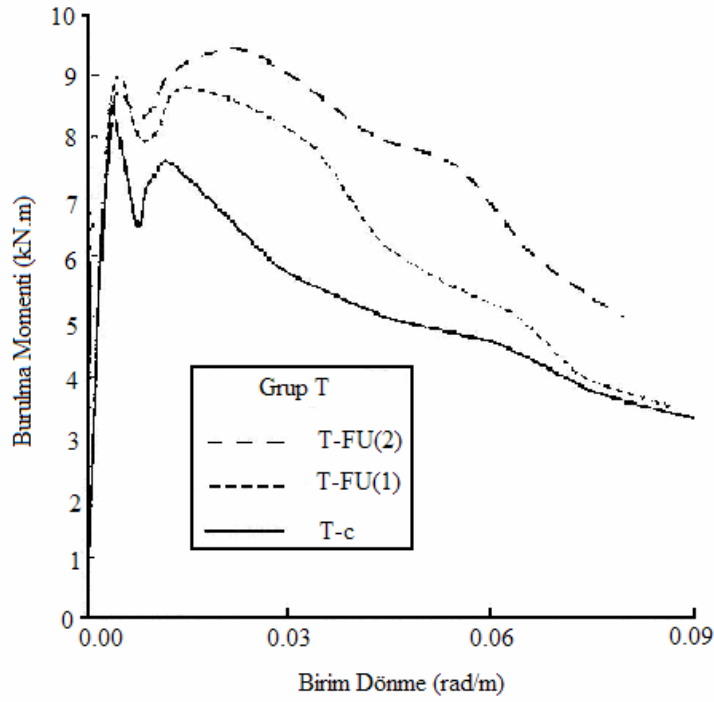
Şekil 3.11, 3.12 ve 3.13’de sırasıyla dikdörtgen kesitli “a” grubu kirişlerin, dikdörtgen kesitli “b” grubu kirişlerin ve tablalı kirişlerin burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.11: Dikdörtgen kesitli “a” grubu kirişlere ait burulma momenti – birim dönme açısı grafiği (Chalioris, 2006)



Şekil 3.12: Dikdörtgen kesitli “b” grubu kirişlere ait burulma momenti – birim dönme açısı grafiği (Chalioris, 2006)



Şekil 3.13: Tablalı kirişlere ait burulma momenti – birim dönme açısı grafiği (Chalioris, 2006)

Constantin E. Chalioris yaptığı deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçları çıkarmıştır. Epoksi ile yapıştırılarak uygulanan karbon FRP' ler burulma momenti etkisi altındaki yetersiz miktarda donatı bulunduran mevcut betonarme kirişleri güçlendirmek için uygun bir yöntemdir. Karbon lif takviyeli polimerlerle etriye görevi yapacak şekilde dışarıdan yapıştırılarak güçlendirilen kirişler bütün güçlendirilmemiş kontrol kirişlerine göre daha iyi burulma dayanımı göstermişlerdir. Sürekli sargılama uygulaması betonarme kirişin burulma kapasitesinde önemli bir artışa neden olmuştur. Sürekli sargılama aralıklı sargılamaya oranla daha etkili sonuçlar vermektedir. Aralıklı sargılamanın uygulandığı kirişlerde göçme sargısız kontrol kirişine göre daha geç oluşmuştur. Bu kirişlerde çatlaklar sargılanmamış kiriş yüzeylerinde oluşmuştur ve lif kopmaları gözlenmemiştir. U ceketleme yöntemi kullanılarak güçlendirilen tablalı kirişlerde, beton ile karbon lifleri arasındaki yüzeyde beklenenden daha erken ayrılmalar meydana gelmiştir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde basit burulma deneylerinde kullanılacak olan betonarme kirişlerin hazırlanmasında kullanılan malzemelerin özellikleri, güçlendirme amaçlı kullanılan lif takviyeli polimerlerin mekanik özellikleri verilecektir. Deneysel çalışmanın daha detaylı bir şekilde anlaşılması için numuneler ve deney düzeneğinin açıklanması amaçlanmıştır.

4.1. Malzeme Özellikleri

Betonarme kirişlerin burulma davranışını yorumlamak için betonarme kirişi oluşturan beton ve donatı çeliğinin malzeme özelliklerini çok iyi belirlemek gerekmektedir. Betonun mekanik özelliklerini içerisine konulan malzeme çeşitleri ve miktarları belirlemektedir. Bu nedenle betonarme kirişin içerisinde kullanılan tüm malzemelerin özelliklerinin detaylı olarak bilinmesi gerekmektedir. Aynı şekilde güçlendirme malzemesi olarak kullanılan lif takviyeli polimerlerin çeşitleri ve mekanik özellikleri de bilinmelidir. Tüm bu bilgilerin ışığında kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

4.1.1. Agregalar

Deney numuneleri hazırlanırken boyutlar ve donatı sıklaştırma bölgeleri göz önünde bulundurularak, hazırlanan betonun kalıba rahatça yerleşmesi ve kalıp içerisinde boşluklar oluşmaması için agrega boyutları üzerinde önemle durulmuştur. Beton hazırlanırken iri agrega olarak kırmataş No I ve ince agrega olarak doğal kum kullanılmıştır. Beton karışım oranlarının hazırlanması amacıyla kırmataş No I ve doğal kumun incelik modüllerinin bulunması için bu malzemeler üzerinde elek

analizi ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla da kapilarite ile özgül ağırlık deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen fiziksel özellikler Tablo 4.1’de, elek analizi sonuçları ise Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1: Kullanılan Agregaların Fiziksel Özellikleri

Fiziksel Özellikler		
	Doğal Kum	Kırmataş No I
Su Emme Oranı (%)	1.40	0.45
Özgül Ağırlık (gr/cm³)	2.65	2.70

Tablo 4.2: Kullanılan Agregaların İncelik Modülleri

Elek Analizi Sonuçları		
Elek Boyutu (mm)	Elek Altına Geçen Malzeme (%)	
	Doğal Kum	Kırmataş No I
31,5	100	100
16	100	100
8	100	62
4	95	8
2	87	4
1	72	3
0,5	43	1
0,25	12	1
İncelik Modülü	1.91	5.21

4.1.2. Çimento

Hazırlanan beton karışımlarında bağlayıcı çimento malzemesi olarak Nuh Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından üretilen PÇ 42,5 (CEM I 42,5 R) portland çimentosu kullanılmıştır. PÇ 42,5 çimentosuna ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler sırasıyla Tablo 4.3, Tablo 4.4 ve Tablo 4.5’te verilmiştir.

Tablo 4.3: Kullanılan Çimentonun Fiziksel Özellikleri

Fiziksel Özellikler	
İncelenen Özellikler	Elde Edilen Değerler
Priz Başlangıcı (saat : dakika)	03:01
Priz Sonu (saat : dakika)	04:21
Hacim Sabitliği (mm)	2
Özgül Yüzey (cm²/ gr)	3504
Özgül Ağırlık (gr / cm³)	3.17

Tablo 4.4: Kullanılan Çimentonun Kimyasal Özellikleri

Kimyasal Özellikler	
İncelenen Maddeler	Elde Edilen Değerler (%)
SiO₂	20.34
Al₂O₃	4.24
Fe₂O₃	3.89
CaO	63.97
MgO	1.17
SO₃	2.57
Çözünmeyen Kalıntı	0.71
Kızdırma Kaybı	1.95
Serbest Kireç	0.96
Toplam Alkali (Na₂O+0.658 K₂O)	-
Klorür	0.0089

Tablo 4.5: Kullanılan Çimentonun Mekanik Özellikleri

Mekanik Özellikler	
Basınç Dayanımları (MPa)	(50x50x50mm küp numuneler için)
2 Günlük	26.9
7 Günlük	47.0
28 Günlük	59.9

4.1.3. Hiperakışkanlaştırıcı

Bu çalışmada hazırlanan yüksek dayanımlı betonlarda çökme değerlerinin düşük olması ve kalıba yerleşmesinde yaşanan sıkıntılar nedeniyle yüksek dayanımlı betonlar hazırlanırken içerisine Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından üretilen Sikament 300 hiperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Kullanılan hiperakışkanlaştırıcı ait fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6: Kullanılan hiperakışkanlaştırıcının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Ticari İsmi	Sikament 300
Tanım	Yüksek performanslı hiper akışkanlaştırıcı ve sertleşme hızlandırıcı beton katkısı
Tip	Özel tip melamin sülfonat polimeri
Görünüş	Kahverengi, akışkan sıvı
Özgül Ağırlık (20 °C)	1.23 ± 0.02 kg/lit
Klorür Miktarı	Yok
Kullanım Oranı	Erken dayanımlı betonlar için çimento ağırlığının % 1.2-3.0’si, akıcı betonlar için %0.8-1.2’si, plastik betonlar için %0.8-1.2’si, yoğun betonlar için min.% 0.5’i oranında
Uygunluk	TS EN 934-2 Standartlarına uygundur

4.1.4. Donatı çeliği

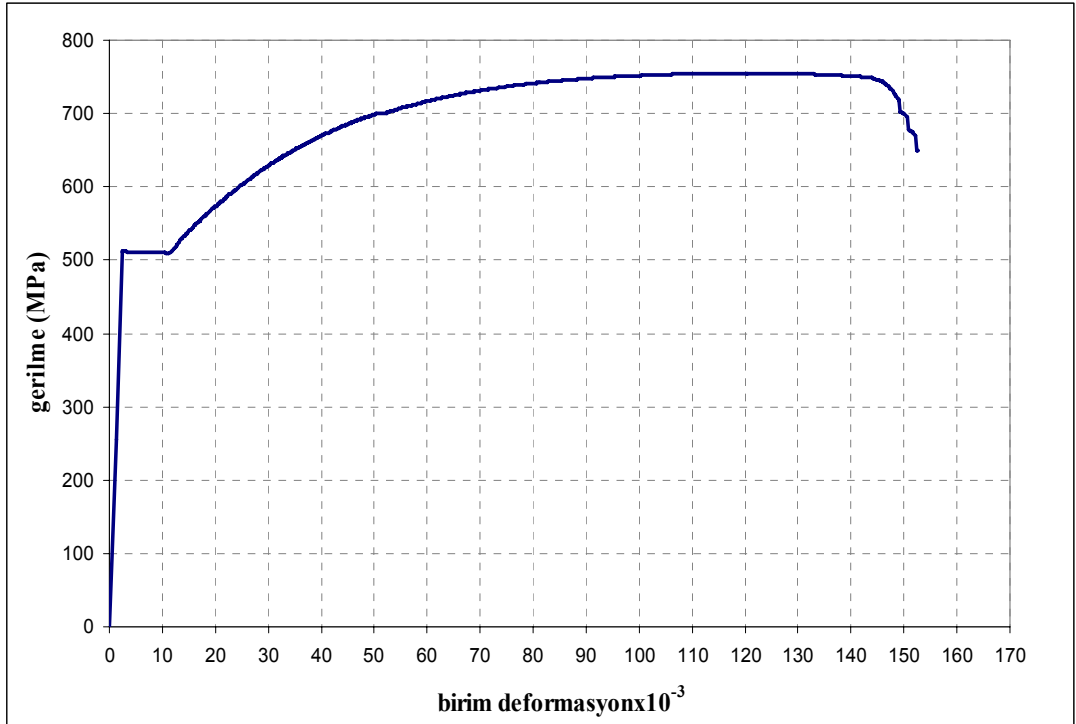
Bu çalışma kapsamında her bir numune için aynı tip ve aynı çap donatı çeliği kullanılmıştır. Boyuna donatı ve etriye olarak $d=8$ mm çapında BÇ-IIIa kalitesinde nervürlü donatı çelikleri kullanılmıştır. Şekil 4.1’de kullanılan donatı çeliği gösterilmiştir. Kullanılan donatı çeliğinden çeşitli numuneler alınarak Şekil 4.2’de gösterilen çelik çekme makinesi kullanılarak elde edilen donatıya ait gerilme – birim deformasyon eğrileri Şekil 4.3’te verilmiştir. Çelik numuneler üzerinde yapılan çekme deneyleri sonucunda donatıya ait; akma dayanımı 510 MPa, çekme dayanımı 756 MPa, kopma mukavemeti 642 MPa olarak bulunmuştur.



Şekil 4.1: Deneysel olarak kullanılan donatı ($d = 8 \text{ mm}$)



Şekil 4.2: Çelik çekme makinesi



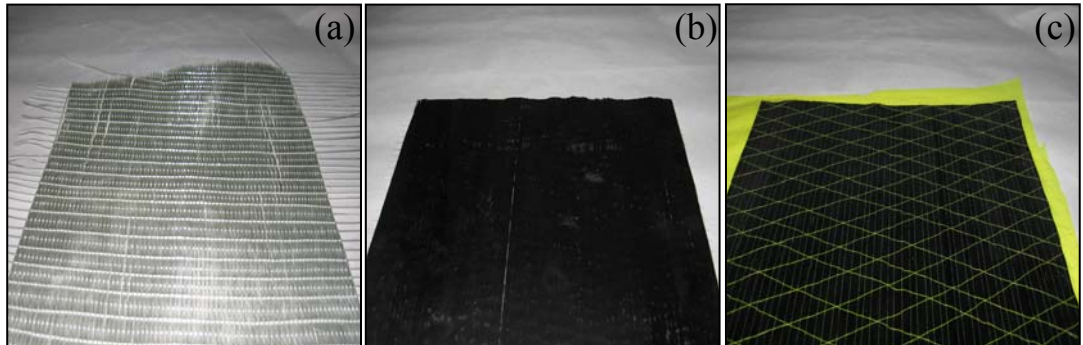
Şekil 4.3: Donatı çeliğine ait gerilme - birim deformasyon eğrisi

4.1.5. Lif takviyeli polimerler

Bu çalışmada betonarme kirişlerin burulma dayanımlarını arttırmak amacıyla lif takviyeli polimerler epoksi esaslı yapıştırıcı ile kiriş yüzeylerine yapıştırılarak uygulanmıştır. Cam (GFRP) , normal elastisite modüllü karbon (CFRP-N) ve yüksek elastisite modüllü karbon (CFRP-H) lifi takviyeli 3 tip FRP kullanılmıştır. Kullanılan FRP kompozitlerinin özellikleri sırasıyla Tablo 4.7, 4.8 ve 4.9’da verilmiştir. Kullanılan tüm FRP’lerin şekilleri Şekil 4.4’te gösterilmiştir.

Tablo 4.7: Kullanılan Cam Lifi Takviyeli Polimerlerin Teknik Özellikleri

Özellikler	Değerler
Adlandırılmada Kullanılan Teknik Bilgi (Liflerin ana doğrultusunda)	E-Glass
Elastisite Modülü (GPa)	73
Çekme Mukavemeti (MPa)	3400
Statik Tasarım İçin Emdirilmiş Çekme Mukavemeti (MPa)	2400
Polimer Tabakadaki Cam Liflerin Ağırlığı (Ana doğrultuda – gr/m ²)	400
Polimer Tabakanın Toplam Ağırlığı (gr/m ²)	440
Yoğunluk (gr/m ³)	2,6
ϵ_u (%)	4,5
Statik Tasarım İçin Kalınlık (Ağırlık / Yoğunluk – mm)	0,154
Statik Tasarım İçin Teorik Kesit Alanı (1000mm genişlik için – mm)	154
Statik Tasarım İçin Güvenlik Katsayısı (Elle uygulama için üretici firma S&P tarafından önerilen)	1,4
İzin Verilebilen En Büyük Çekme Kuvveti ($F_{ult.}$) (1000mm genişlik için – kN)	$\frac{154 \times 2400}{1,4} = 264$
Liflerin esas doğrultusuna dik doğrultuda, ana doğrultuda bulunan lif miktarının 10 %’u kullanılmıştır.	



Şekil 4.4: Kullanılan FRP’ler (a) GFRP, (b) CFRP-N ve (c) CFRP-H

Tablo 4.8: Kullanılan Normal Elastisite Modüllü Karbon Lifi Takviyeli Polimerlerin Teknik Özellikleri

Özellikler	Değerler
Adlandırılmada Kullanılan Teknik Bilgi (Liflerin ana doğrultusunda)	200 gr/m ²
Elastisite Modülü (GPa)	240
Çekme Mukavemeti (MPa)	3800
Polimer Tabakadaki Karbon Liflerin Ağırlığı (Ana doğrultuda – gr/m ²)	200
Polimer Tabakanın Toplam Ağırlığı (gr/m ²)	230
Yoğunluk (gr/m ³)	1,7
ϵ_u (%)	1,55
Statik Tasarım İçin Kalınlık (Ağırlık / Yoğunluk – mm)	0,117
Statik Tasarım İçin Teorik Kesit Alanı (1000mm genişlik için – mm)	117
Statik Tasarım İçin Güvenlik Katsayısı (Elle uygulama için üretici firma S&P tarafından önerilen)	1,2
İzin Verilebilen En Büyük Çekme Kuvveti ($F_{ult.}$) (1000mm genişlik için – kN)	$\frac{117 \times 3800}{1,2} = 370,5$
0,6 % Birim Deformasyon İçin Çekme Kuvveti (1000mm genişlik için – kN)	<u>140</u>

Tablo 4.9: Kullanılan Yüksek Elastisite Modüllü Karbon Lifi Takviyeli Polimerlerin Teknik Özellikleri (SikaWrap-300C Himod NW)

Özellikler	Değerler
Adlandırılmada Kullanılan Teknik Bilgi (Liflerin ana doğrultusunda)	Yüksek rijitlikte CFRP
Elastisite Modülü (GPa)	640
Çekme Mukavemeti (MPa)	2600
Yoğunluk (gr/m ³)	2,12
ϵ_u (%)	0,40
Statik Tasarım İçin Kalınlık (Ağırlık / Yoğunluk – mm)	0,14
Statik Tasarım İçin Teorik Kesit Alanı (1000mm genişlik için – mm)	300±%5
Genişlik (mm)	300

Betonarme kiriş yüzeylerine cam ve normal elastisite modüllü karbon lifi takviyeli polimerler Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından üretilen Sikadur-330 epoksi bazlı likit yapıştırıcısı kullanılarak, yüksek elastisite modüllü karbon lifi takviyeli polimerler ise Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından üretilen Sikadur-300 epoksi

bazlı likit yapıştırıcısı kullanılarak yapıştırılmıştır. Sikadur-330 epoksi bazlı likit yapıştırıcısının teknik özellikleri Tablo 4.10'da, Sikadur-300 epoksi bazlı likit yapıştırıcısının teknik özellikleri ise Tablo 4.11'de verilmiştir.

Tablo 4.10: Sikadur-330 Epoksi Bazlı Likit Yapıştırıcısının Teknik Özellikleri

Cinsi	İki bileşenli, solventsiz epoksi bağlayıcı likit yapıştırıcı
Kullanım Yerleri	Kompozit güçlendirme sistemlerinde kullanılan, karbon fiber ve cam fiber örtülerin yapıştırılması için tasarlanmıştır.
Renk	Açık Gri
Karışım Oranı	Ağırlıkça 4 kısım ana malzeme (A) Ağırlıkça 1 kısım sertleştirici (B)
Uygulama ısısı	15 - 40°C
Akışkanlık	23°C'de 6000 mPas
Kullanılabilirlik Isısı	-40°C'den +50°C'ye kadar
Depolama	+5 ile +25°C sıcaklıktaki rutubetsiz kapalı hacimlerde orijinal açılmamış ambalajlarda yaklaşık 24 ay
Özellikler	Kolay karıştırılır, mala ve doyurma rulosu ile uygulaması kolaydır. Elle empregnasyon (doyurma) işlemi içindir. Düşey ve baş üstü yüzeylerde uygulanır. Birçok yüzeye iyi aderans sağlar. Yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Altına ayrı bir astar uygulaması gerekmez. Solventsizdir.
Özgül Ağırlık	1,31 g/cm ³ (A ve B bileşenleri karıştırıldıktan sonra)
Fiziksel Özellikler	Çekme Mukavemeti 30 N/mm ² Çekme Modülü 4500 N/mm ² Eğilme Modülü 3800 N/mm ² Kopma Uzaması %0,9 (23°C'de)
Kap Ömrü	10°C'de 24 saat 23°C'de 12 saat 35°C'de 6 saat
Kürlenme Süresi	23°C'de 5 gün Bu süre zarfında yapıştırıcı kitle veya tabakasının hiçbir kimyasal ve mekanik etkiye maruz kalmaması temin edilmelidir.

Tablo 4.11: Sikadur-300 Epoksi Bazlı Likit Yapıştırıcısının Teknik Özellikleri

Cinsi	İki bileşenli, solventsiz epoksi bağlayıcı likit yapıştırıcı
Kullanım Yerleri	Kompozit güçlendirme sistemlerinde kullanılan, karbon fiber ve cam fiber örtülerin yapıştırılması için tasarlanmıştır.
Renk	Şeffaf
Karışım Oranı	Ağırlıkça 100 kısım ana malzeme (A) Ağırlıkça 34,5 kısım sertleştirici (B)
Uygulama ısısı	15-40°C
Akışkanlık	23°C'de 750 mPas
Kullanılabilirlik Isısı	-40°C'den +60°C'ye kadar
Depolama	+5 ile +35°C sıcaklıktaki rutubetsiz kapalı hacimlerde orijinal açılmamış ambalajlarda yaklaşık 24 ay
Özellikler	Solventsizdir Uygun hazırlanmış yüzeylere ve kompozit örtülere yapışması mükemmeldir Tüm lifleri ıslatarak kompozit örtüyü doyurur Yük transferi kompozit örtü bünyesindeki her bir life aktarır Kürlenmiş yüzeyler, su, tuzlu su, seyreltik asitlere, yağ ve bir çok kimyasala dayanıklıdır Sabit ve değişken sıcaklıklara dirençlidir, sarkma yapmaz
Özgül Ağırlık	1,16 g/cm ³ (A ve B bileşenleri karıştırıldıktan sonra)
Fiziksel Özellikler	Çekme Mukavemeti 45 N/mm ² Çekme Modülü 3500 N/mm ² Eğilme Modülü 3000 N/mm ² Kopma Uzaması %1,5 (23°C'de)
Kap Ömrü	15°C'de 6 saat 23°C'de 4 saat 40°C'de 90 dakika
Kürlenme Süresi	23°C'de 7 gün Bu süre zarfında yapıştırıcı kitle veya tabakasının hiçbir kimyasal ve mekanik etkiye maruz kalmaması temin edilmelidir.

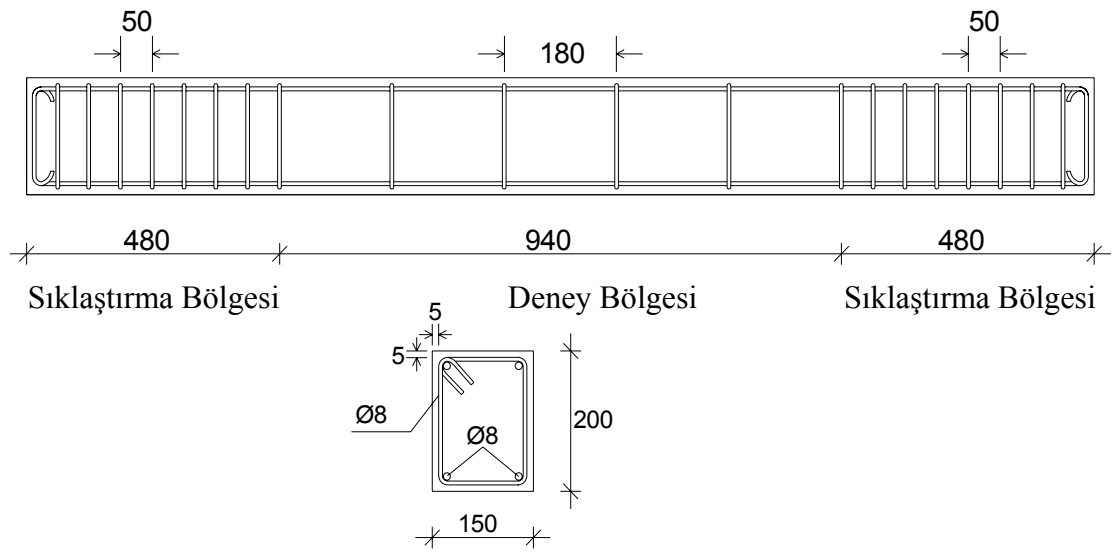
4.2. Numune Özellikleri

Bu bölümde burulma deneyinde kullanılmak için hazırlanan betonarme kirişlerin boyutları, donatı özellikleri, kalıplarının hazırlanması, beton karışım miktarları, deney değişkenleri ve uygulaması hakkında bilgi vermek amaçlanmıştır.

4.2.1. Numune boyutları

Bu çalışmada kullanılan numune boyutları tüm numuneler için sabit tutulmuştur. Betonarme kiriş uzunluğu 1900 mm, kesit boyutları 150x200 mm olarak

belirlenmiştir. Betonarme kiriş içerisinde etriye ve boy donatı için 8 mm çapında tek tip donatı kullanılmıştır. Kirişte oluşacak çatlakların deney bölgesinde gözlemlenebilmesi için kirişin sağ ve sol taraflarında 480 mm lik bölgelerde etriye sıklaştırması uygulanmıştır ve buralarda 50 mm ara ile etriye yerleştirilmiştir. Kirişin açıklık bölgesinde yani deney bölgesinde ise 180 mm ara ile etriye yerleştirilmiştir. Kirişin sadece köşelerinde olmak üzere 4 adet boy donatı yerleştirilmiştir. Numunenin pas payı her bölgesinde 50 mm olacak şekilde özenle ayarlanmıştır. Numunelere ait boyut ve donatı özellikleri Şekil 4.5'te özetlenmiştir.



Şekil 4.5: Numunelere ait boyut ve donatı özellikleri (ölçüler mm cinsinden verilmiştir)

4.2.2. Beton dökümü

Bu çalışmada 12 adet normal dayanımlı ve 14 adet yüksek dayanımlı beton kullanılarak toplam 26 adet numune hazırlanmıştır. Beton basınç dayanımı 40 MPa'ın altında olan betonlar normal dayanımlı beton olarak adlandırılmaktadır ve bu çalışmada normal dayanımlı beton hazırlamak için hedef basınç dayanımı 20 MPa olarak alınmış ve beton karışım hesapları hedef dayanıma göre yapılmıştır. Beton basınç dayanımı 40 MPa ve üstünde olan betonlar yüksek dayanımlı beton olarak adlandırılmaktadır ve bu çalışmada yüksek dayanımlı beton hazırlamak için hedef basınç dayanımı 60 MPa olarak alınmış ve beton karışım hesapları hedef dayanıma göre yapılmıştır. Bu çalışmada normal dayanımlı betonlar "A" harfi ile temsil edilmekte, yüksek dayanımlı betonlar ise "B" harfi ile temsil edilmektedir. Beton

dökümleri laboratuvar ortamında tüm numuneler için aynı şartlarda yapılmıştır. Beton dökümleri yapılırken 1 m³ beton için kullanılan malzeme miktarları Tablo 4.12’de verilmiştir. Normal dayanımlı betonlarda su çimento oranı yüksek olduğu için beton dökümü sırasında herhangi bir yerleştirme problemi yaşanmamıştır. Ancak yüksek dayanımlı betonlarda su çimento oranının düşük olması nedeniyle beton dökümü sırasında betonun daha akışkan hale gelmesi ve yerleştirme kolaylığı sağlaması amacıyla beton karışımı hazırlanırken içerisine çimento ağırlığının %1,6’sı oranında hiperakışkanlaştırıcı katılmıştır. Kiriş kalıpları 10mm çelikten belirlenen boyutlara göre imal edilmiş olup Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Kalıp içerisine betonun boşluksuz olarak yerleşmesi için 10 mm çapında donatı kullanılarak özellikle köşe bölgeler dikkatli bir şekilde şişlenmiştir.

Tablo 4.12: Deneylerde Kullanılan Beton Karışımları (1 m³ için)

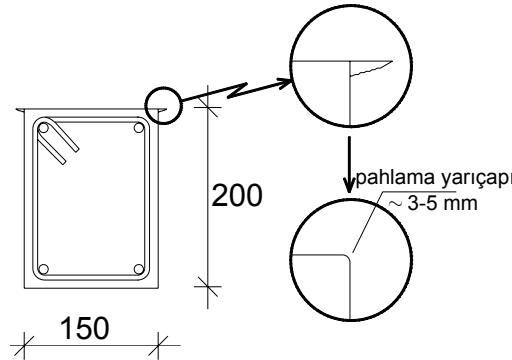
Beton Bileşenleri	Hedef Dayanım	
	20 MPa	60 MPa
Su / Çimento	0.80	0.37
Su (kg/m ³)	250	205.2
Çimento (kg/m ³)	313	550
Kırmataş No I (kg/m ³)	1020	987
Kum (kg/m ³)	718	644
Hiperakışkanlaştırıcı (kg/m ³) *	-	8.8
Çökme (Slump) (cm)	23	20

* Hiperakışkanlaştırıcı çimento ağırlığının % 1.6’ sı kadar kullanılmıştır.



Şekil 4.6: Beton dökümü için hazırlanan kiriş kalıpları

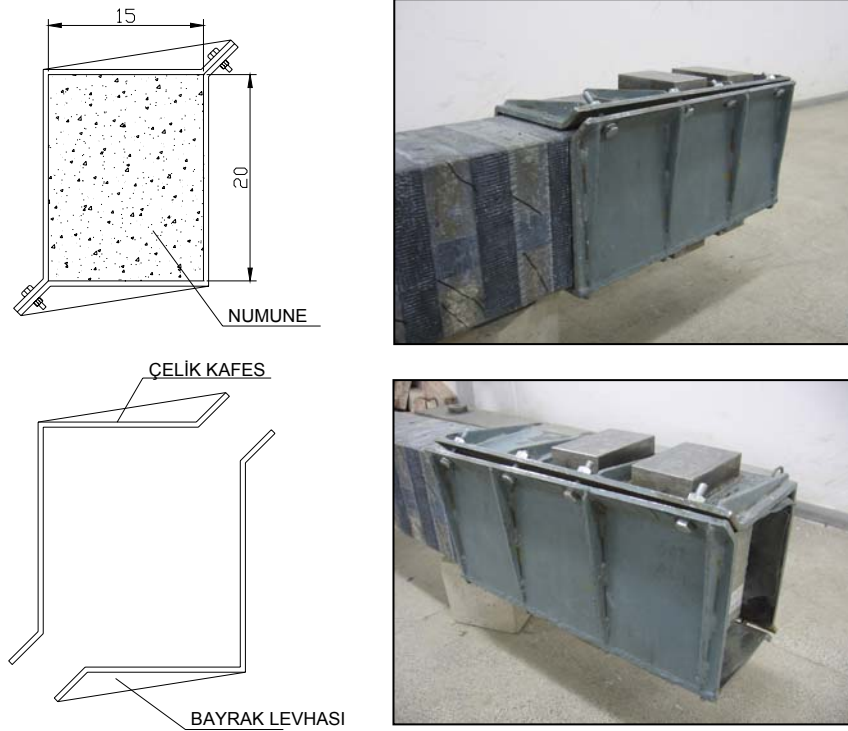
Deney numuneleri beton dökümü yapıldıktan sonra 4 gün süre ile kalıpta tutulmuşlardır. Bu süre zarfında numuneler üzerlerine nemli bezler örtülmesi suretiyle kürlenmiştir. Kalıptan alınan numuneler deneylerin yapılacağı güne kadar oda sıcaklığında ve normal şartlar altında tutulmuşlardır. Kirişlerin beton dökümleri yapıp kalıpları çıkarıldıktan sonra numunelerin köşelerinde girinti ve çıkıntıların olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.7). Lif takviyeli polimerler lifleri doğrultusunda oluşacak çekme kuvvetlerine karşı oldukça dirençli olmalarına karşın liflerine dik doğrultuda oluşacak kesme kuvvetlerine karşı dirençli değildirler. Bu nedenle numuneleri lif takviyeli polimerlerle sararken köşe noktaları, sargıların kopmasına neden olmaması için taş motoru kullanılarak pahlanmıştır. Şekil 4.7’de görüldüğü gibi pahlama yapılarak köşelerin yuvarlatılması sırasında kesit alanının küçülmemesi için tüm numunelerde pahlama yarıçapı numune boyunca sabit 3-5 mm arasında tutulmuştur.



Şekil 4.7: Numunelerin pahlanması

Basit burulma deneylerinde numune üzerinde sıklaştırma bölgelerinden burulma momenti uygulanmakta ve deney sırasında oluşacak tüm çatlakların numune orta bölgesi olan ve deney bölgesi olarak adlandırılan kısımda olması istenmektedir. Tüm çatlakların gözlemlenebilir olması sıklaştırma bölgesinde herhangi bir çatlama izin verilmeksizin olabilmektedir. Bu nedenle bu bölgede 50 mm ara ile etriye konulmasının yanı sıra güçlendirilen numunelerde kapasitenin zorlanması ve kılcal çatlakların oluşması durumuna karşılık bu bölgeye çelik kafes yapılmıştır. Yapılan çelik kafes numune boyutlarına uygun olarak boyutlandırılıp 10 mm’lik çelikten imal edilmiştir (Şekil 4.8). İki adet “L” şeklinde çelik plaka bükülerek bu plakaların birleşen iki bölgesinden cıvatalar yardımıyla kiriş yüzeyine tam oturacak şekilde

sıkıştırılarak kiriş sıkılaştırma bölgesine monte edilmiştir. Cıvataların sıkıştırıldığı çelik kafesin kulak kısımlarında deney sırasında oluşacak gerilmelerden dolayı eğilme olmaması için bu bölgelere bayrak levhası konulmuştur. Kirişin yüzeyinde pürüzlülükten dolayı çelik kafes bazı bölgelerde kiriş yüzeyine tam olarak oturmamaktadır. Bu nedenle çelik kafes ve kiriş yüzeyi arasında neopren kauçuk konulmuştur. Neopren kauçuk, çelik kafesin cıvataları sıkıştırıldıkça boşlukları tam olarak doldurarak kirişin yüzey gerilimini her noktada çelik kafese eşit olarak aktarmasını sağlamıştır.



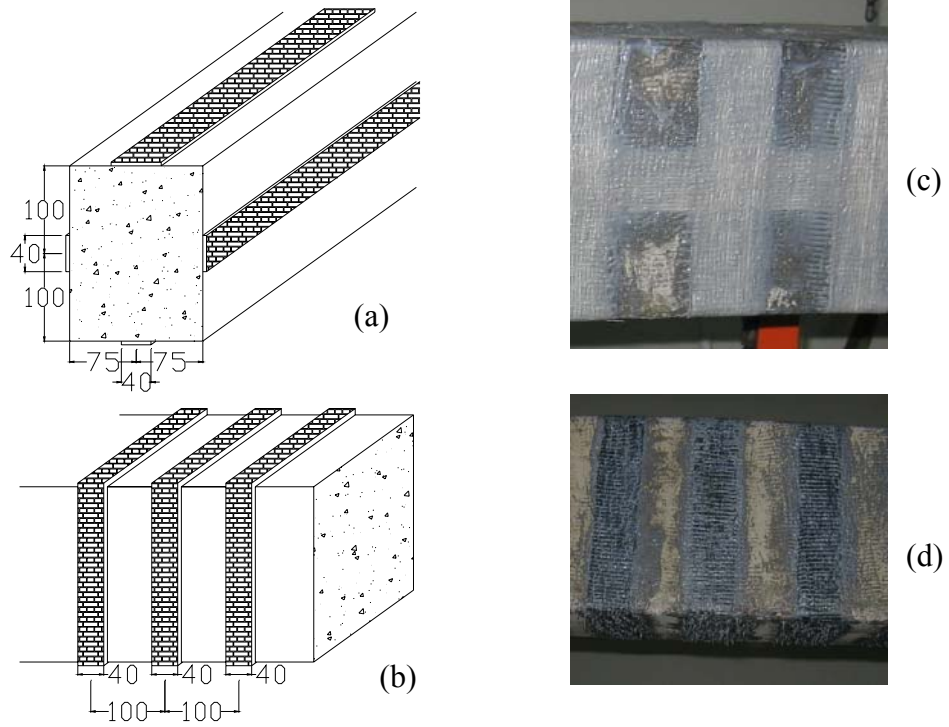
Şekil 4.8: Kiriş sıkılaştırma bölgesine takılan çelik kafes

4.2.3. Deney değişkenleri

Bu çalışmada kiriş boyutları, donatı çapları ve donatı yerleşimleri tüm numuneler için sabit alınmıştır. Kirişlerin çevresine FRP yapıştırılarak yapılan güçlendirmenin normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonlardan üretilen betonarme kirişlerin burulma dayanımına etkisini gözlemleyebilmek amacıyla $f_{ck} = 20$ MPa ve $f_{ck} = 60$ MPa olmak üzere beton basınç dayanımı değişken olarak alınmıştır.

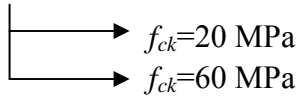
Güçlendirme amaçlı kullanılan FRP tipi; cam, normal elastisite modüllü karbon ve yüksek elastisite modüllü karbon lifi takviyeli polimer olmak üzere değişken olarak alınmıştır. Betonarme kirişlere uygulanan güçlendirme şekli iki türde yapılmıştır. Kiriş boy donatısına paralel olarak kiriş yüzeylerine FRP tabakası yapıştırılarak güçlendirme yapılmış ve “boyuna yapıştırma” olarak isimlendirilmiştir. Burulma davranışına boyuna yapıştırmanın etkisini görebilmek için bazı kirişlerde boyuna yapıştırma yapılmazken bazı kirişlerde boyuna sargılama yapılmıştır. Yapılan boy yapıştırmanın katman sayısı $L=0$ ve $L=1$ olmak üzere değişken olarak alınmıştır. Boyuna yapıştırma için hazırlanan FRP’lerin boyları kiriş boyuna eşit, genişlikleri ise her boyuna FRP için sabit 40 mm olarak alınmıştır. FRP nin merkezi yapıştırılacak kiriş yüzeyinin tam orta noktasına gelecek şekilde kirişin dört yüzeyine birden uygulanmıştır. İkinci olarak etriyeye paralel olarak kiriş yüzeylerine FRP tabakası yapıştırılarak güçlendirme yapılmış ve “enine sargılama” olarak isimlendirilmiştir. Bu sargılamada $N=1$ ve $N=2$ olmak üzere iki farklı katman sayısı kullanılmıştır. Enine sargılamada kullanılan FRP şerit genişliği boyuna yapıştırmada olduğu gibi sabit 40 mm olarak alınmıştır. Enine olarak yapıştırılan her bir FRP şeridi arasında FRP’lerin merkezinden merkezine 100 mm bırakılmıştır. FRP’ler üzerinde bindirme boyu 80 mm olarak alınmıştır. Şekil 4.9’da boyuna yapıştırma ve enine sargılama detayları gösterilmiştir. Şekil 4.10’da tüm deney değişkenleri şematik olarak verilmiştir.

FRP kirişlere Bölüm 4.1.5’te anlatılan epoksiler kullanılarak yapıştırılmıştır. Yapıştırılacak yüzeyler önceden kompresör kullanılarak tozdan arındırılmıştır. Kiriş yüzeyine ilk olarak epoksi sürülerek yüzeyin doygun hale gelmesi sağlanmıştır. Yüzeyin epoksiyi emmesinden sonra ilk kat FRP yapıştırılmıştır. İki kat FRP uygulanan kirişlerde ilk kat FRP yapıştırılıp bu katmanın üzerine epoksi sürülerek epoksinin emilmesi sağlandıktan sonra ikinci kat FRP yapıştırılmıştır.



Şekil 4.9: Boyuna yapıştırma (a ve c) ve enine (b ve d) sargılama detayları

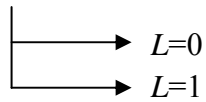
Beton Dayanımı



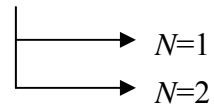
Kullanılan FRP Cinsi



Boyuna Yapıştırma Katman Sayısı



Enine Sargılama Katman Sayısı



GFRP : Cam lifli takviyeli polimer

CFRP-N : Normal elastisite modüllü karbon lifli takviyeli polimer

CFRP-H : Yüksek elastisite modüllü karbon lifli takviyeli polimer

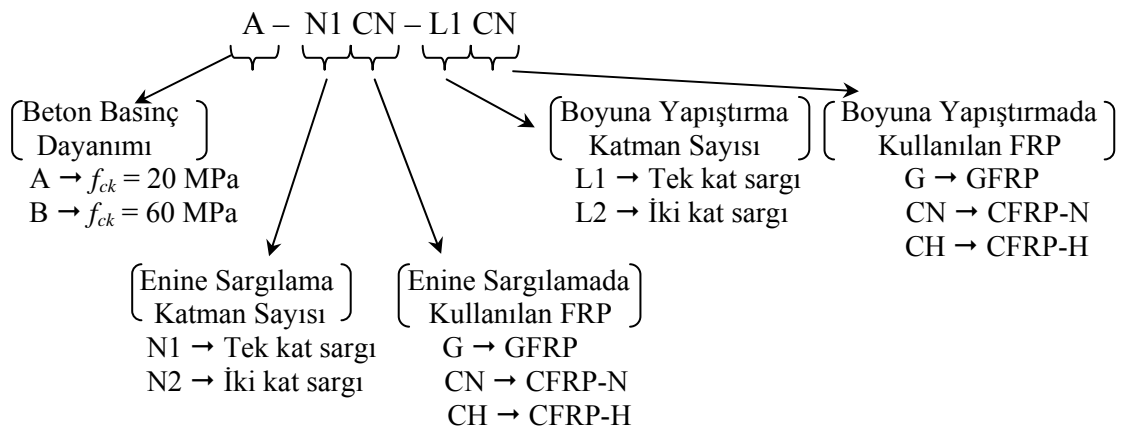
N : Enine yapılan sargılamanın katman sayısı

L : Boyuna yapılan yapıştırmanın katman sayısı

Şekil 4.10: Deney değişkenlerinin şematik gösterimi

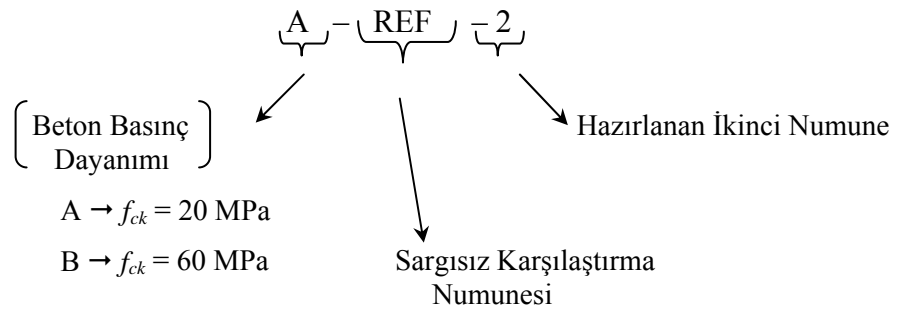
4.2.4. Numunelerin adlandırılması

Bu çalışmada her bir numunede Bölüm 4.2.3'te anlatılan değişkenlerin hangilerinin kullanıldığının kolayca anlaşılabilmesi için her bir numune için ayrı isimler kullanılmıştır. Numune adlandırmasında kullanılan simgeler Şekil 4.11'de detaylı olarak gösterilmiştir. Adlandırmada kullanılan ilk harf beton basınç dayanımını simgelemektedir. Kullanılan adın ilk harfi "A" ise normal dayanımlı beton kullanıldığı ($f_{ck} = 20$ MPa), "B" harfi ise yüksek dayanımlı beton kullanıldığı anlaşılmaktadır. Beton basınç dayanımı gösterildikten sonra, iki tire (-) ile ayrılarak ortada kalan harfler enine yapılan sargılamaya, ikinci tireden sonra kalan harfler ise boyuna yapılan yapıştırmaya ait parametreleri temsil etmektedirler. Tüm kirişlerde enine sargılama olarak $N=1$ ve $N=2$ olmak üzere iki farklı katman sayısı bulunmaktadır. Enine sargılamayı tanımlamak için kullanılan ilk harf "N" enine sargılamayı temsil etmekte yanındaki rakam ise bu sargılamada uygulanan katman sayısını belirtmektedir. Enine sargılamadan sonra gelen harfler enine sargılamada kullanılan FRP nin cinsini tanımlamaktadır. Tüm kirişlerde boyuna yapıştırma olarak $L=0$ ve $L=1$ olmak üzere iki farklı katman sayısı bulunmaktadır. $L=0$ olarak tanımlanan sargılamalarda boyuna yapıştırmanın olmadığı sadece enine sargılama yapıldığı anlaşılmaktadır. Boyuna yapıştırmayı tanımlamak için kullanılan ilk harf "L" boyuna yapıştırmayı temsil etmekte yanındaki rakam ise bu sargılamada uygulanan katman sayısını belirtmektedir. Boyuna yapıştırmanın katman sayısından sonra gelen harfler boyuna sargılamada kullanılan FRP nin cinsini tanımlamaktadır.



Şekil 4.11: Numunelerin adlandırılmasının şematik gösterimi

Sargılama yapılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin yanı sıra hiç sargılama yapılmayan ve burulma deneylerinden elde edilen sonuçları karşılaştırmak amacıyla kullanılan karşılaştırma numuneleri, sargısız sade numuneyi temsilen “REF” adı kullanılarak temsil edilmiştir. Karşılaştırma numunesinin beton basınç dayanımı 20 MPa ise başına “A” harfi, 60 MPa ise “B” harfi konulmuştur. Her bir set için birden fazla karşılaştırma numunesi hazırlandığından dolayı numunelerin adlarının sonuna kaçınıcı numune olduğunu belirten rakamlar konulmuştur. Yapılan bu isimlendirmeye örnek Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.12: Karşılaştırma numunesinin adlandırılmasının şematik gösterimi

Tablo 4.13’de bu çalışma kapsamında dökümleri yapılarak güçlendirilen ve basit burulma deneyi yapılan tüm kirişler isimleriyle, enine sargılama detayları ve boyuna yapıştırma detaylarıyla birlikte gösterilmiştir.

Tablo 4.13: Kullanılan Numune Detayları

A Seti $f_{ck}=20$ MPa	B Seti $f_{ck}=60$ MPa	Enine Sargılama		Boyuna Yapıştırma	
		Kat Sayısı	FRP cinsi	Kat Sayısı	FRP cinsi
A-REF 1	B-REF 1	-	-	-	-
A-REF 2	B-REF 2	-	-	-	-
A-N1G-L0	B-N1G-L0	1	GFRP	-	-
A-N2G-L0	B-N2G-L0	2	GFRP	-	-
A-N1G-L1G	B-N1G-L1G	1	GFRP	1	GFRP
A-N2G-L1G	B-N2G-L1G	2	GFRP	1	GFRP
A-N1CN-L0	B-N1CN-L0	1	CFRP-N	-	-
-	B-N2CN-L0	2	CFRP-N	-	-
A-N1CN-L1CN	B-N1CN-L1CN	1	CFRP-N	1	CFRP-N
-	B-N2CN-L1CN	2	CFRP-N	1	CFRP-N
A-N1CH-L0	B-N1CH-L0	1	CFRP-H	-	-
A-N1CH-L1CH	B-N1CH-L1CH	1	CFRP-H	1	CFRP-H
A-N1G-L1CN	B-N1G-L1CN	1	GFRP	1	CFRP-N
A-N1G-L1CH	B-N1G-L1CH	1	GFRP	1	CFRP-H

4.3. Malzeme Dayanımları

Numunelerin beton dökümleri üçerli gruplar halinde yapılmıştır ve her döküm sırasında hazırlanmış olan betonun basınç ve çekme dayanımının belirlenebilmesi amacıyla 18 adet silindir numune ve 5 adet prizmatik kiriş numuneleri alınmıştır. Alınan silindir beton numunelerin 8 adeti basınç dayanımını belirlemek için, diğer 8 adeti yarmada çekme dayanımını belirlemek için ve prizmatik kiriş numuneleri eğilmede çekme dayanımını belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Yapılan tüm malzeme deneyleri ait oldukları numunelerin basit burulma deneylerinin yapıldığı gün alınarak o günkü karakteristik değerler belirlenmiştir.

4.3.1. Beton kiriş eğilme deneyi

Beton dökümleri sırasında Şekil 4.13'te gösterilen 100*100*500 mm boyutlarındaki prizmatik kiriş kalıpları kullanılarak beton kiriş numuneleri alınmıştır. Her bir prizmatik beton kiriş Şekil 4.14'te gösterilen deney aletinde iki noktadan yüklenerek eğilme deneyine tabi tutulmuşlardır. Numunelerin eğilmede basınç dayanımını yaklaşık olarak belirlemek için alınan tüm prizmatik beton kirişlerin deney sonuçlarının ortalaması alınmıştır. Deneyler sonucunda belirlenmiş olan tüm numunelere ait eğilmede çekme dayanımı değerleri Tablo 4.14'te verilmiştir.

Tablo 4.14: Numunelerin Eğilmede Çekme Dayanımları

A Seti $f_{ck}=20$ MPa	Eğilmede Çekme Dayanımı (f_{ctf}) (MPa)	B Seti $f_{ck}=60$ MPa	Eğilmede Çekme Dayanımı (f_{ctf}) (MPa)
A-REF 1	5,02	B-REF 1	6,40
A-REF 2	5,47	B-REF 2	7,00
A-N1G-L0	5,02	B-N1G-L0	7,00
A-N2G-L0	5,47	B-N2G-L0	7,00
A-N1G-L1G	5,47	B-N1G-L1G	6,90
A-N2G-L1G	5,02	B-N2G-L1G	6,90
A-N1CN-L0	5,20	B-N1CN-L0	6,69
-	-	B-N2CN-L0	6,77
A-N1CN-L1CN	5,20	B-N1CN-L1CN	6,69
-	-	B-N2CN-L1CN	6,69
A-N1CH-L0	5,29	B-N1CH-L0	6,77
A-N1CH-L1CH	5,29	B-N1CH-L1CH	6,77
A-N1G-L1CN	5,20	B-N1G-L1CN	6,90
A-N1G-L1CH	5,29	B-N1G-L1CH	6,40



Şekil 4.13: Eğilme kirişi numune kalıpları



Şekil 4.14: Beton kiriş eğilme deneyi

4.3.2. Silindir yarma deneyi

Beton dökümleri sırasında numunelerin yarmada çekme dayanımının belirlenmesi için Şekil 4.15'te görülen 150mm çapında 300 mm yüksekliğinde silindir kalıplar kullanılarak her döküm için 8 adet silindir numune alınmıştır. Silindir numuneler Şekil 4.16(a)'da gösterilen basınç deneyi aletinde yarma deneyine tabi tutulmuşlardır. Yapılan deneyler sonucunda tüm numunelerin yarmada çekme dayanımları belirlenerek tüm sonuçların ortalaması alınmış ve numunelerin karakteristik yarmada çekme dayanımları belirlenmiştir. Deneyler sonucunda belirlenmiş olan tüm numunelere ait silindir yarmada çekme dayanımı değerleri Tablo 4.15'de verilmiştir.



Şekil 4.15: Silindir numune kalıpları

Tablo 4.15: Numunelerin Yarmada Çekme Dayanımları

A Seti $f_{ck}=20$ MPa	Yarmada Çekme Dayanımı (f_{cts}) (MPa)	B Seti $f_{ck}=60$ MPa	Yarmada Çekme Dayanımı (f_{cts}) (MPa)
A-REF 1	2,56	B-REF 1	4,69
A-REF 2	2,74	B-REF 2	4,72
A-N1G-L0	2,56	B-N1G-L0	4,72
A-N2G-L0	2,74	B-N2G-L0	4,72
A-N1G-L1G	2,74	B-N1G-L1G	4,55
A-N2G-L1G	2,56	B-N2G-L1G	4,55
A-N1CN-L0	2,87	B-N1CN-L0	4,78
-		B-N2CN-L0	4,67
A-N1CN-L1CN	2,87	B-N1CN-L1CN	4,78
-		B-N2CN-L1CN	4,78
A-N1CH-L0	2,94	B-N1CH-L0	4,67
A-N1CH-L1CH	2,94	B-N1CH-L1CH	4,67
A-N1G-L1CN	2,87	B-N1G-L1CN	4,55
A-N1G-L1CH	2,94	B-N1G-L1CH	4,69



Şekil 4.16: (a) Silindir yarma deneyi (b) Silindir basınç deneyi

4.3.3. Silindir basınç deneyi

Dökümü yapılan betonların basınç dayanımının belirlenmesi için Şekil 4.15'te görülen 150 mm çapında 300 mm yüksekliğindeki silindir kalıpları kullanılmıştır. Beton dökümü yapılırken silindir numuneler kalıba yerleştirilmiş ve üst kısımları mala ile düzeltilmiştir. Kalıptan alınan silindir numunelerin alt yüzeyleri düzgün yüzeyli olmalarına karşın üst yüzeyleri pürüzlü çıkmıştır bu nedenle %70 kükürt %30 grafit karışımı yeterli sıcaklıkta eritilerek silindir numunelerin üst yüzeylerine başlık yapılmıştır. Bu işlem sonucunda basınç deneyi yapılacak silindir numunesinin her iki yüzeyinin de düz yüzeyli olması sağlanmıştır. Silindir numunelerin; Şekil 4.16 (b)'de gösterilen silindir basınç aleti kullanılarak basınç dayanımları belirlenmiş ve bu değerlerin ortalaması alınarak karakteristik basınç dayanımları bulunmuştur. Tablo 4.16'da tüm numuneler için deneyler sonucunda bulunan basınç değerleri gösterilmiştir.

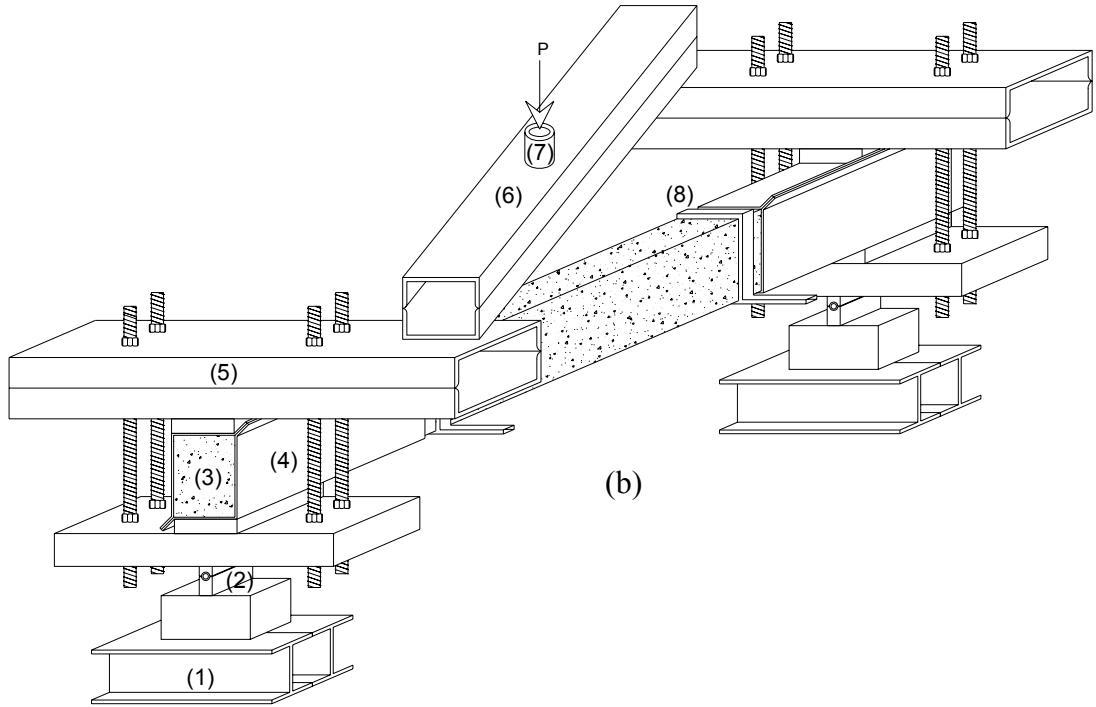
Tablo 4.16: Numunelerin Basınç Dayanımları

A Seti $f_{ck}=20$ MPa	Beton Basınç Dayanımı (f_{ck}) (MPa)	B Seti $f_{ck}=60$ MPa	Beton Basınç Dayanımı (f_{ck}) (MPa)
A-REF 1	26,86	B-REF 1	54,14
A-REF 2	30,02	B-REF 2	58,83
A-N1G-L0	26,86	B-N1G-L0	58,83
A-N2G-L0	30,02	B-N2G-L0	58,83
A-N1G-L1G	30,02	B-N1G-L1G	52,61
A-N2G-L1G	26,86	B-N2G-L1G	52,61
A-N1CN-L0	29,61	B-N1CN-L0	60,09
-		B-N2CN-L0	61,02
A-N1CN-L1CN	29,61	B-N1CN-L1CN	60,09
-		B-N2CN-L1CN	60,09
A-N1CH-L0	28,49	B-N1CH-L0	61,02
A-N1CH-L1CH	28,49	B-N1CH-L1CH	61,02
A-N1G-L1CN	29,61	B-N1G-L1CN	52,61
A-N1G-L1CH	28,49	B-N1G-L1CH	54,14

4.4. Deney Düzenegi

Bu çalışma kapsamında üretilen 150*200*1900 mm boyutundaki tüm numuneler Kocaeli Üniversitesi Yapı Laboratuvarında bulunan çelik çerçeve içerisine basit burulma deney düzenegi kurularak test edilmiştir. Hazırlanmış olan deney düzenegi

Şekil 4.17(b)'de şematik olarak gösterilmiş olan; (1) çelik çerçeve, (2) döner mesnet, (3) deney numunesi, (4) çelik kafes, (5) burulma kolu, (6) yük dağıtma kirişi, (7) yük hücresi ve (8) alüminyum kol elemanları kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 4.17: (a) Burulma deneyi düzeneği, (b) Burulma deneyi düzeneği şematik gösterimi

Deney düzeneği laboratuvar zeminine sabitlenmiş olan çelik yükleme çerçevesi içerisine yerleştirilmiştir. Deney düzeneğinde yer alan 300 kN kapasiteli pompa seti ile deney sırasında uygulanacak olan yük, 100 kN kapasiteli yük hücresi üzerinden yük dağıtıcı kirişe aktarılmış ve burulma kolları vasıtasıyla numune üzerine burulma

momenti uygulanmıştır. Deney numunesi iki ucundan döner mesnetler kullanılarak mesnetlenmiştir. Döner mesnetler kullanılarak, deney numunesinin uzunluğuna paralel eksen boyunca uygulanan burulma momenti etkisi altında deney numunesinin bu eksen boyunca dönmeye açık bırakılması sağlanmıştır. Deney sırasında burulma momenti, burulma kolları kullanılarak numune üzerine aktarılmıştır. Bu aktarımın sorunsuz bir şekilde gerçekleşmesi için deney numunesi, mesnet ile burulma kolları arasında gijonlar kullanılarak cıvatalar yardımıyla tamamen sıkıştırılmıştır.

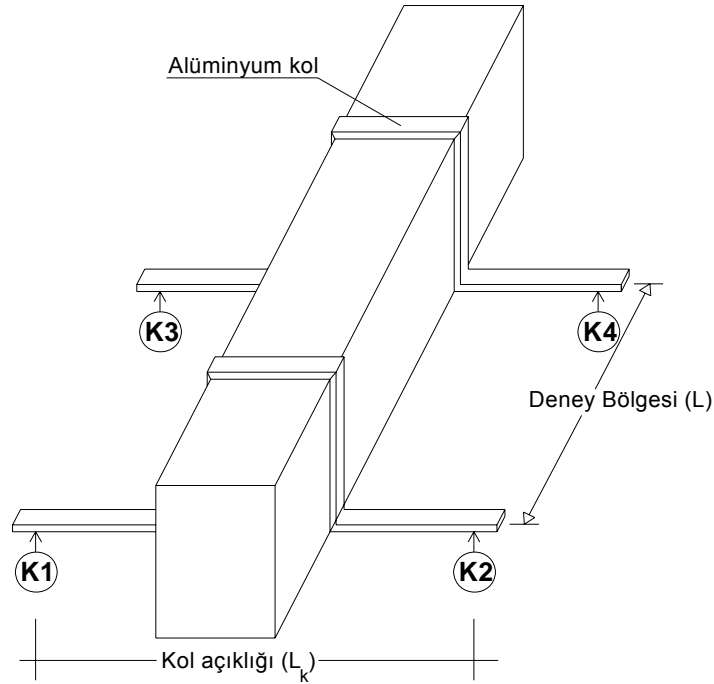
Yapılmış olan basit burulma deneylerinden yük, birim dönme ve birim uzama değerlerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Deney sırasında numuneye uygulanan yük, yük hücresinden gelen elektronik verilerin elektronik data toplama sisteminde toplanması aracılığıyla bilgisayara aktarılarak gözlemlenmiştir. Deney sırasında uygulanan burulma momenti etkisi altında numunede meydana gelen birim dönme açısı Şekil 4.17(b)'de (8) ile gösterilen alüminyum kollar kullanılarak ölçülmüştür. Alüminyum kollar numunenin deney bölgesi olarak belirtilen 940 mm'lik bölgenin başlangıç ve bitiş bölgelerine yerleştirilmiştir. Her iki alüminyum kolun her iki tarafına bağlanan elektronik komparatörler yardımıyla uygulanan burulma momenti etkisi altında numunede meydana gelen toplam birim dönme açısı belirlenmiştir. Deney numunesinde meydana gelen birim uzama da deney bölgesinin her iki ucuna bağlanan alüminyum kolların alt ve üst bölgelerine bağlanan iki adet elektronik komparatörün diğer alüminyum kola çelik tel vasıtasıyla bağlanarak elde edilen veriler kullanılarak belirlenmiştir.

Deney sırasında numunenin ilk çatlağının oluştuğu andaki burulma momenti değeri (ilk çatlak momenti) ve numunenin burulma momenti kapasitesi değerleri okunulmuştur. Deney süresi deney numunesinin birim dönme açısının 0.12 rad/m'ye ulaştığı nokta ile sınırlandırılmıştır. Deney tamamlandıktan sonra numunenin üzerine uygulanan yük sabit hızla boşaltılmıştır.

4.4.1. Okuma noktaları

Deney düzeneği içerisine yerleştirilen deney numunesi üzerine elektronik komparatörler konulmuştur. Bu elektronik komparatörler kullanılarak deney

süresince numunenin gerçekleştirdiği deplasman değerleri ve toplam boy uzama değerleri elektronik veri toplama sistemi yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır. Deney süresince uygulanan yük değerleri ise yük hücresi üzerinden okunarak elektronik veri toplama sistemi yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır. Numune üzerine toplam 6 adet elektronik komparatör yerleştirilmiştir. Numune deney bölgesi başlangıç ve bitiş noktalarına yerleştirilen alüminyum kolların uç noktalarına bastırılan 4 adet elektronik komparatörler sayesinde burulma momenti etkisi altında numunenin dönmesi buralarda oluşan deplasman değerleri yardımıyla tespit edilmektedir. Birim dönme açısının belirlenmesi amacıyla kullanılan 4 adet elektronik komparatörün (K ile temsil edilmiştir) yerleşimi Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Toplam boy uzamanın belirlenmesi amacıyla 2 adet elektronik komparatör kullanılmıştır. Deney bölgesinin iki ucuna yerleştirilen alüminyum kolların üst bölgesine bir adet ve alt bölgesine bir adet elektronik komparatör yerleştirilmiştir. Yerleştirilen elektronik komparatörler buldukları alüminyum koldan diğer kola elastisite modülü yüksek çelik tel kullanılarak bağlanmıştır. Böylece numunenin deney bölgesinde meydana gelen uzama belirlenebilmektedir. Toplam boy uzamanın belirlenmesinde kullanılan 2 adet elektronik komparatörün yerleşimi Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



Şekil 4.18: Birim dönme açısının belirlenmesi amacıyla kullanılan 4 elektronik komparatörlerin yerleşimi



Şekil 4.19: Toplam boy uzamanın belirlenmesi amacıyla kullanılan 2 elektronik komparatörlerin yerleşimi (numunenin yandan görünüşü)

Şekil 4.18’de gösterilen elektronik komparatörlerden elde edilen veriler Denklem 4.1 içerisinde kullanılarak numuneye ait birim dönme açısı belirlenmiştir. K1, K2, K3 ve K4 komparatörlerinden alınan değerlerin toplamı alüminyum kol açıklığına (L_k) bölüldükten sonra dönme açısı belirlenmekte, bu değer deney bölgesi uzunluğuna bölüldükten sonra da birim dönme açısı belirlenmektedir. Şekil 4.19’da gösterilen komparatörlerden (K5 ve K6) elde edilen veriler Denklem 4.2 içerisinde kullanılarak numuneye ait toplam boy uzaması miktarları belirlenmiştir.

$$\phi = \frac{\left(\frac{|K1| + |K2| + |K3| + |K4|}{L_k} \right)}{L} \quad (4.1)$$

$$\Delta L = \frac{K5 + K6}{2} \quad (4.2)$$

5. DENEY SONUÇLARI

Bu bölümde, dökümleri ve güçlendirmeleri yapılmış 12 adet normal dayanımlı (NDB) ve 14 adet yüksek dayanımlı (YDB) betonarme kirişin Bölüm 4'te anlatılan basit burulma deney düzeneği kullanılarak yapılan deneylerin sonuçları anlatılacaktır. Deneylerden elde edilen verilerden oluşturulan burulma momenti – birim dönme açısı ve burulma momenti – toplam boy uzama grafikleri tüm numuneler için ayrı ayrı verilmiştir.

5.1. Burulma Momenti – Birim Dönme Açısı İlişkisi

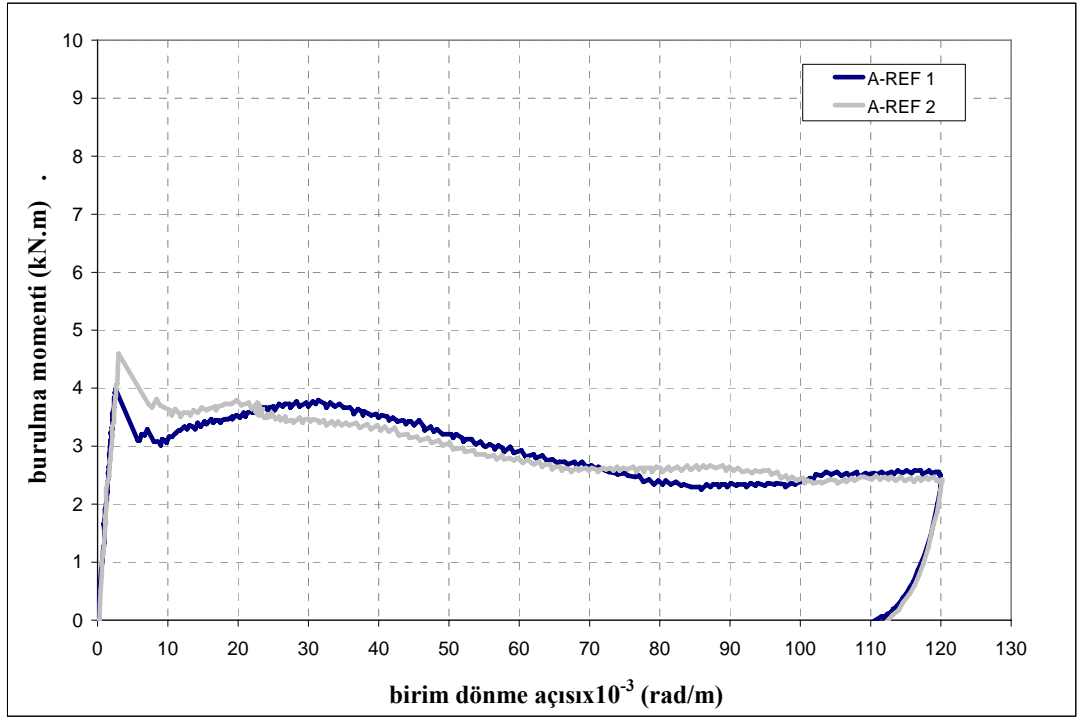
Yapılmış olan basit burulma deneylerinden elde edilen burulma momenti değerleri ve birim dönme açısı değerleri normal dayanımlı betonarme kirişler için Tablo 5.1 de, yüksek dayanımlı betonarme kirişler için Tablo 5.2'de verilmiştir. Tablolarda tüm numunelere ait silindir basınç deneyleri sonucunda elde edilen betonun karakteristik basınç dayanımı (f_{ck}), deney numunesi üzerinde ilk çatlakın oluştuğu andaki burulma momenti değeri (T_{cr}), ilk çatlakın oluştuğu andaki birim dönme açısı değeri (ϕ_{cr}), deney numunesinin taşıdığı en büyük burulma momenti değeri (T_u), T_u burulma momentine karşılık gelen birim dönme açısı değeri (ϕ_u) verilmiştir. Betonarme kiriş içerisinde burulma donatısı miktarı az ise betonarme kirişin çatlama öncesi davranışı donatısız beton kirişin burulma davranışına benzer davranış sergilemeye başlamaktadır. Bu nedenle çok sayıda numunede T_{cr} değeri T_u değerine eşit olmakta yani ilk çatlaktan sonra burulma kapasitesi yükselmektedir. Şekil 5.1 ve Şekil 5.6 arasındaki grafiklerde A grubu numunelere ve Şekil 5.7 ve Şekil 5.13 arasındaki grafiklerde B grubu numunelere ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri verilmiştir.

Tablo 5.1: Normal Dayanımlı Numunelerin (A - $f_{ck}=20$ MPa) Deney Sonuçları

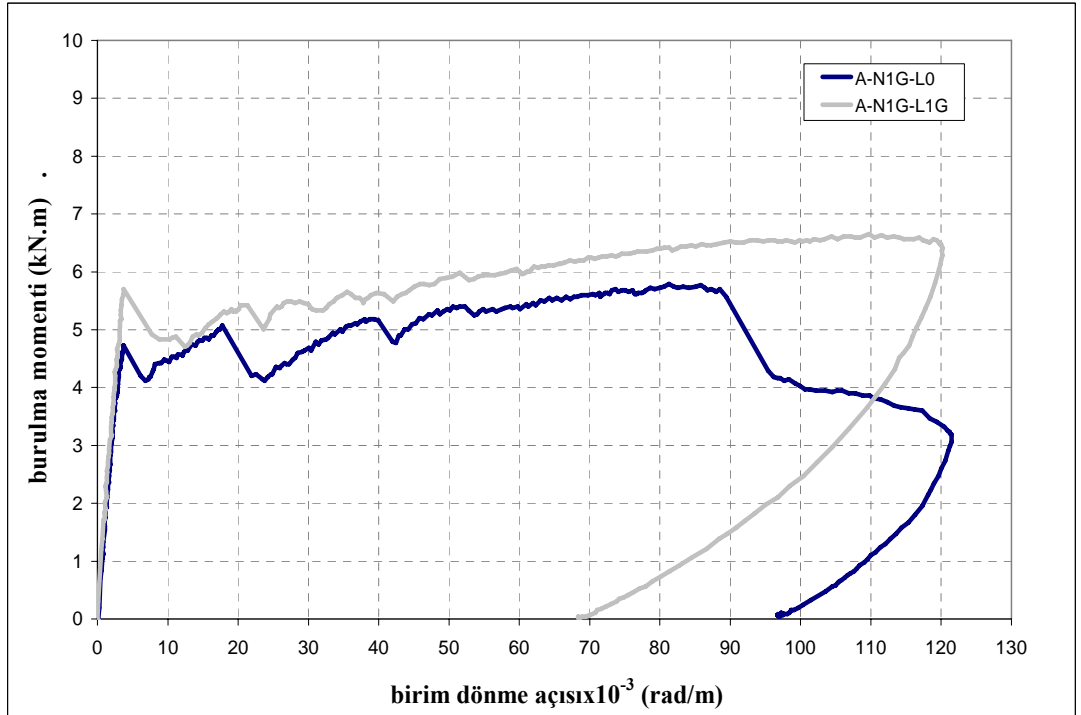
Numune Adı	f_{ck} (MPa)	T_{cr} (kN.m)	Φ_{cr} (rad/m)	T_u (kN.m)	Φ_u (rad/m)
A-REF 1	26,86	3,99	0,00250	3,99	0,00250
A-REF 2	30,02	4,60	0,00297	4,60	0,00297
A-N1G-L0	26,86	4,72	0,00375	5,79	0,0813
A-N2G-L0	30,02	5,42	0,00375	6,70	0,11279
A-N1G-L1G	30,02	5,70	0,00375	6,66	0,10976
A-N2G-L1G	26,86	5,70	0,00439	7,11	0,11961
A-N1CN-L0	29,61	5,44	0,00389	6,61	0,10497
A-N1CN-L1CN	29,61	5,33	0,00388	6,37	0,08116
A-N1CH-L0	28,49	5,55	0,00425	5,59	0,01530
A-N1CH-L1CH	28,49	6,74	0,00773	6,74	0,00773
A-N1G-L1CN	29,61	6,35	0,00398	6,59	0,06505
A-N1G-L1CH	28,49	6,24	0,00420	6,24	0,00420

Tablo 5.2: Yüksek Dayanımlı Numunelerin (B - $f_{ck}=60$ MPa) Deney Sonuçları

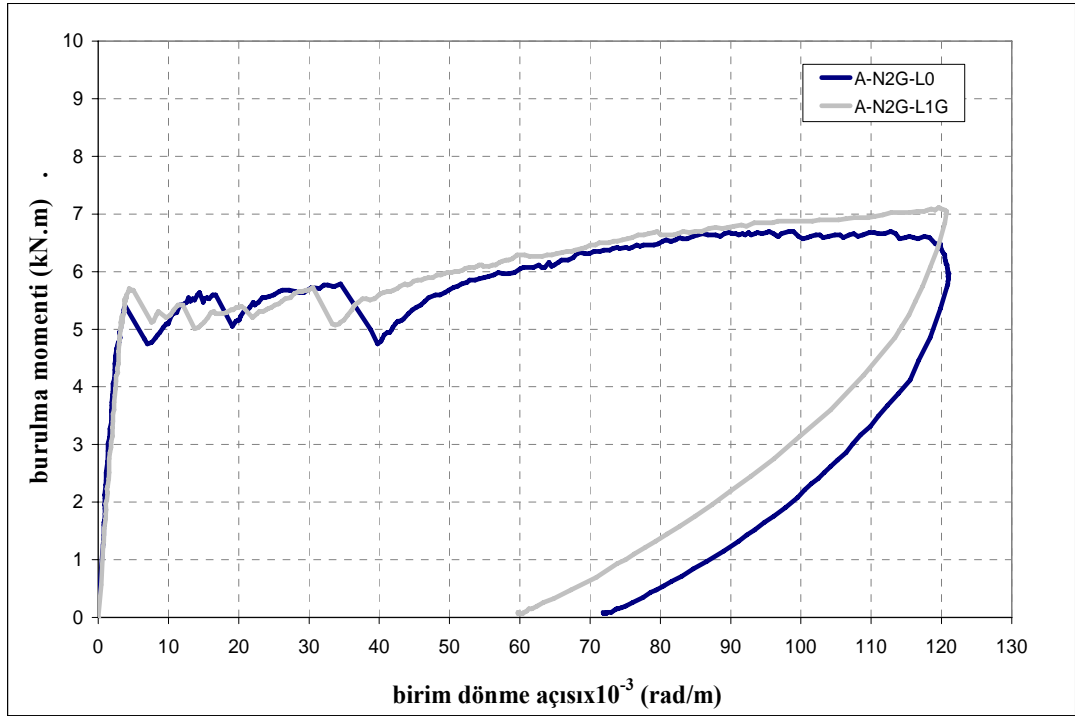
Numune Adı	f_{ck} (MPa)	T_{cr} (kN.m)	Φ_{cr} (rad/m)	T_u (kN.m)	Φ_u (rad/m)
B-REF 1	54,14	7,24	0,00304	7,24	0,00304
B-REF 2	58,83	7,33	0,00333	7,33	0,00333
B-N1G-L0	58,83	7,48	0,00431	7,48	0,00431
B-N2G-L0	58,83	7,39	0,00323	8,09	0,10582
B-N1G-L1G	52,61	9,13	0,00365	9,13	0,00365
B-N2G-L1G	52,61	8,59	0,00414	8,65	0,11160
B-N1CN-L0	60,09	8,02	0,00310	8,43	0,00437
B-N2CN-L0	61,02	7,52	0,00600	8,46	0,11947
B-N1CN-L1CN	60,09	7,83	0,00402	7,83	0,00402
B-N2CN-L1CN	60,09	8,09	0,00418	8,82	0,11973
B-N1CH-L0	61,02	7,22	0,00330	7,22	0,00330
B-N1CH-L1CH	61,02	7,74	0,00404	7,74	0,00404
B-N1G-L1CN	52,61	8,74	0,00438	8,74	0,00438
B-N1G-L1CH	54,14	8,04	0,00577	8,04	0,00577



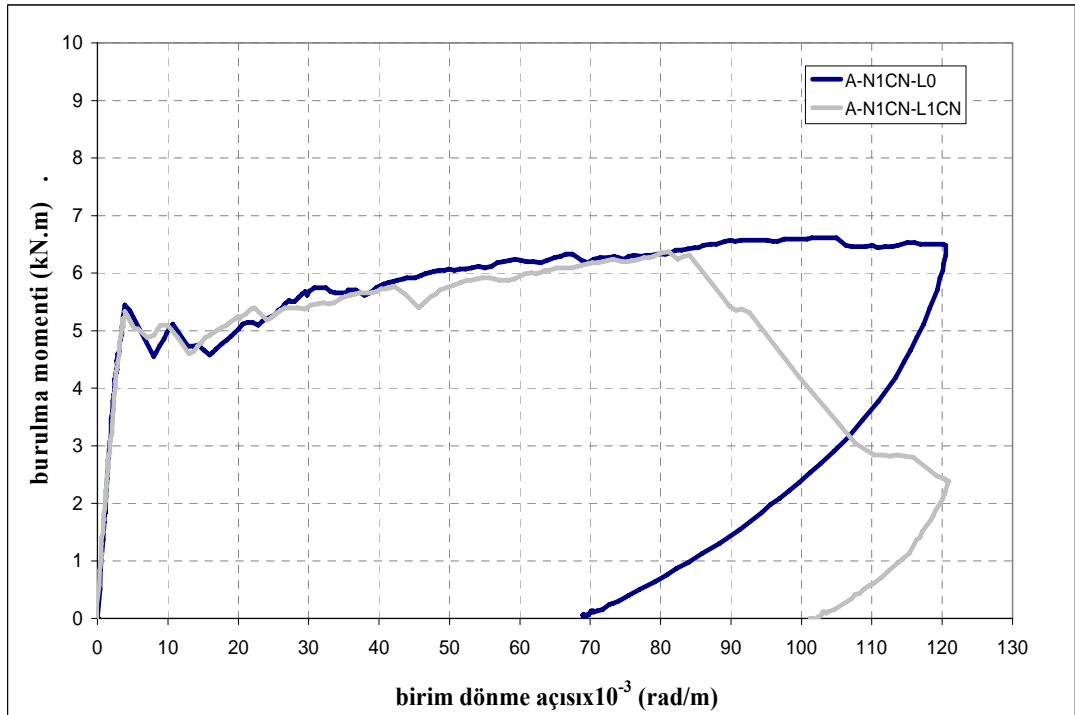
Şekil 5.1: A grubu numunelere ait 1. ve 2. karşılaştırma numunesinin burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri



Şekil 5.2: A-N1G-L0 ve A-N1G-L1G numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri



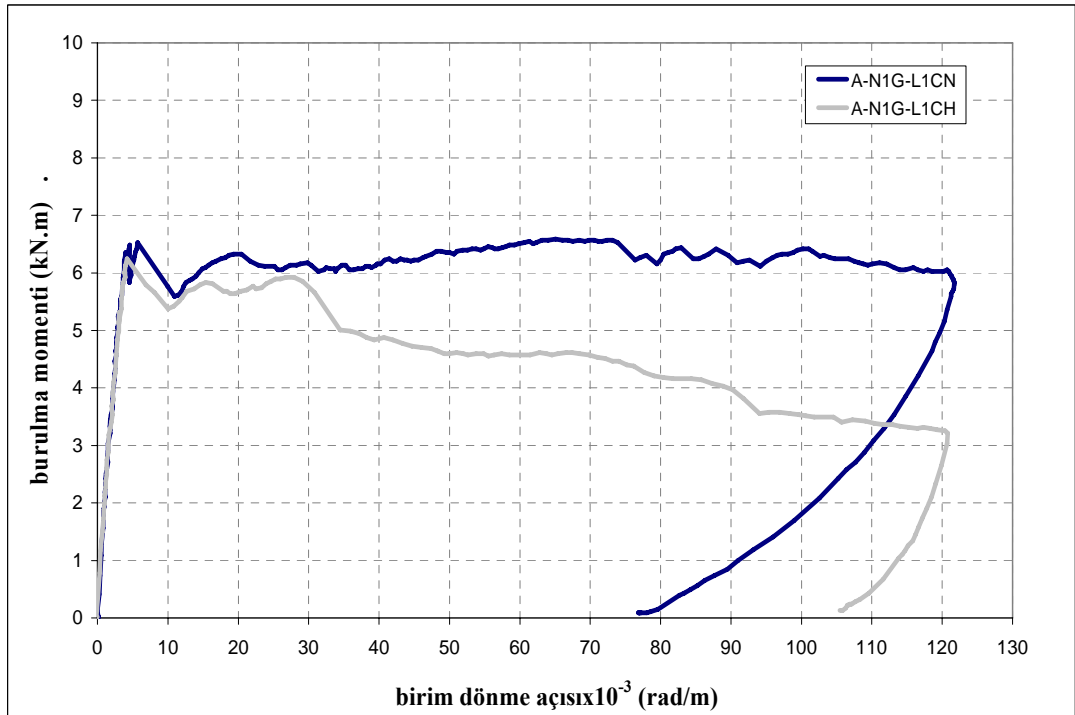
Şekil 5.3: A-N2G-L0 ve A-N2G-L1G numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri



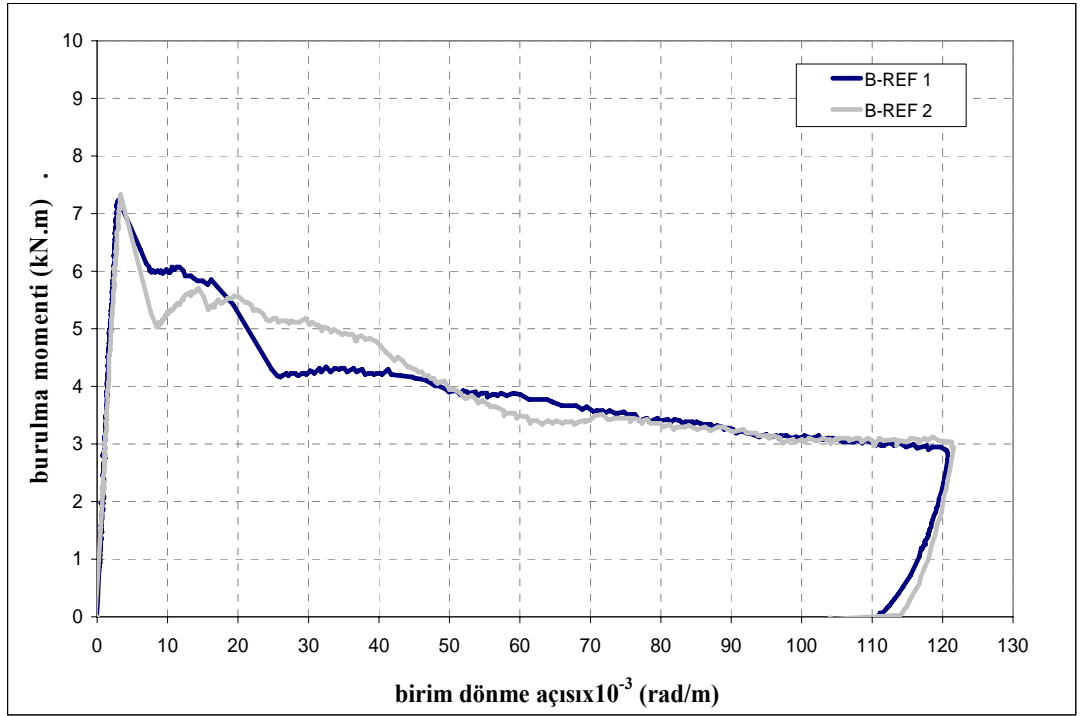
Şekil 5.4: A-N1CN-L0 ve A-N1CN-L1CN numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri



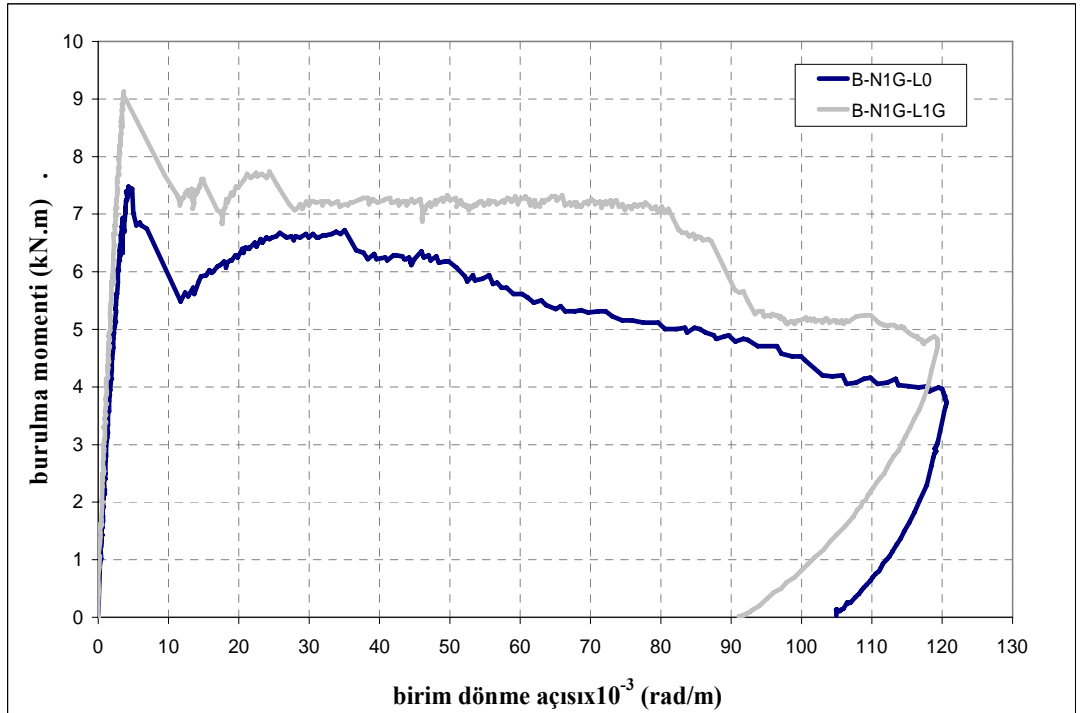
Şekil 5.5: A-N1CH-L0 ve A-N1CH-L1CH numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri



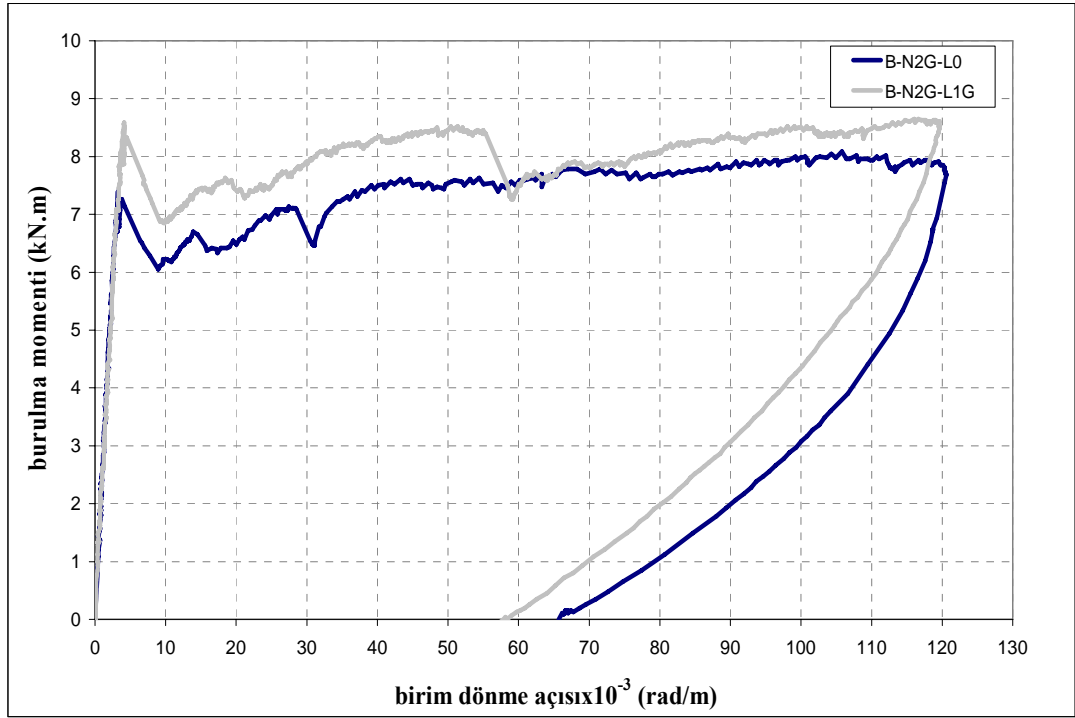
Şekil 5.6: A-N1G-L1CN ve A-N1G-L1CH numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri



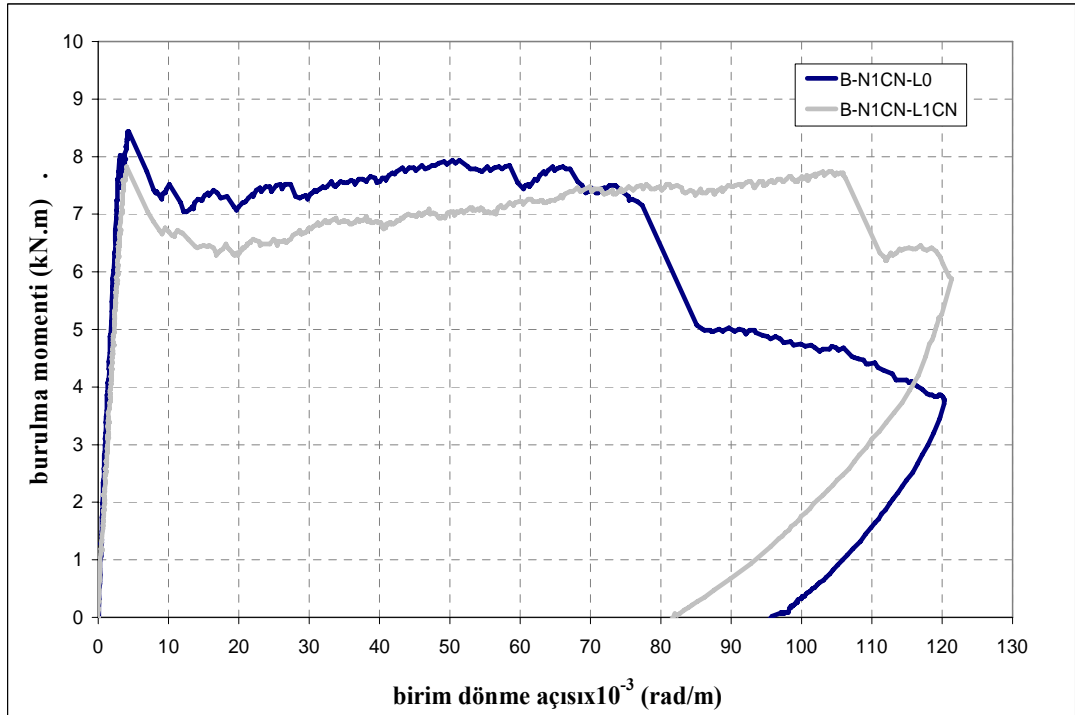
Şekil 5.7: B grubu numunelere ait 1. ve 2. karşılaştırma numunesinin burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri



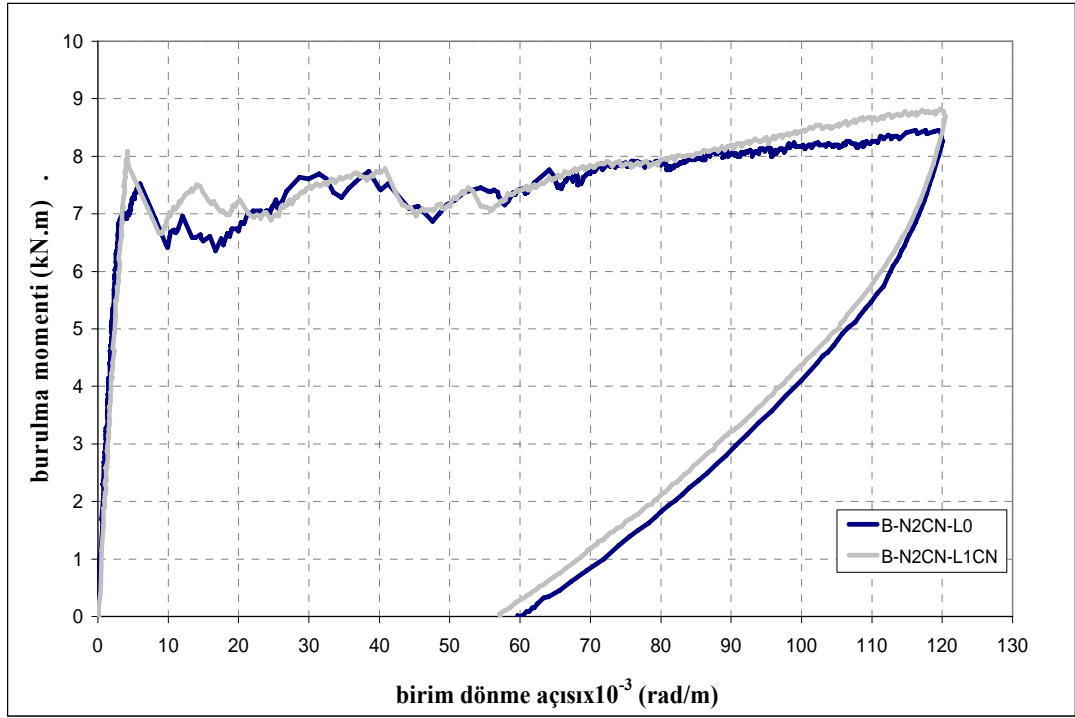
Şekil 5.8: B-N1G-L0 ve B-N1G-L1G numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri



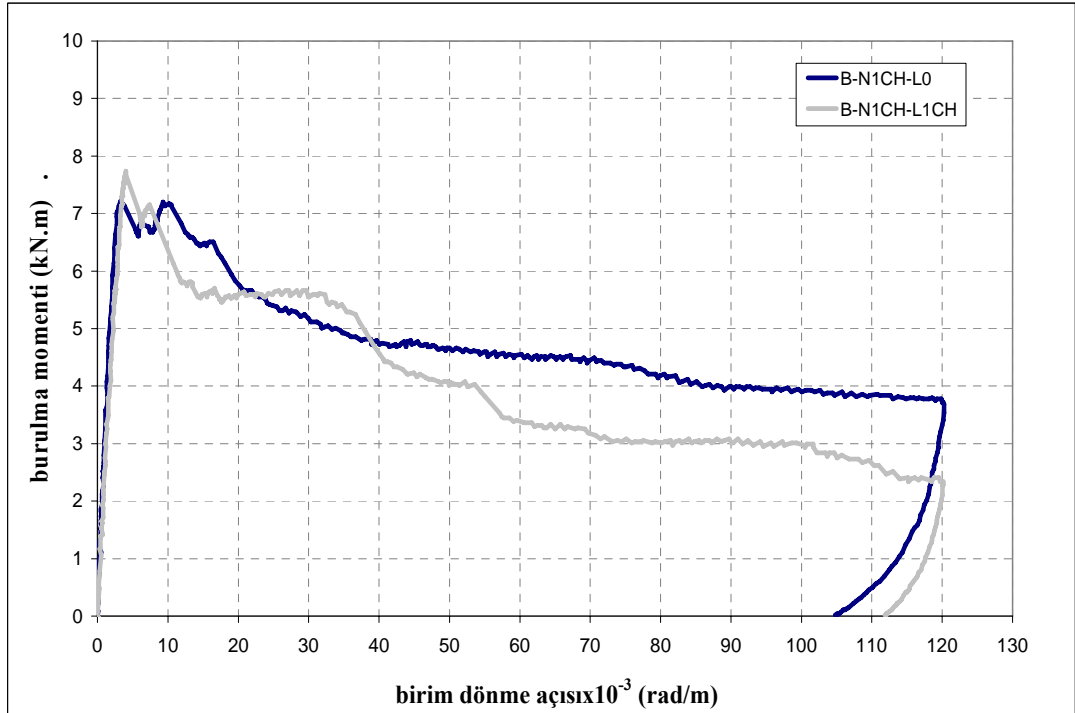
Şekil 5.9: B-N2G-L0 ve B-N2G-L1G numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri



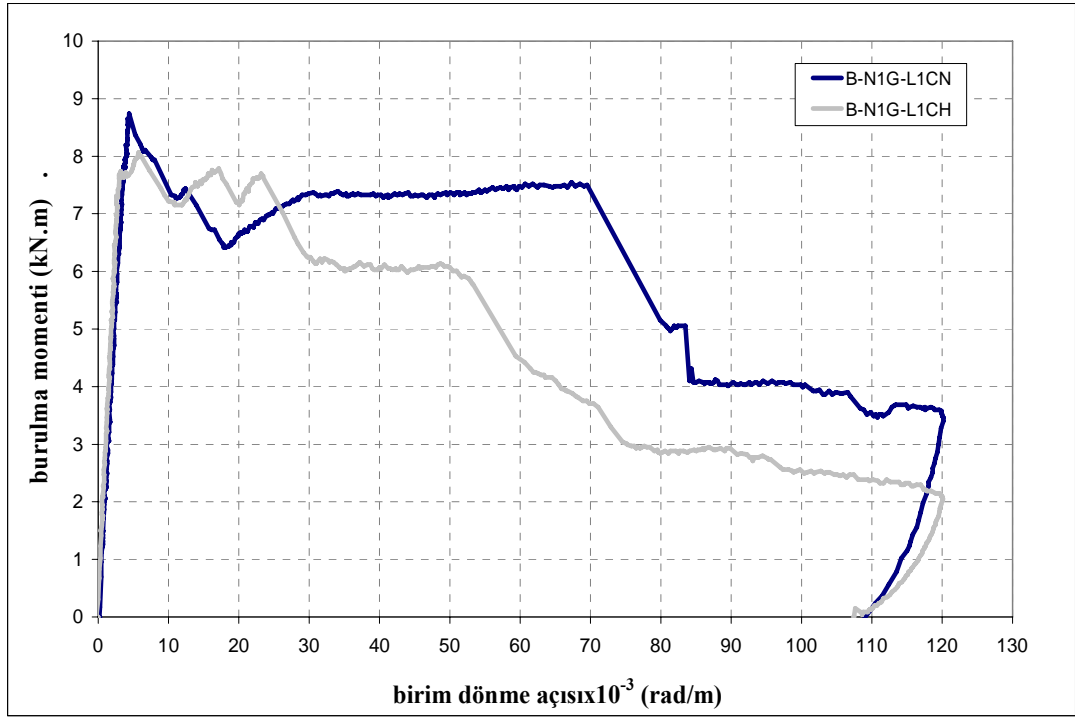
Şekil 5.10: B-N1CN-L0 ve B-N1CN-L1CN numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri



Şekil 5.11: B-N2CN-L0 ve B-N2CN-L1CN numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri



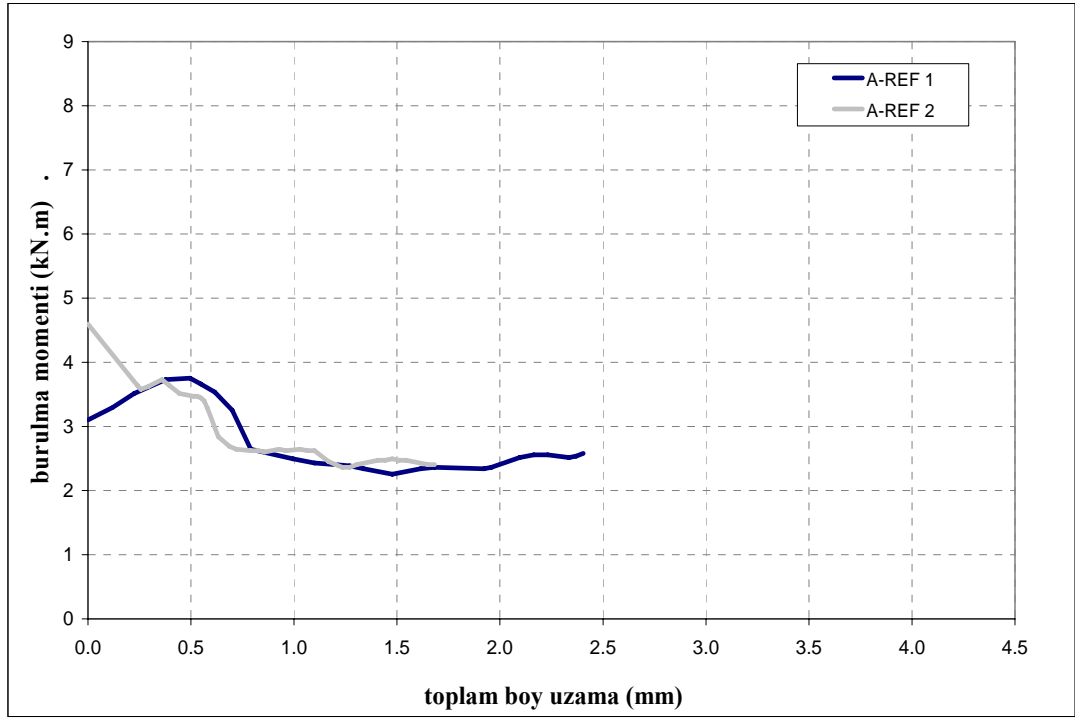
Şekil 5.12: B-N1CH-L0 ve B-N1CH-L1CH numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri



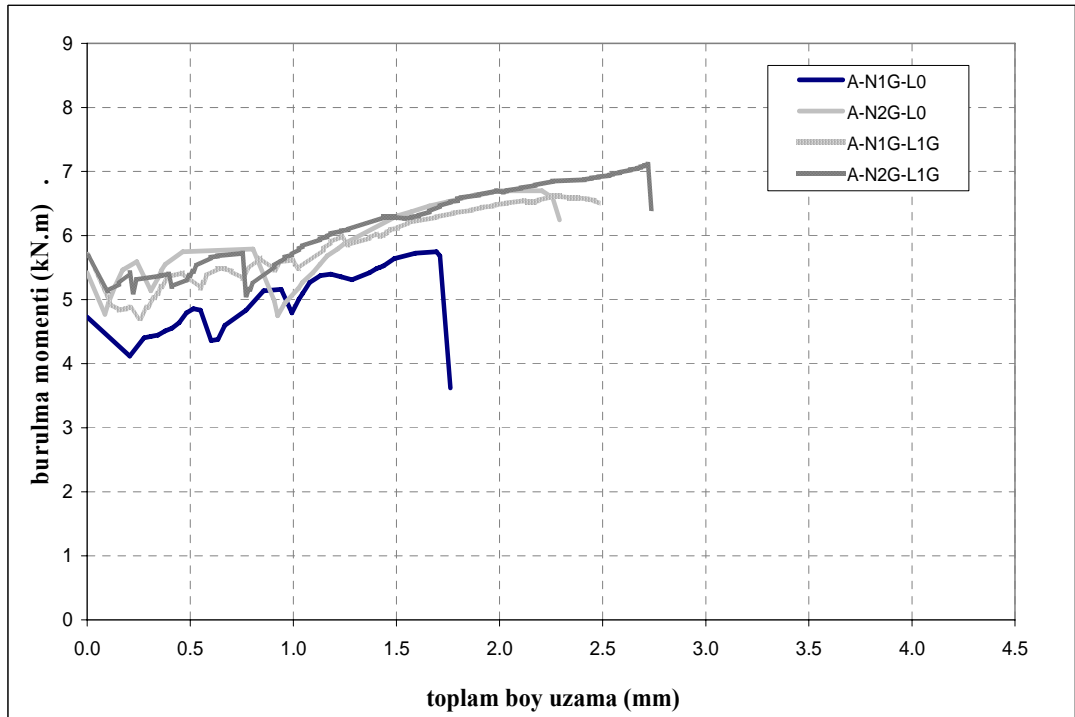
Şekil 5.13: B-N1G-L1CN ve B-N1G-L1CH numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri

5.2. Burulma Momenti – Toplam Boy Uzama İlişkisi

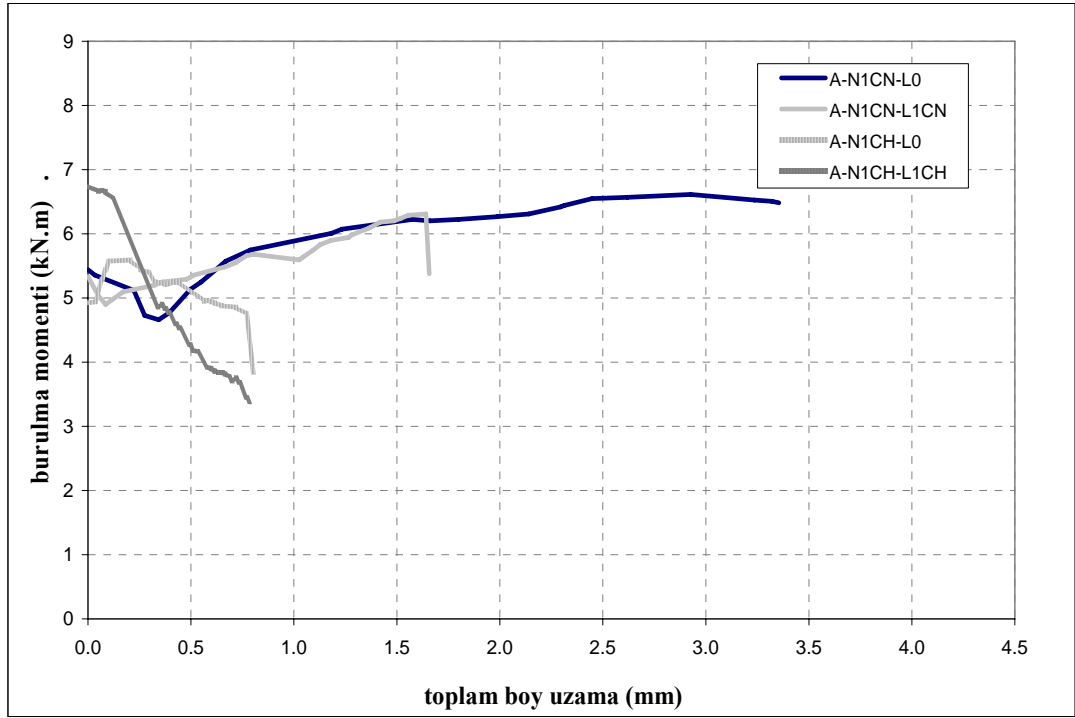
Deney sırasında K5 ve K6 komparatörleri yardımıyla toplam boy uzama değerleri belirlenmiştir. Bu işlem sonucunda burulma momenti – toplam boy uzama grafikleri çizilmiştir. Buradaki amaç açılan çatlaklarla ve kirişte meydana gelen elastik uzamalarla birlikte betonarme kirişte meydana gelen boy uzama miktarının artmasıyla, betonarme kirişin taşıyabileceği burulma momenti değerlerinin değişimini belirlemektir. Şekil 5.14 ve Şekil 5.17 arasındaki grafiklerde A grubu numunelere ve Şekil 5.18 ve Şekil 5.22 arasındaki grafiklerde B grubu numunelere ait burulma momenti – toplam boy uzama grafikleri verilmiştir.



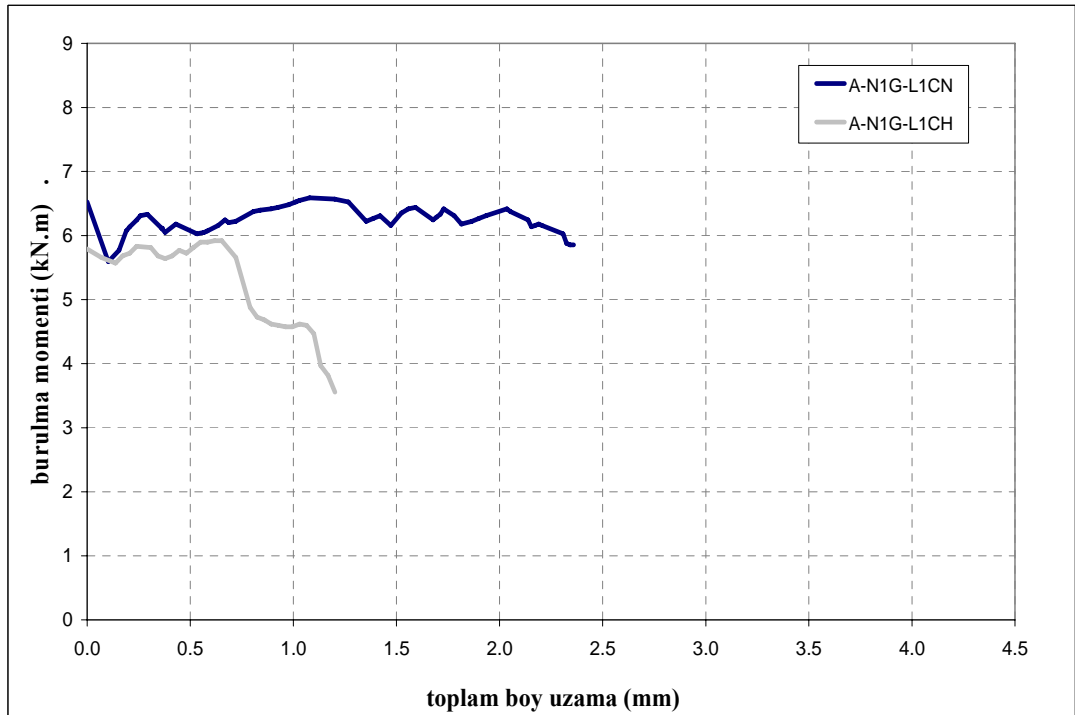
Şekil 5.14: A grubu numunelere ait 1. ve 2. karşılaştırma numunesinin burulma momenti – toplam boy uzama grafiği



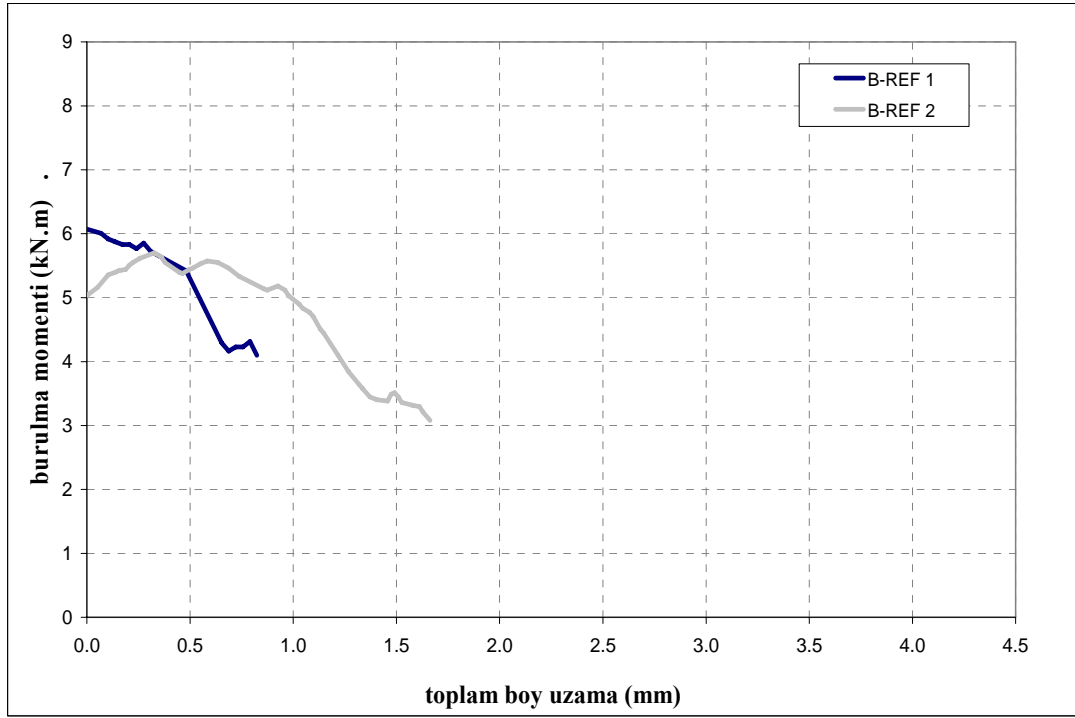
Şekil 5.15: A-N1G-L0, A-N2G-L0, A-N1G-L1G ve A-N2G-L1G numunelerine ait burulma momenti – toplam boy uzama grafiği



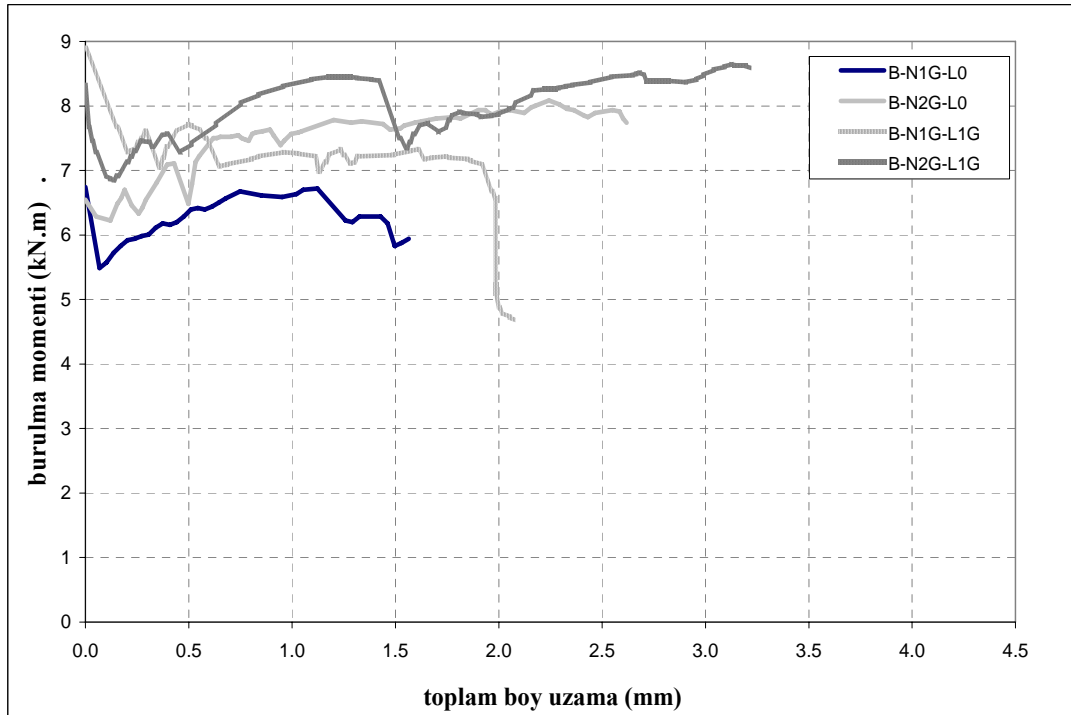
Şekil 5.16: A-N1CN-L0, A-N1CN-L1CN, A-N1CH-L0 ve A-N1CH-L1CH numunelerine ait burulma momenti – toplam boy uzama grafiği



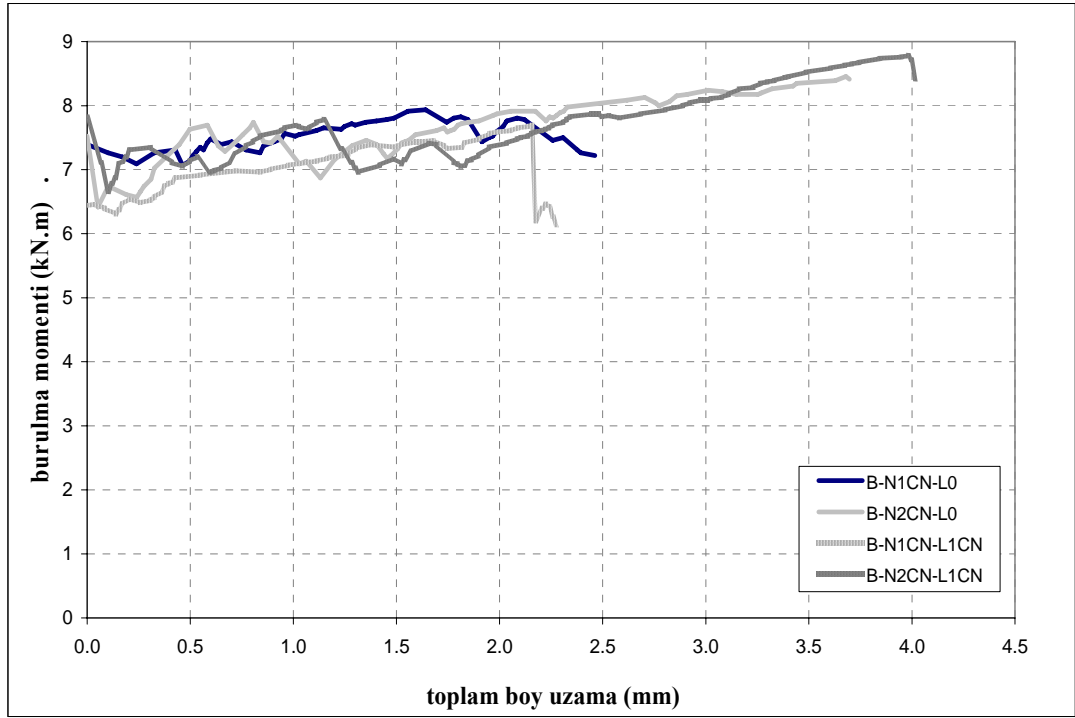
Şekil 5.17: A-N1G-L1CN ve A-N1G-L1CH numunelerine ait burulma momenti – toplam boy uzama grafiği



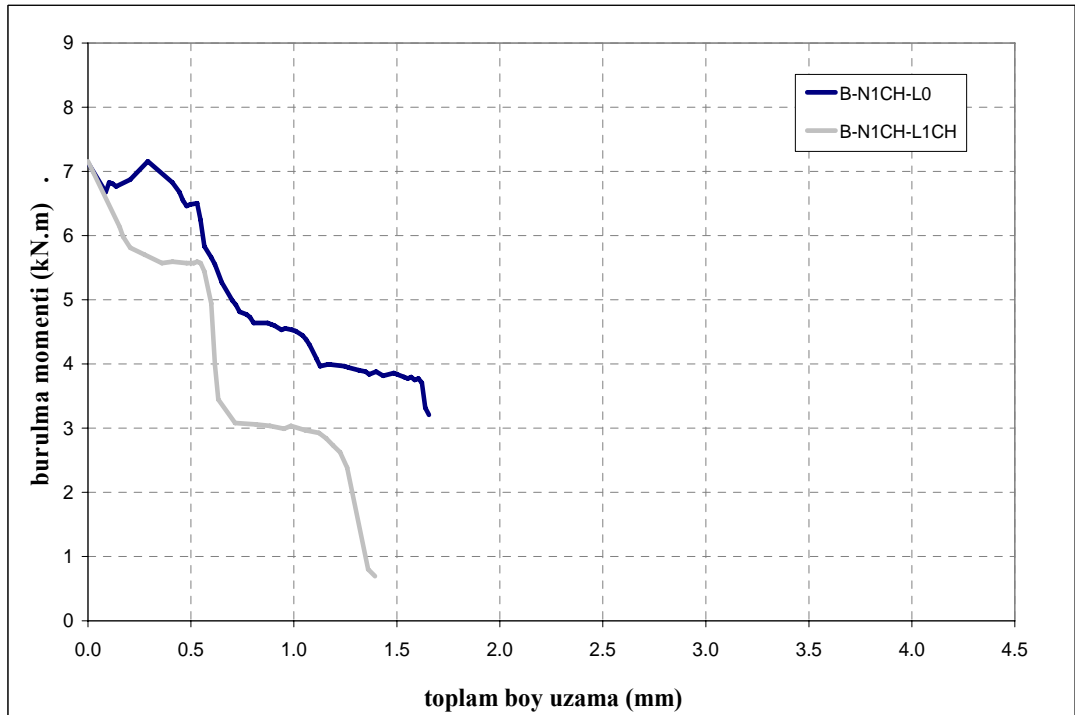
Şekil 5.18: B grubu numunelere ait 1. ve 2. karşılaştırma numunesinin burulma momenti – toplam boy uzama grafiği



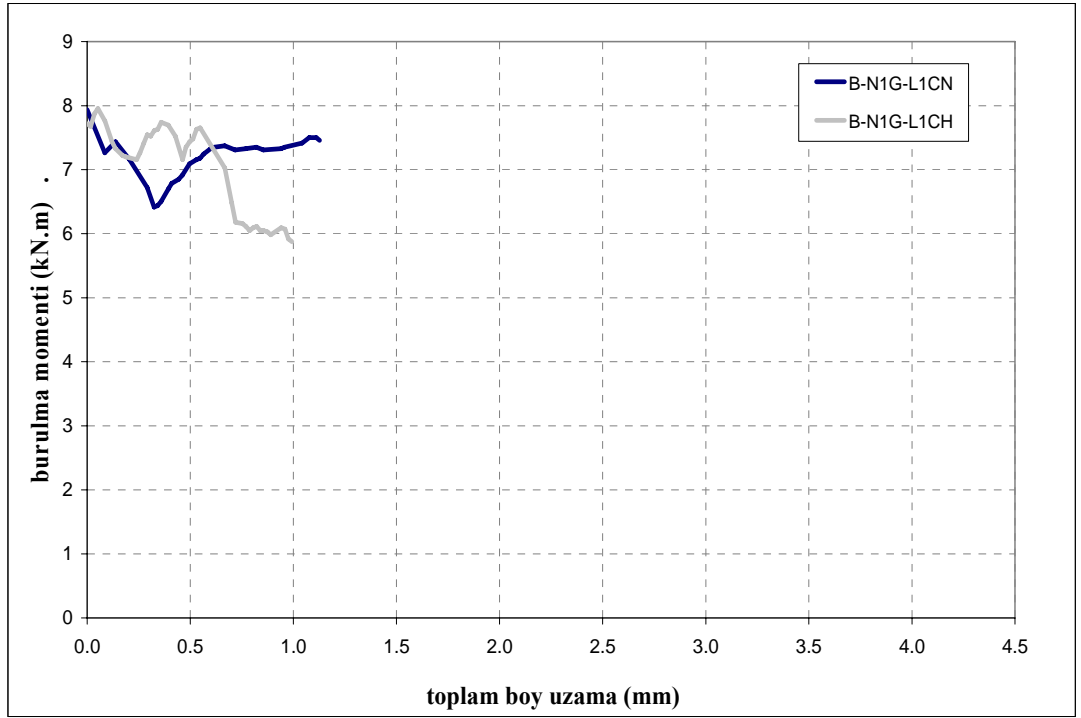
Şekil 5.19: B-N1G-L0, B-N2G-L0, B-N1G-L1G ve B-N2G-L1G numunelerine ait burulma momenti – toplam boy uzama grafiği



Şekil 5.20: B-N1CN-L0, B-N2CN-L0, B-N1CN-L1CN ve A-N2CN-L1CN numunelerine ait burulma momenti – toplam boy uzama grafiği



Şekil 5.21: B-N1CH-L0 ve B-N1CH-L1CH numunelerine ait burulma momenti – toplam boy uzama grafiği



Şekil 5.22: B-N1G-L1CN ve B-N1G-L1CH numunelerine ait burulma momenti – toplam boy uzama grafiği

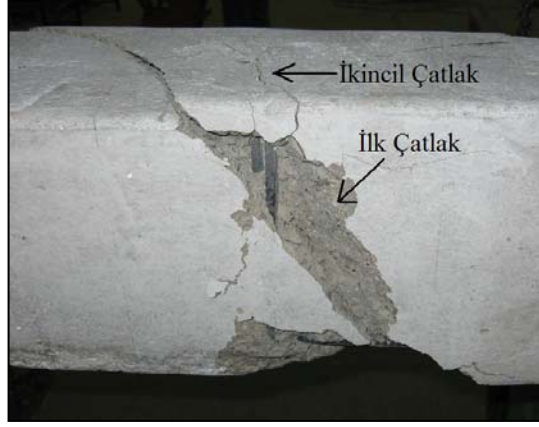
6. DENEY VERİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, Bölüm 5’te verilen deney verileri detaylı olarak incelenecek, elde edilen veriler üzerinde yorumlar yapılacak ve deney sırasında yapılan gözlemler anlatılacaktır. İlk olarak deney sırasında çekilen fotoğraflar ve yapılan gözlemlere dayanarak numunelerde gözlenen çatlak dağılımı üzerinde durulacak daha sonra ise hem A grubu numuneler hem de B grubu numuneler için ayrı ayrı burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri ile burulma momenti – toplam boy uzama grafikleri incelenecektir.

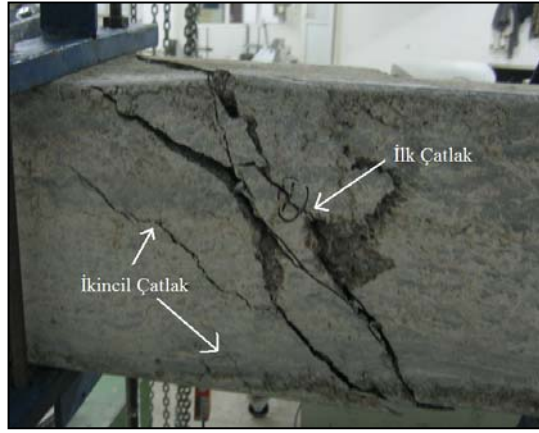
6.1. Çatlak Dağılımının Değerlendirilmesi

Basit burulma momenti etkisi altında kalan betonarme kiriş numuneleri üzerinde oluşan çatlak dağılımları deney süresi boyunca fotoğraflanarak gözlemlenmiştir. Çatlak dağılımlarının değerlendirilmesi için numuneler (A, $f_{ck} = 20$ MPa) normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı (B, $f_{ck} = 60$ MPa) betonarme kirişi olarak iki ayrı grupta incelenecektir. Normal dayanımlı (A grubu) ve yüksek dayanımlı (B grubu) betonarme kirişlerin ilk çatlak davranışları ele alınacak olursa her iki sınıfın çatlak oluşumlarının farklı olduğu söylenebilir. YDB kirişler de ilk çatlak daha ani olmakta ve ilk çatlak meydana geldikten sonra ise çatlak genişliği NDB kirişlere göre daha fazla olmaktadır. NDB ve YDB kirişlerin genel çatlak dağılımları hemen hemen benzerdir. Her iki beton basınç dayanımına sahip betonarme kirişlerde ilk çatlak oluşuktan sonra genel çatlak dağılımı ilk çatlağın etrafında oluşmaktadır. İlk çatlak burulma momenti arttıkça açılmakta ve sonra moment artışı nedeniyle ilk çatlağın etrafında ikincil çatlaklar oluşmaktadır. En büyük çatlak genişliği ilk çatlakta okunurken, ikincil çatlakların bir kısmı kılcal çatlak olarak kalmakta bir kısmı ise bazı durumlarda ilk çatlak genişliğine kadar yaklaşabilmektedir. Oluşan çatlaklar elastisite teorisine uygun olarak yaklaşık 45°’lik açıyla meydana gelmişlerdir. Şekil

6.1’de NDB, Şekil 6.2’de YDB sargısız kirişe ait birim dönme açısının 0,12 rad/m olduğu andaki çatlak dağılımları verilmiştir.



Şekil 6.1: NDB kiriş çatlak dağılımı



Şekil 6.2: YDB kiriş çatlak dağılımı

FRP ile sargısı ile güçlendirilen betonarme kirişlerin çatlak dağılımları, karşılaştırma numunesi olarak kullanılan sargısız numunelerden daha farklıdır. Enine sargılama yapılan tüm numunelerde çatlak sayısının sargısız numuneler göre arttığı gözlenmiştir. Enine sargılama, sargısız numunelerde meydana gelen çatlak dağılımının ilk çatlak üzerinde yoğunlaşması durumunu kiriş yüzeyinde oluşan gerilmeleri azaltarak ortadan kaldırmaktadır. Genel çatlak dağılımı, enine sargılama olan kirişlerde kiriş deney bölgesi boyunca düzgün bir dağılım gösteren çatlaklar üzerinde dağılmıştır. Uygulanmış olan FRP katmanları yapışmış oldukları kiriş yüzeyi üzerindeki çekme gerilmelerini karşılayamadıkları durumlarda koparak açılmışlardır. Çatlaklar kopma anından itibaren boşta kalan kiriş yüzeyi üzerinde daha fazla yoğunlaşmış ve bu durumun sonucu olarak bu bölgedeki çatlak genişliği

ani olarak artmıştır. Şekil 6.3'te A-N1CN-L0 numunesinin birim dönme açısı 0,10 rad/m olduğu andaki çatlak dağılımı gösterilmiştir. Şekil 6.3'ten de açıkça görüldüğü gibi enine sargılama yapılan normal elastisite modüllü karbon elyaf plakalarında kopma olmadığı sürece toplam hasar betonarme kiriş deney bölgesi boyunca dağılmaktadır. Enine sargılama ile birlikte uygulanan boyuna yapıştırmanın da çatlak dağılımı üzerinde benzer etki gösterdiği görülmüştür.



Şekil 6.3: A-N1CN-L0 numunesinin $\theta=0.10$ rad/m anındaki çatlak dağılımı

Enine sargımla ile birlikte uygulanan boyuna yapıştırmanın çatlak dağılımı üzerindeki etkisi incelendiği zaman FRP'lerde herhangi bir kopma meydana gelmediği sürece uygulanmış olan sadece enine sargılama ile benzer özellikler sergilemektedir. Hem enine sargılama hem de boyuna yapıştırmanın birlikte uygulandığı numunelerde de genel çatlak dağılımı tek bir çatlak üzerinde yoğunlaşmamakta deney bölgesi içerisinde dağılım göstermektedir. A-N1CN-L1CN numunesinin birim dönme açısı 0,10 rad/m olduğu andaki çatlak dağılımı Şekil 6.4'te gösterilmiştir.

Numunelerin çatlama sonrası davranışı incelendiği zaman sargısız numunelerde basınç ezilmeleri gözlenmiştir. Enine yapıştırma ve hem enine hem de boyuna yapıştırma yapılmış numuneler incelendiğinde ise yapıştırılan FRP tabakaları kopmadığı sürece numune yüzeylerinde basınç ezilmeleri gözlenmemiştir.



Şekil 6.4: A-N1CN-L1CN numunesinin $\Theta=0.10$ rad/m anındaki çatlak dağılımı

6.2. Burulma Momenti – Birim Dönme Açısı Grafiklerinin Değerlendirilmesi

Bölüm 5’te verilen tüm numunelere ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri bu bölümde normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişler için gruplandırılarak yapılmış olan enine sargılamamanın, enine sargılamada kullanılan katman sayısının ve boyuna yapıştırmanın burulma momenti kapasitesi üzerindeki etkisi değerlendirilecektir. Kullanılan farklı tipteki sargılama elemanları ayrı ayrı ele alınarak sargı tipinin burulma kapasitesi üzerindeki etkisi de ayrıca değerlendirilecektir.

6.2.1. NDB kirişlerde enine sargılamamanın etkisi

Normal dayanımlı betonarme kirişlerde yapılan basit burulma deneylerinden elde edilen sonuçlar, kullanılan güçlendirme malzemeleri göz önüne alınarak GFRP, CFRP-N ve CFRP-H olmak üzere gruplandırılıp bu malzemelerin enine sargılanması ile burulma davranışı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

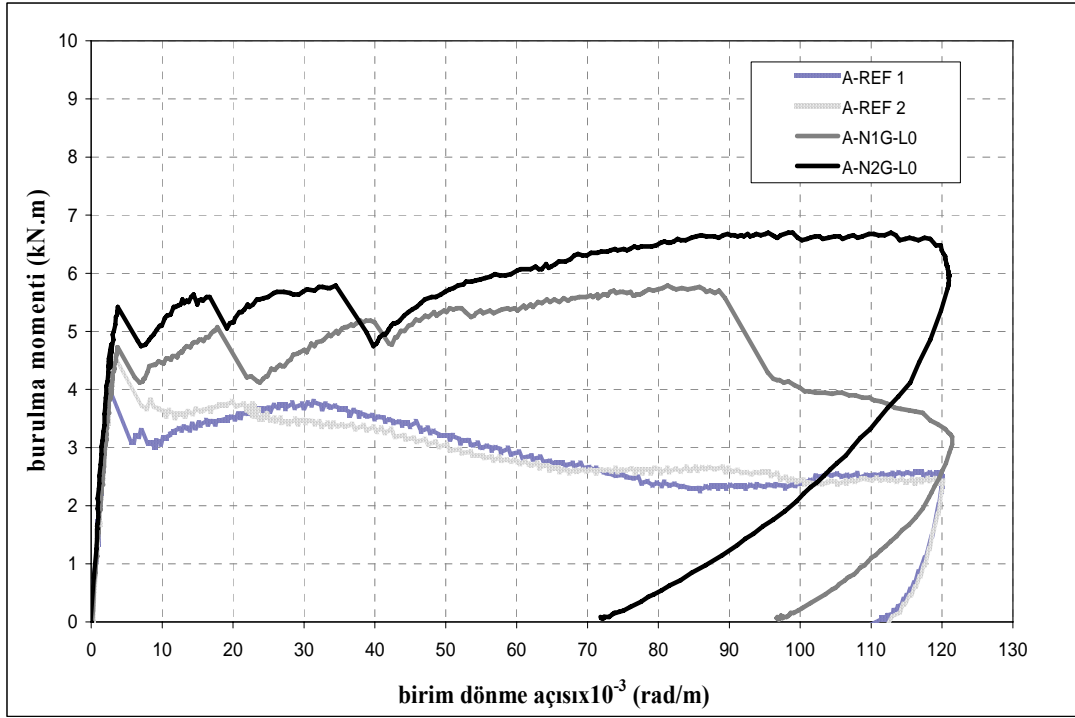
GFRP kullanılarak yapılan enine sargılama: Tablo 6.1’de cam elyaf kullanılarak enine sargılanan numunelere ait çatlama momenti, burulma momenti kapasitesi ve karşılaştırma numunesine göre yüzdesel artış oranları verilmiştir. Tablo 6.1’de kullanılan A-REF ORT değerleri A grubuna ait 2 adet karşılaştırma numunesi olan

A-REF 1 ve A-REF 2 numunelerine ait değerlerin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Şekil 6.5'te GFRP kullanılarak gulendirilen ve katman sayısı bir kat ve iki kat olarak değişen normal dayanımlı beton kullanılarak üretilmiş olan A-N1G-L0 ve A-N2G-L0 numunelerinin karşılaştırma numuneleri ile birlikte hazırlanmış olan burulma momenti – birim dönme açısı grafiği verilmiştir.

Tablo 6.1: A-REF ORT, A-N1G-L0 ve A-N2G-L0 Numunelerine Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları

Numune Adı	T_{cr} (kN.m)	T_{cr} Artış Oranı (%)	T_u (kN.m)	T_u Artış Oranı (%)
A-REF ORT	4,30	-	4,30	-
A-N1G-L0	4,72	9,8	5,79	34,7
A-N2G-L0	5,42	26,0	6,70	55,8

Tablo 6.1'de cam elyaf kullanılarak enine sargılama yapılan NDB kirişlere ait değerler incelendiği zaman, sargısız numunenin çatlama kapasitesinin kirişe ait toplam burulma kapasitesi olduğu görülmektedir. Eğer cam elyaf kullanılarak sargısız betonarme kirişe tek kat sargılama yapılırsa kirişe ait çatlama momenti değeri %9,8 oranında artmakta ve kirişin burulma kapasitesi sargısız kirişe göre %34,7 oranında artmaktadır. Cam elyaf kullanılarak sargısız betonarme kirişe iki kat sargılama yapılması durumunda kirişe ait çatlama momenti değeri sargısız kirişe göre %26 oranında, tek kat cam elyaf sargılı kirişe göre de %14,8 oranında artış göstermiştir. Aynı Şekilde iki kat cam elyaf sargılaması yapıldığı durumda kirişin burulma kapasitesi sargısız kirişe göre %55,8 oranında, tek kat sargılı kirişe göre de %15,7 oranında artış göstermektedir.



Şekil 6.5: A-REF 1, A-REF 2, A-N1G-L0 ve A-N2G-L0 numunelerinin burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri

Tek kat ve iki kat cam elyaf sargılı normal dayanımlı betonarme kirişlerin çatlama sonrası davranışları Şekil 6.5'ten açıkça görülmektedir. Sargılanmamış karşılaştırma numuneleri çatlama sonrasında yetersiz burulma donatısı nedeniyle hızlı bir kapasite kaybı göstermekte göçme moduna yaklaşarak ilk çatlak momenti değerinin üstüne çıkamamaktadırlar. A-N1G-L0 numunesine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafiği incelendiği zaman birim dönme açısının 0,003 ve 0,018 rad/m olduğu değerlerde numunede sırasıyla 1. çatlak ve 2. çatlak meydana geldiği görülmektedir. Ancak iki kat cam elyaf sargısı arasında meydana gelen çatlakların açılması sargılama nedeniyle engellendiği için kapasite çatlama sonrası artış göstermeye devam etmektedir. Birim dönme açısının 0,089 rad/m olduğu değerde, cam elyaf sargı üzerindeki gerilme nedeniyle kirişin köşesinden koptuğu için burulma kapasitesinde ani bir düşme gözlenmiştir. Eğer tek kat sargılanmış numunede sargı kopması meydana gelmesiydi tek kat sargı ile iki kat sargıya ait eğrilerin çatlama sonrası davranışları birbirine benzer olacaktı. A-N2G-L0 numunesinde basit burulma deneyi boyunca birim dönme açısının 0,003, 0,017 ve 0,035 rad/m olduğu değerlerde sırasıyla 1., 2. ve 3. çatlak meydana gelmiş ancak cam elyaflarda herhangi bir kopma gözlenmemiştir.

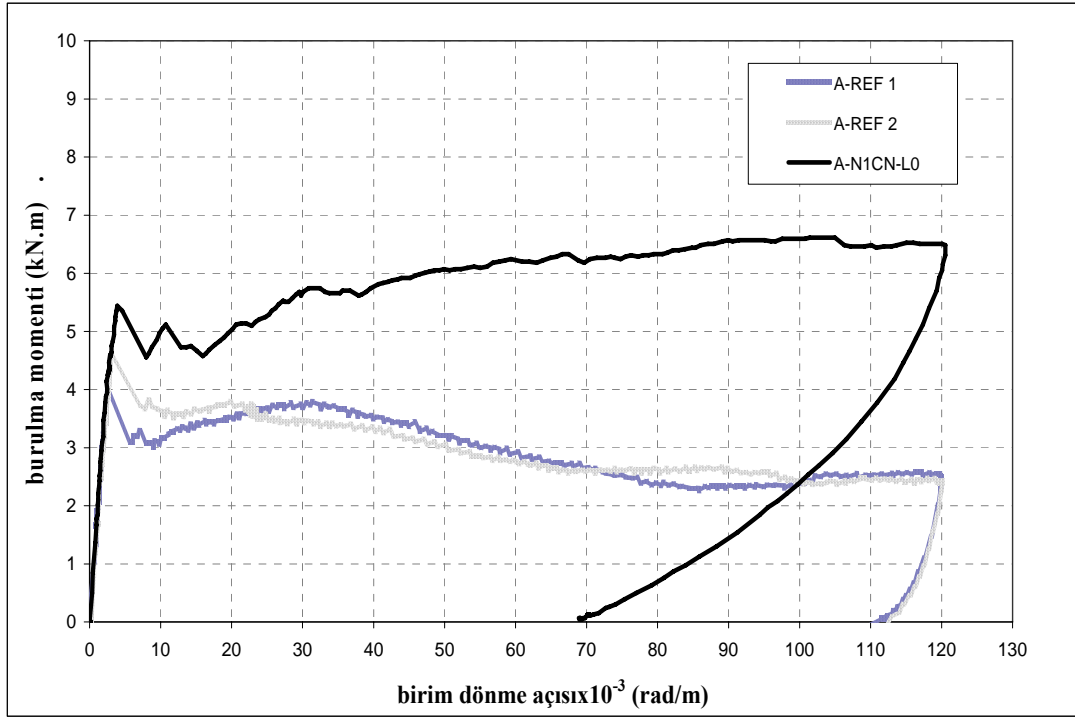
Deney süresince numunelerin üzerlerine uygulanmış olan yük, birim dönme açısı 0,12 rad/m'ye ulaştığında boşaltılmıştır. Bunun sonucunda sargılanmış kirişlerin elastik geri dönme deformasyonunun karşılaştırma numunelerine göre daha fazla olduğu gözlenmiştir. Karşılaştırma numuneleri yaklaşık %8,3 elastik geri dönme deformasyonu yaparken tek kat cam elyaf sargılı numune %19,0 iki kat cam elyaf sargılı numune %40,2 elastik geri dönme deformasyonu yapmaktadır. Yani yapılan sargılamanın katman sayısı arttıkça betonarme kirişin sünekliği ve yuttuğu enerji miktarı artmıştır.

CFRP-N kullanılarak yapılan enine sargılama: Tablo 6.2'de normal elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak enine sargılanan numunelere ait çatlama momenti, burulma momenti kapasitesi ve karşılaştırma numunesine göre yüzdesel artış oranları verilmiştir. Şekil 6.6'da CFRP-N kullanılarak güçlendirilen tek katman sayısına sahip normal dayanımlı beton kullanılarak üretilmiş olan A-N1CN-L0 numunesinin karşılaştırma numuneleri ile birlikte hazırlanmış olan burulma momenti – birim dönme açısı grafiği verilmiştir.

Tablo 6.2: A-REF ORT ve A-N1CN-L0 Numunelerine Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları

Numune Adı	T_{cr} (kN.m)	T_{cr} Artış Oranı (%)	T_u (kN.m)	T_u Artış Oranı (%)
A-REF ORT	4,30	-	4,30	-
A-N1CN-L0	5,44	26,5	6,61	53,7

Normal elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak sargısız betonarme kirişe tek kat sargılama yapılırsa kirişe ait çatlama momenti değeri %26,5 oranında artmakta ve kirişin burulma kapasitesi sargısız kirişe göre %53,7 oranında artmaktadır. Cam elyaf kullanılarak iki kat yapılan sargılamada elde edilen burulma momenti artışları ile normal elastisite modüllü karbon kullanılarak tek kat yapılan sargılamadan elde edilen burulma momenti artışlarının birbirlerine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Tek kat normal elastisite modüllü karbon elyaf sargılaması yapıldığı durumda kirişin çatlama momenti kapasitesi tek kat cam elyaf uygulanmış kirişe göre %15,3 oranında, burulma momenti kapasitesi de %14,2 oranında artış göstermektedir.



Şekil 6.6: A-REF 1, A-REF 2 ve A-N1CN-L0 numunelerinin burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri

Tek kat normal elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak sargılanan A-N1CN-L0 numunesinin burulma sonrası davranışı Şekil 6.6'da görülmektedir. Numunenin geniş yüzeyinde, birim dönme açısının 0,003 ve 0,011 rad/m değerlerinde sırasıyla 1. ve 2. çatlak oluşmuştur. Bu noktalarda kapasite düşüşü gözlenmiş ancak enine sargılama çatlak genişliğinin artmasını engelleyerek burulma sonrası davranışta burulma kapasitesinin artmasını sağlamıştır. Normal elastisite modüllü karbon elyaf tabakalarında burulma momenti etkisi altında herhangi bir kopma meydana gelmediği için çatlama sonrası davranışta ani kapasite düşüşü gözlenmemiştir.

A-N1CN-L0 numunesi üzerindeki yük boşaltıldığı zaman kirişe ait elastik geri dönme deformasyonu %42,6 dır. Bu numune üzerinde gözlemlenen elastik geri dönme deformasyonu tek kat sargılı ve iki kat cam elyaf sargılı numunelerde gözlemlenen elastik geri dönme deformasyonundan daha yüksek bir değerdedir. Tek kat uygulanan normal elastisite modüllü karbon elyaftan elde edilen burulma davranışı özellikleri tek kat uygulanan cam elyaf sargıdan daha üstün özellikler gösterdiği ve iki kat uygulanan cam elyaf sargıya yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

CFRP-H kullanılarak yapılan enine sargılama: Tablo 6.3’de yüksek elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak enine sargılanan numunelere ait çatlama momenti, burulma momenti kapasitesi ve karşılaştırma numunesine göre yüzdesel artış oranları verilmiştir. Tek kat yüksek elastisite modüllü karbon elyaf sargılı numuneye ait burulma sonrası davranış Şekil 6.8’den açıkça görülmektedir. CFRP-H enine sargıları çatlaklarla birlikte koparak açılmasından dolayı burulma sonrası davranışta burulma kapasitesinde herhangi bir artışa neden olamamışlardır.

Tablo 6.3: A-REF ORT ve A-N1CH-L0 Numunelerine Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları

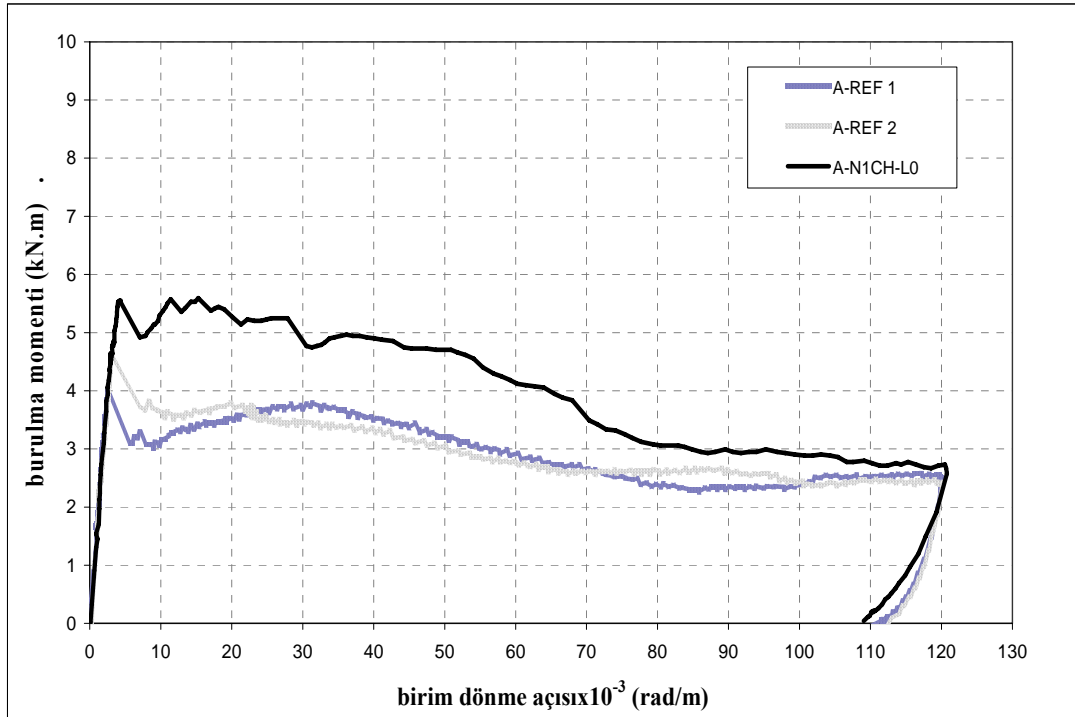
Numune Adı	T_{cr} (kN.m)	T_{cr} Artış Oranı (%)	T_u (kN.m)	T_u Artış Oranı (%)
A-REF ORT	4,30	-	4,30	-
A-N1CH-L0	5,55	29,1	5,59	30,0

Yüksek elastisite modüllü karbon elyaf (CFRP-H) kullanılarak tek kat sargılama yapıldığında kirişe ait çatlama momenti değeri %29,1 oranında artmakta ve kirişin burulma kapasitesi sargısız kirişe oranla %30,0 oranında artmaktadır. Bu numunede normal elastisite modüllü karbon elyaf sargılı numunelere göre ilk çatlama momentinde artış gözlenmesine rağmen çatlama sonrası davranışta istenilen düzeyde burulma kapasitesi artışı gözlenmemiştir. Yüksek elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak sargılanan numunede karşılaştırma numunelerine benzer davranış gözlenmiştir. Tek kat CFRP-H sargılanmış numunenin çatlama momenti ve burulma kapasitesi hemen hemen yakın sonuçlar vermektedir. Yüksek elastisite modüllü karbon, kullanılan diğer güçlendirme malzemelerine oranla daha gevrek ve daha kırılğan bir özellik göstermektedir. Basit burulma momenti etkisinde kalan betonarme kiriş yüzeyinde oluşan asal çekme gerilmelerine maruz kalan yüksek elastisite modüllü karbon elyaf şeritleri beklenen dayanımı göstermeyip kopmaktadırlar. Kiriş yüzeyinde oluşan çatlaklar CFRP-H sargılarının altından geçtiğinde çatlak formuna uygun şekilde karbon sargılarda da kopma ve çatlakların açılmasıyla birlikte sargılarda da aynı oranda açılma gözlenmiştir. Bu davranışın bir sonucu olarak da yüksek elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak tek kat

sargılanmış betonarme kirişin burulma davranışı sargısız karşılaştırma numunelerine yakın bir davranış sergilemiştir. Yüksek elastisite modüllü karbon elyafın altından geçen çatlakla birlikte kopması ve açılması durumu Şekil 6.7’de açıkça görülmektedir.



Şekil 6.7: Yüksek elastisite modüllü karbon elyafın çatlakla birlikte açılması durumu

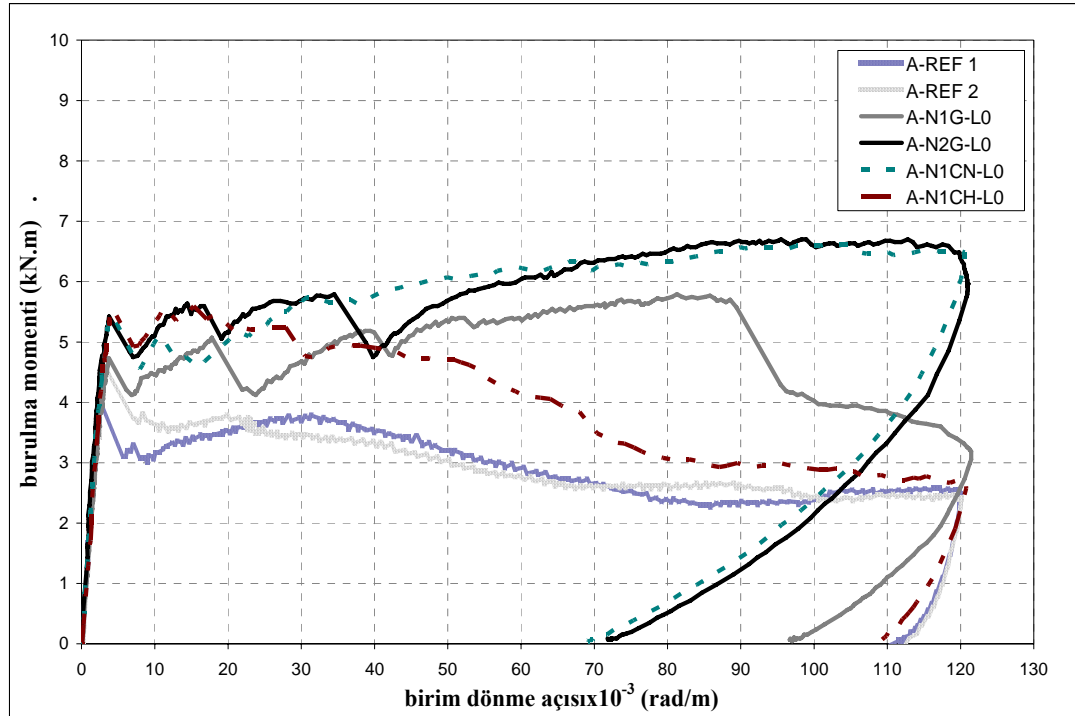


Şekil 6.8: A-REF 1, A-REF 2 ve A-N1CH-L0 numunelerinin burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri

Şekil 6.8’de CFRP-H kullanılarak güçlendirilen tek katman sayısına sahip normal dayanımlı beton kullanılarak üretilmiş olan A-N1CH-L0 numunesinin karşılaştırma numuneleri ile birlikte hazırlanmış olan burulma momenti – birim dönme açısı grafiği verilmiştir.

Şekil 6.9’da normal dayanımlı betonarme kirişlerde yapılan enine güçlendirme sonucunda elde edilen tüm burulma momenti – birim dönme açısı eğrileri karşılaştırma numunelerine ait eğrilerle birlikte verilmiştir. Tüm numunelere ait grafikler incelendiği zaman enine sargılama yapılarak güçlendirilen normal dayanımlı kirişlerin çatlama ve burulma dayanımlarında artış elde edildiği gözlenmiştir. Cam elyaf ve normal elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak yapılan enine güçlendirme sonucunda istenilen seviyelerde kapasite artışı elde edilmiştir. Buna karşın yüksek elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak yapılan enine güçlendirme kirişin burulma davranışında beklenen seviyelerde yükselmeler gerçekleştirilmemiştir. Ancak yüksek elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak güçlendirilen numunenin çatlama momentinde karşılaştırma numunesinin çatlama momentine oranla en yüksek artış gözlenmiştir.

Normal dayanımlı betonarme kirişlerde uygulanan enine sargılama sonucunda çatlama momentinde maksimum %29,1 oranında, burulma momenti kapasitesinde de maksimum %55,8 oranında artış elde edilmiştir.



Şekil 6.9: Enine sargılanmış normal dayanımlı betonarme kirişlere ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri

6.2.2. YDB kirişlerde enine sargılamamın etkisi

Yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde yapılan basit burulma deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılan güçlendirme malzemeleri göz önüne alınarak GFRP, CFRP-N ve CFRP-H olmak üzere gruplandırılıp bu malzemelerin enine sargılanması ile burulma davranışı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

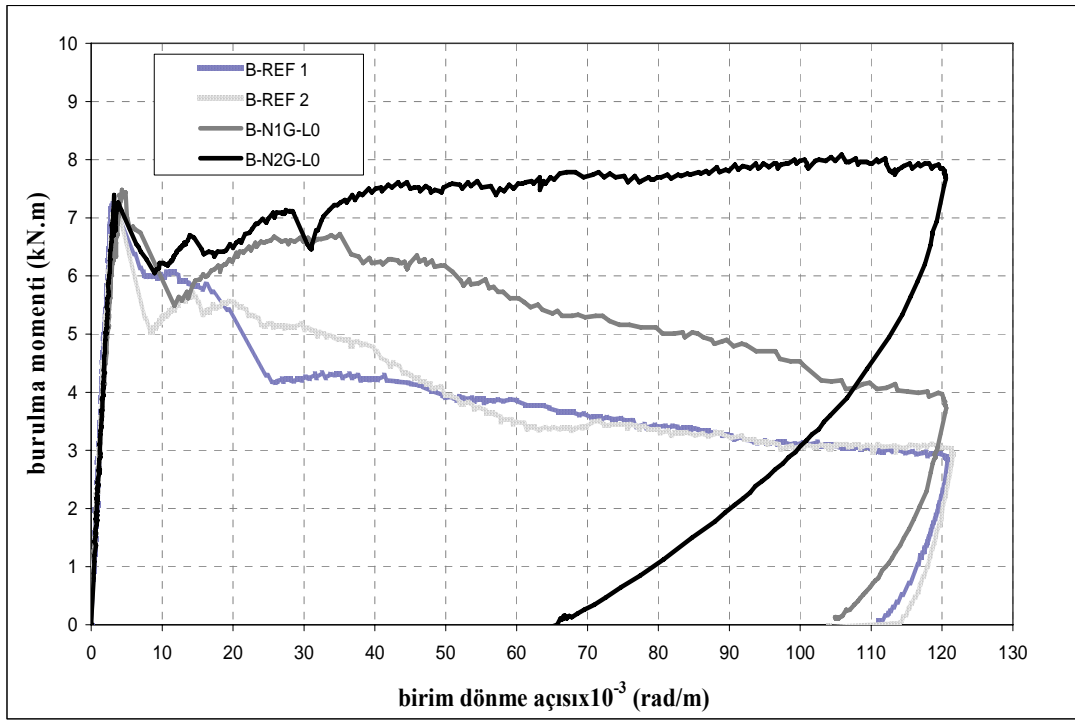
GFRP kullanılarak yapılan enine sargılama: Tablo 6.4'de cam elyaf kullanılarak enine sargılanan numunelere ait çatlama momenti, burulma momenti kapasitesi ve karşılaştırma numunesine göre yüzdesel artış oranları verilmiştir. Tablo 6.4'de kullanılan B-REF ORT değerleri B grubuna ait 2 adet karşılaştırma numunesi olan B-REF 1 ve B-REF 2 numunelerine ait değerlerin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Şekil 6.10'da GFRP kullanılarak güçlendirilen ve katman sayısı bir kat ve iki kat olarak değişen yüksek dayanımlı beton kullanılarak üretilmiş olan B-N1G-L0 ve B-N2G-L0 numunelerinin karşılaştırma numuneleri ile birlikte hazırlanmış olan burulma momenti – birim dönme açısı grafiği verilmiştir.

Tablo 6.4: B-REF ORT, B-N1G-L0 ve B-N2G-L0 Numunelerine Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları

Numune Adı	T_{cr} (kN.m)	T_{cr} Artış Oranı (%)	T_u (kN.m)	T_u Artış Oranı (%)
B-REF ORT	7,29	-	7,29	-
B-N1G-L0	7,48	2,60	7,48	2,60
B-N2G-L0	7,39	1,37	8,09	10,97

Cam elyaf kullanılarak sargısız betonarme kirişe tek kat sargılama yapıldığında kirişe ait çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesi %2,60 oranında artmaktadır. Tek kat cam elyaf sargılanarak güçlendirilen numunede ilk çatlak oluştuğundan sonra FRP şeritlerinde meydana gelen kopma ve açılmalar nedeniyle çatlama momenti değerinden sonra kapasite artışı gözlenmemiştir ve çatlama momenti ile burulma momenti değerleri birbirlerine eşit olmuştur. İki kat cam elyaf kullanılarak sargılama yapıldığı zaman çatlama momenti değeri %1,37 oranında, burulma momenti kapasitesi %10,97 oranında artmaktadır. Tek ve iki kat cam elyaf kullanılarak sargılanan yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde ilk çatlama momentlerinde küçük artışlar meydana gelmiştir.

Sargısız numunelere ait ortalama elastik geri dönme deformasyonu %6'dır. Tek cam elyaf sargılanmış numuneye ait elastik geri dönme deformasyonu %12,53, iki kat cam elyaf sargılı numuneye ait elastik geri dönme deformasyonu %45,23 olmaktadır. Şekil 6.10'da görüldüğü gibi iki kat cam elyaf sargılı numunenin çatlama sonrası davranışı tek kat cam elyaf sargılı numuneye göre daha sünektir ve yuttuğu enerji miktarı daha fazladır.



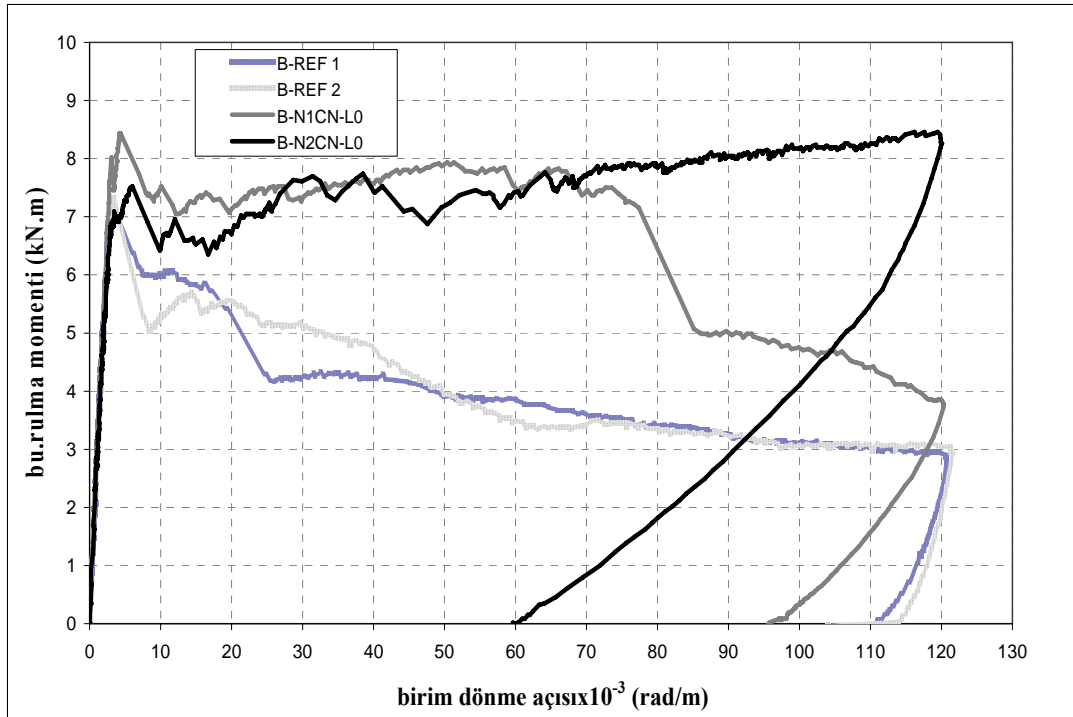
Şekil 6.10: B-REF 1, B-REF 2, B-N1G-L0 VE B-N2G-L0 numunelerinin burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri

CFRP-N kullanılarak yapılan enine sargılama: Tablo 6.5'de normal elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak enine sargılanan numunelere ait çatlama momenti, burulma momenti kapasitesi ve karşılaştırma numunesine göre yüzdesel artış oranları verilmiştir. Şekil 6.11'de CFRP-N kullanılarak güçlendirilen tek ve iki katman sayısına sahip yüksek dayanımlı beton kullanılarak üretilmiş olan B-N1CN-L0 ve B-N2CN-L0 numunesinin karşılaştırma numuneleri ile birlikte hazırlanmış olan burulma momenti – birim dönme açısı grafiği verilmiştir.

Tablo 6.5: B-REF ORT, B-N1CN-L0 ve B-N2CN-L0 Numunelerine Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesele Artışları

Numune Adı	T_{cr} (kN.m)	T_{cr} Artış Oranı (%)	T_u (kN.m)	T_u Artış Oranı (%)
B-REF ORT	7,29	-	7,29	-
B-N1CN-L0	8,02	10,01	8,43	15,64
B-N2CN-L0	7,52	3,16	8,46	16,05

CFRP-N kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişle ait çatlama momenti değeri tek kat sargılama yapılırsa %10,01 iki kat sargılama yapılırsa %3,16 oranında artmakta ve burulma momenti kapasitesi değeri tek kat sargılama yapılırsa %15,64 iki kat sargılama yapılırsa %16,05 oranında artmaktadır. Tek ve iki kat cam elyaf sargısı ile tek ve iki kat CFRP-N sargılamadan elde edilen çatlama momenti değerleri birbirlerine yakın sonuçlar vermekte birlikte, CFRP-N sargılama ile elde edilen burulma momenti kapasite artış oranları daha yüksek sonuçlar vermiştir.



Şekil 6.11: B-REF 1, B-REF 2, B-N1CN-L0 ve B-N2CN-L0 numunelerinin burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri

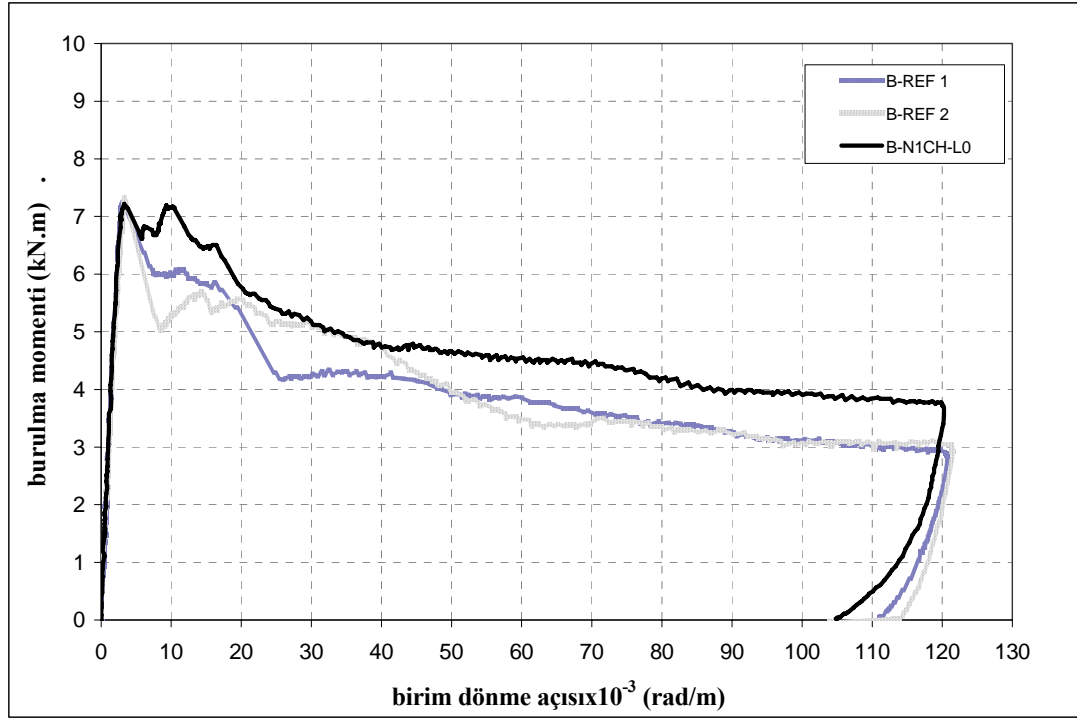
Tek ve iki kat CFRP-N kullanılarak sargılanan B-N1CN-L0 ve B-N2CN-L0 numunelerinin burulma sonrası davranışı Şekil 6.11’de görülmektedir. Her iki numunenin de burulma sonrası davranışları birbirlerine yakındır. Tek kat sargılanmış olan numune birim dönme açısı 0,077 rad/m değerine ulaştığı anda FRP şeritlerinin bazılarında meydana gelen kopmalar nedeniyle kapasitede ani bir düşüş meydana gelmiştir. Bu nedenle iki kat CFRP-N sargılı deney numunesine ait elastik geri dönme deformasyonu %50,31 tek kat sargılı deney numunesine ait elastik geri dönme deformasyonu %20,18 dir.

CFRP-H kullanılarak yapılan enine sargılama: Tablo 6.6’da yüksek elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak enine sargılanan numunelere ait çatlama momenti, burulma momenti kapasitesi ve karşılaştırma numunesine göre yüzdesel artış oranları verilmiştir. Şekil 6.12’de CFRP-H kullanılarak güçlendirilen tek katman sayısına sahip yüksek dayanımlı beton kullanılarak üretilmiş olan B-N1CH-L0 numunesinin karşılaştırma numuneleri ile birlikte hazırlanmış olan burulma momenti – birim dönme açısı grafiği verilmiştir.

Tablo 6.6: B-REF ORT ve B-N1CH-L0 Numunelerine Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları

Numune Adı	T_{cr} (kN.m)	T_{cr} Artış Oranı (%)	T_u (kN.m)	T_u Artış Oranı (%)
B-REF ORT	7,29	-	7,29	-
B-N1CH-L0	7,22	-	7,22	-

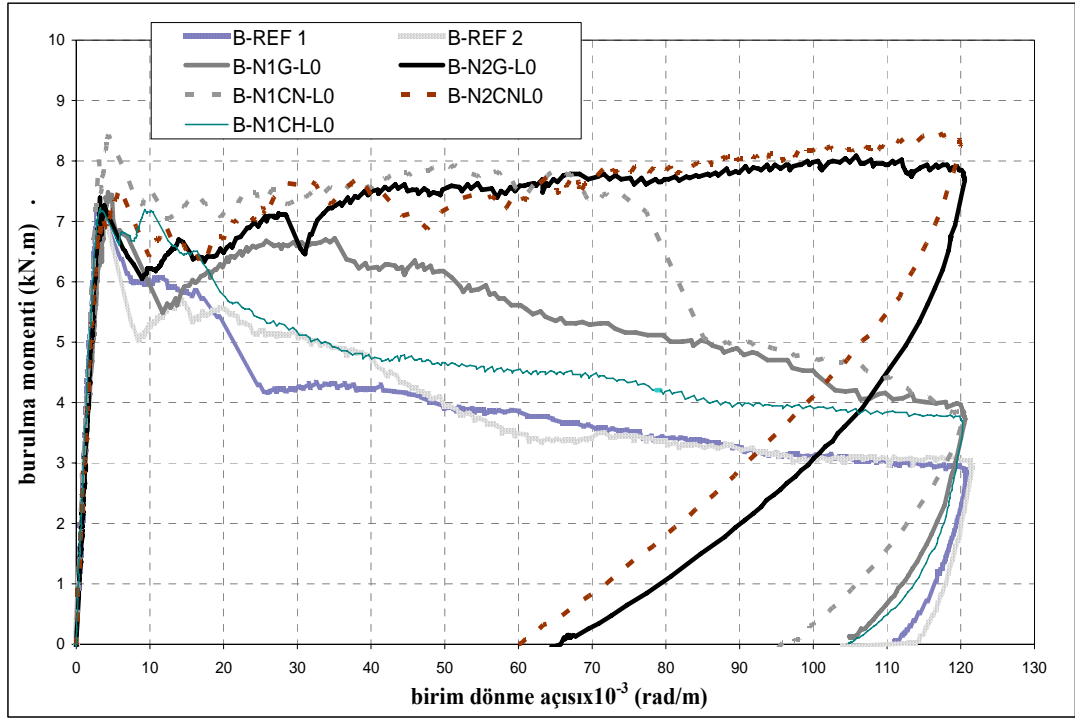
Yüksek elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak güçlendirilen numuneye ait çatlama momenti değerleri ve burulma momenti değerleri karşılaştırma numunesine oranla herhangi bir artış göstermemiştir. İlk çatlak oluştuğundan sonra FRP şeritlerinde meydana gelen kopmalar çatlama sonrası davranışta burulma momenti kapasitesinde artışa neden olamamıştır.



Şekil 6.12: B-REF 1, B-REF 2 ve B-N1CH-L0 numunelerinin burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri

Şekil 6.13'de yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde yapılan enine güçlendirme sonucunda elde edilen tüm burulma momenti – birim dönme açısı eğrileri karşılaştırma numunelerine ait eğrilerle birlikte verilmiştir. Tüm numunelere ait grafikler incelendiği zaman enine sargılama yapılarak güçlendirilen yüksek dayanımlı kirişlerin çatlama dayanımlarında küçük miktarlarda artış elde edildiği ancak bu kirişlerin enine sargılama sonucunda burulma kapasitelerinde önemli artış elde edildiği gözlenmiştir. Cam elyaf ve CFRP-N kullanılarak yapılan enine güçlendirme sonucunda istenilen seviyelerde kapasite artışı elde edilmiştir. Yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde yüksek elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak yapılan güçlendirme sonucunda çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesinde artış elde edilememiştir.

Yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde uygulanan enine sargılama sonucunda çatlama momentinde maksimum %10,01 oranında, burulma kapasitesi momentinde maksimum %16,05 oranında artış elde edilmiştir.



Şekil 6.13: Enine sargılanmış yüksek dayanımlı betonarme kirişlere ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri

6.2.3. NDB kirişlerde boyuna yapıştırmanın etkisi

Normal dayanımlı betonarme kirişlerde tek kat enine sargılama yanında A-N1G-L1G, A-N2G-L1G, A-N1CN-L1CN ve A-N1CH-L1CH numunelerinde hem enine sargılama hem de boyuna yapıştırma uygulanmıştır. Yapılan bu güçlendirme sonucunda elde edilen grafikler kullanılan malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak GFRP, CFRP-N ve CFRP-H olmak üzere üç grupta ele alınmıştır.

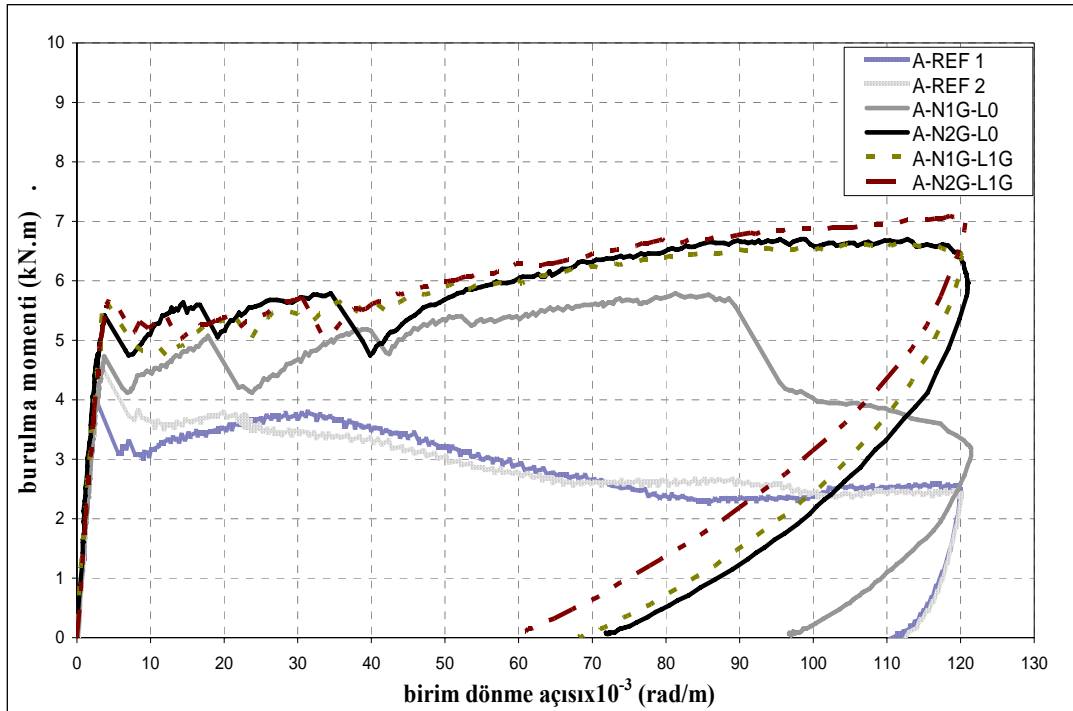
GFRP kullanılarak yapılan boyuna yapıştırma: Tablo 6.7’de cam elyaf kullanılarak enine ve boyuna yapıştırma yapılan numunelere ait çatlama momenti, burulma momenti kapasitesi ve aynı numunenin sadece enine sargılanan numunesine göre yüzdesel artış oranları verilmiştir. Tablo 6.7 içerisinde karşılaştırma numunelerine ait burulma momenti kapasitesi ve çatlama momenti değerlerinin ortalamasını temsil eden A-REF ORT değerleri hatırlatma olarak verilmiştir. Tablo 6.7’de enine sargılama yapılmış olan numunede ilave olarak boyuna yapıştırma yapılması durumunda elde edilen moment artışlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla tabloda yer alan yüzde artış değerleri her boyuna yapıştırma yapılmış numunenin sadece enine sargılanmış olan numunesinden elde edilen moment değerlerine karşılık

sahip olduğu moment değerlerindeki artışı göstermektedir. Şekil 6.14’de GFRP kullanılarak enine ve boyuna güçlendirilen numunelerin karşılaştırma numuneleri ile birlikte hazırlanmış olan burulma momenti – birim dönme açısı grafiği verilmiştir.

Tablo 6.7: Cam Elyaf Kullanılarak Enine ve Boyuna Güçlendirilen Numunelere Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları

Numune Adı	T_{cr} (kN.m)	T_{cr} Artış Oranı (%)	T_u (kN.m)	T_u Artış Oranı (%)
A-REF ORT	4,30		4,30	
A-N1G-L0	4,72	-	5,79	-
A-N1G-L1G	5,70	20,76	6,66	15,03
A-N2G-L0	5,42	-	6,70	-
A-N2G-L1G	5,70	5,17	7,11	6,12

Cam elyaf kullanılarak tek kat enine sargılanan numuneye ilave olarak tek kat boyuna yapıştırma yapıldığı zaman çatlama momenti %20,76 oranında, burulma momenti kapasitesi %15,03 oranında artmaktadır. İki kat enine sargılanan numuneye tek kat boyuna yapıştırma yapıldığı zaman çatlama momenti %5,17 oranında, burulma momenti kapasitesi %6,12 oranında artmaktadır.



Şekil 6.14: A-REF 1, A-REF 2, A-N1G-L0, A-N1G-L1G, A-N2G-L0 ve A-N2G-L1G numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri

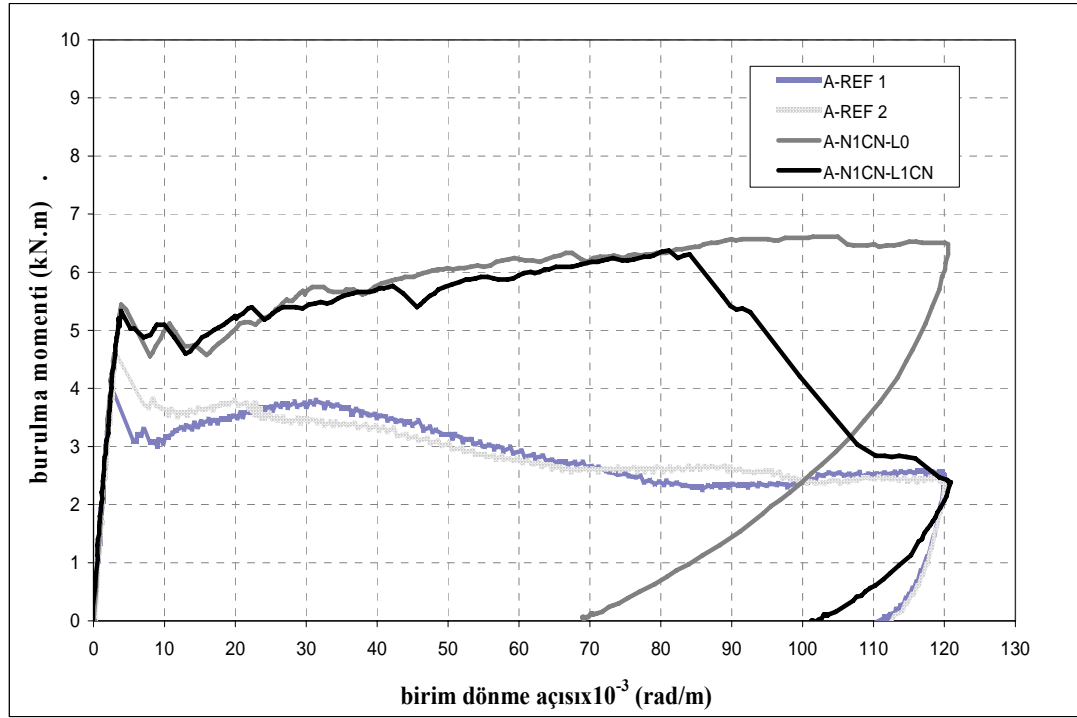
Şekil 6.14 incelendiği zaman boyuna yapıştırma enine sargılamanın etkin olmadığı durumlarda (yapıştırma aralığının büyük olması, kat sayısının yetersiz olması, şerit genişliğinin küçük olması vb.) numunenin kapasitesi üzerinde aktif rol oynayıp kapasite miktarlarında artışa neden olmaktadır. Ancak enine sargılamanın etkin olduğu durumda kapasiteye etkisi küçük miktarlardadır. Boyuna yapıştırma yapılan numunelerin diğer numunelere oranla daha sünek bir davranış sergilediği görülmektedir. Tek kat enine ve boyuna yapıştırma yapılan numuneye ait elastik geri dönme deformasyonu miktarı, sadece tek kat enine sargılanmış numuneye göre %26,52 oranında artmakta iken iki kat enine ve tek kat boyuna yapıştırma yapılan numuneye ait elastik geri dönme deformasyonu miktarı sadece iki kat enine sargılanmış numuneye göre %16,85 oranında artmaktadır.

CFRP-N kullanılarak yapılan boyuna yapıştırma: Tablo 6.8’de normal elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak enine ve boyuna yapıştırma yapılan numunelere ait çatlama momenti, burulma momenti kapasitesi ve aynı numunenin sadece enine sargılanan numunesine göre yüzdesel artış oranları verilmiştir. Tablo 6.8 içerisinde karşılaştırma numunelerine ait burulma momenti kapasitesi ve çatlama momenti değerlerinin ortalamasını temsil eden A-REF ORT değerleri hatırlatma olarak verilmiştir. Tablo 6.8’de enine sargılama yapılmış olan numunede ilave olarak boyuna yapıştırma yapılması durumunda elde edilen moment artışlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla tabloda yer alan yüzde artış değerleri her boyuna yapıştırma yapılmış numunenin sadece enine sargılanmış olan numunesinden elde edilen moment değerlerine karşılık sahip olduğu moment değerlerindeki artışı göstermektedir. Şekil 6.15’de CFRP-N kullanılarak enine ve boyuna güçlendirilen numunelerin karşılaştırma numuneleri ile birlikte hazırlanmış olan burulma momenti – birim dönme açısı grafiği verilmiştir.

Tablo 6.8: Normal Elastisite Modüllü Karbon Elyaf Kullanılarak Enine ve Boyuna Güçlendirilen Numunelere Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları

Numune Adı	T_{cr} (kN.m)	T_{cr} Artış Oranı (%)	T_u (kN.m)	T_u Artış Oranı (%)
A-REF ORT	4,30		4,30	
A-N1CN-L0	5,44	-	6,61	-
A-N1CN-L1CN	5,33	-	6,37	-

Tek kat normal elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak yapılan hem enine hem de boyuna yapıştırma, sadece tek kat normal elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak yapılan enine sargılama sonucunda elde edilen değerlerde herhangi bir artışa neden olamamıştır. Ancak Şekil 6.15'teki grafik incelendiği zaman her iki numunenin de burulma davranışlarının birbirlerine çok yakın olduğu görülmektedir. A-N1CN-L1CN numunesine ait eğri incelendiği zaman birim dönme açısının 0,0084 ve 0,0092 rad/m olduğu anlarda yapıştırılan FRP şeritlerinde meydana gelen kopmalar ve açılmalar sonucunda kapasitede düşüş olduğu görülmektedir. Boyuna yapıştırma yapılan numuneye ait elastik birim deformasyonda enine sargıda kopma meydana gelmemesinin de etkisiyle artış gözlenmiştir.



Şekil 6.15: A-REF 1, A-REF 2, A-N1CN-L0 ve A-N1CN-L1CN numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri

CFRP-H kullanılarak yapılan boyuna yapıştırma: Tablo 6.9'da yüksek elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak enine ve boyuna yapıştırma yapılan numunelere ait çatlama momenti, burulma momenti kapasitesi ve aynı numunenin sadece enine sargılanan numunesine göre yüzdesel artış oranları verilmiştir. Tablo 6.9 içerisinde karşılaştırma numunelerine ait burulma momenti kapasitesi ve çatlama momenti

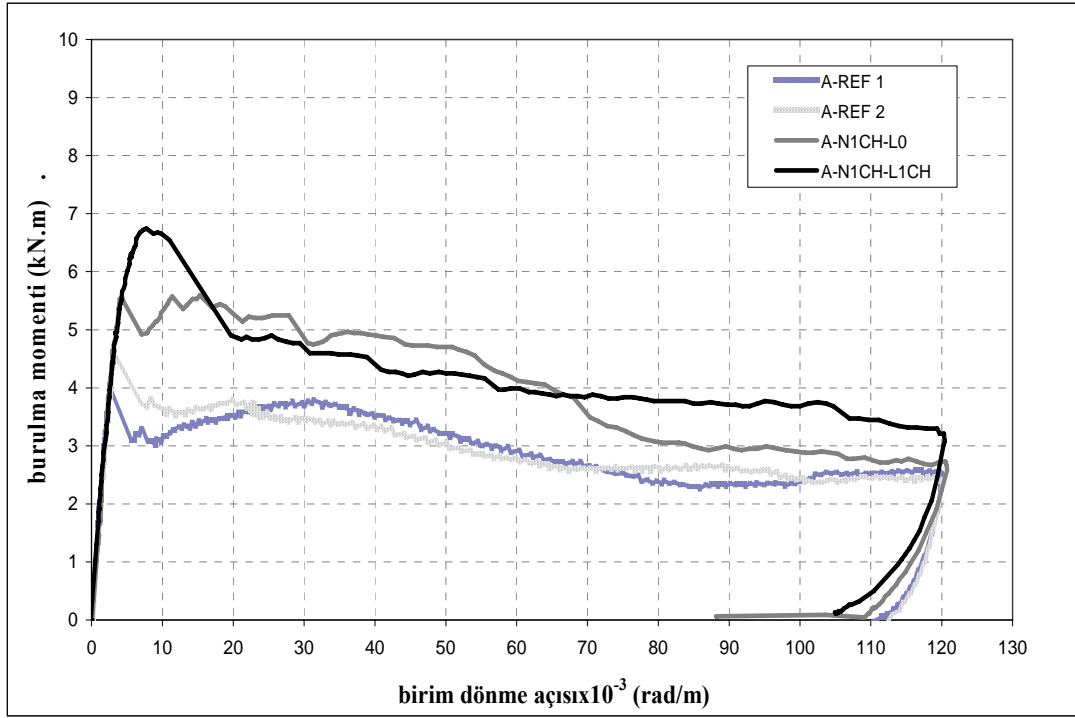
değerlerinin ortalamasını temsil eden A-REF ORT değerleri hatırlatma olarak verilmiştir. Tablo 6.9’da enine sargılama yapılmış olan numunede ilave olarak boyuna yapıştırma yapılması durumunda elde edilen moment artışlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla tabloda yer alan yüzde artış değerleri her boyuna yapıştırma yapılmış numunenin sadece enine sargılanmış olan numunesinden elde edilen moment değerlerine karşılık sahip olduğu moment değerlerindeki artışı göstermektedir. Şekil 6.16’da CFRP-H kullanılarak enine ve boyuna güçlendirilen numunelerin karşılaştırma numuneleri ile birlikte hazırlanmış olan burulma momenti – birim dönme açısı grafiği verilmiştir.

Tablo 6.9: Yüksek Elastisite Modüllü Karbon Elyaf Kullanılarak Enine ve Boyuna Güçlendirilen Numunelere Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları

Numune Adı	T_{cr} (kN.m)	T_{cr} Artış Oranı (%)	T_u (kN.m)	T_u Artış Oranı (%)
A-REF ORT	4,30		4,30	
A-N1CH-L0	5,55	-	5,59	-
A-N1CH-L1CH	6,74	21,44	6,74	20,57

CFRP-H kullanılarak tek kat enine sargılanan numuneye ilave olarak tek kat boyuna yapıştırma yapıldığı zaman çatlama momenti %21,44 oranında, burulma momenti kapasitesi %20,57 oranında artmaktadır.

Şekil 6.16 incelendiği zaman; tek kat yüksek elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak yapılan sargılamada enine sargının etkin olmadığı ve bu durumda boyuna yapıştırmanın etkin olup numuneye ait çatlama momenti değerini arttırdığı görülmektedir. Boyuna yapıştırma yapılmış numunenin burulma kapasitesindeki artışın nedeni çatlama momenti değerinin yüksek olmasıdır. Bu numuneye ait kapasite eğrisi incelendiği zaman burulma sonrası davranışta kapasitede hızlı düşüşler meydana geldiği görülmektedir.



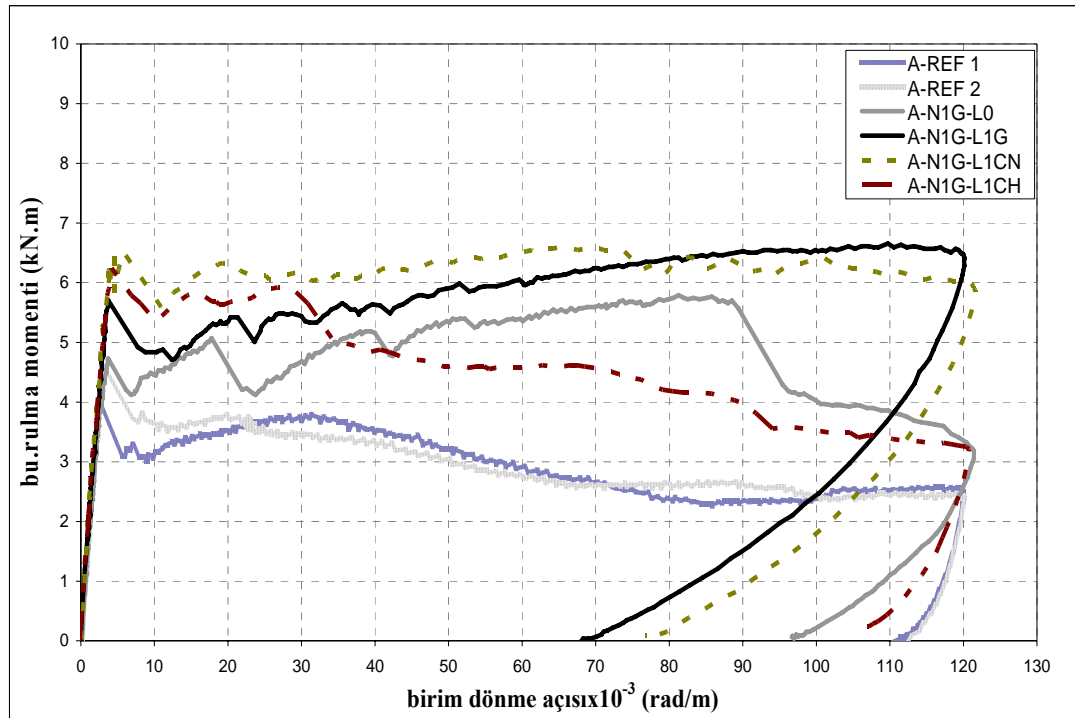
Şekil 6.16: A-REF 1, A-REF 2, A-N1CH-L0 ve A-N1CH-L1CH numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri

Kullanılan boyuna yapıştırma tipinin burulmaya etkisi: Deneysel çalışma kapsamında 3 farklı sargı tipi kullanılarak betonarme kirişlerin güçlendirilmesi yapılmıştır. A-N1G-L1G, A-N1G-L1CN ve A-N1G-L1CH numunelerin sırasıyla cam elyaf, normal elastisite modüllü karbon elyaf ve yüksek elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak boyuna yapıştırmaları yapılmıştır. Daha sonra üç farklı sargı tipine sahip üç numunede boy yapıştırmanın üzerine tek kat cam elyaf kullanılarak enine olarak sargılanmıştır. Bu numuneler sargı tipinin burulma davranışı üzerindeki etkisini görebilmek amacıyla hazırlanmıştır. Tablo 6.10'da bu üç numuneye ait çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesi değerleriyle birlikte sadece tek kat cam elyaf kullanılarak enine olarak sargılanan numunenin (A-N1G-L0) çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesi değerlerine oranla yüzdesel artış miktarları verilmiştir. Tablo 6.10 içerisinde karşılaştırma numunelerine ait burulma momenti kapasitesi ve çatlama momenti değerlerinin ortalamasını temsil eden A-REF ORT değerleri hatırlatma olarak verilmiştir. Şekil 6.17'de Tablo 6.10 içerisindeki numunelere ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri verilmiştir.

Tablo 6.10: A-N1G-L0, A-N1G-L1G, A-N1G-L1CN ve A-N1G-L1CH Numunelerine Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları

Numune Adı	T_{cr} (kN.m)	T_{cr} Artış Oranı (%)	T_u (kN.m)	T_u Artış Oranı (%)
A-REF ORT	4,30		4,30	
A-N1G-L0	4,72	-	5,79	-
A-N1G-L1G	5,70	20,76	6,66	15,03
A-N1G-L1CN	6,35	34,53	6,59	13,82
A-N1G-L1CH	6,24	32,20	6,24	7,77

Cam elyaf kullanılarak enine sargılanan numunelere boyuna yapıştırma olarak; cam elyaf kullanıldığı zaman çatlama momentinde %20,76 oranında burulma momenti kapasitesinde %15,03 oranında artış göstermiştir. CFRP-N kullanıldığı zaman çatlama momentinde %34,53 oranında burulma momenti kapasitesinde %13,82 oranında artış göstermiştir. CFRP-H kullanıldığı zaman ise çatlama momentinde %32,20 oranında burulma momenti kapasitesinde %7,77 oranında artış gözlenmiştir.



Şekil 6.17: A-REF 1, A-REF 2, A-N1G-L0, A-N1G-L1G, A-N1G-L1CN ve A-N1G-L1CH numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri

Boyuna yapıştırma uygulandığı zaman sadece enine sargılı numunenin çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesinde artış elde edildiği Şekil 6.17'den görülmektedir. Boy yapıştırma olarak cam elyaf ve karbon elyaf kullanıldığında burulma momentlerinde önemli düzeyde artış elde edilmiştir. Boy yapıştırma olarak yüksek elastisite modüllü karbon elyaf kullanılması durumunda çatlama momentindeki artıştan sonra sargılarda meydana gelen kopmalar nedeniyle burulma kapasitesinde düşüş olmuş ve bunun sonucunda burulma momenti kapasitesi çatlama momenti değerine eşit olarak kalmıştır.

6.2.4. YDB kirişlerde boyuna yapıştırmanın etkisi

Yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde tek kat enine sargılama yanında B-N1G-L1G, B-N2G-L1G, B-N1CN-L1CN ve B-N1CH-L1CH numunelerinde hem enine hem de boyuna yapıştırma uygulanmıştır. Yapılan bu güçlendirme sonucunda elde edilen grafikler kullanılan malzeme özellikleri göz önünde bulundurularak GFRP, CFRP-N ve CFRP-H olmak üzere üç grupta ele alınmıştır.

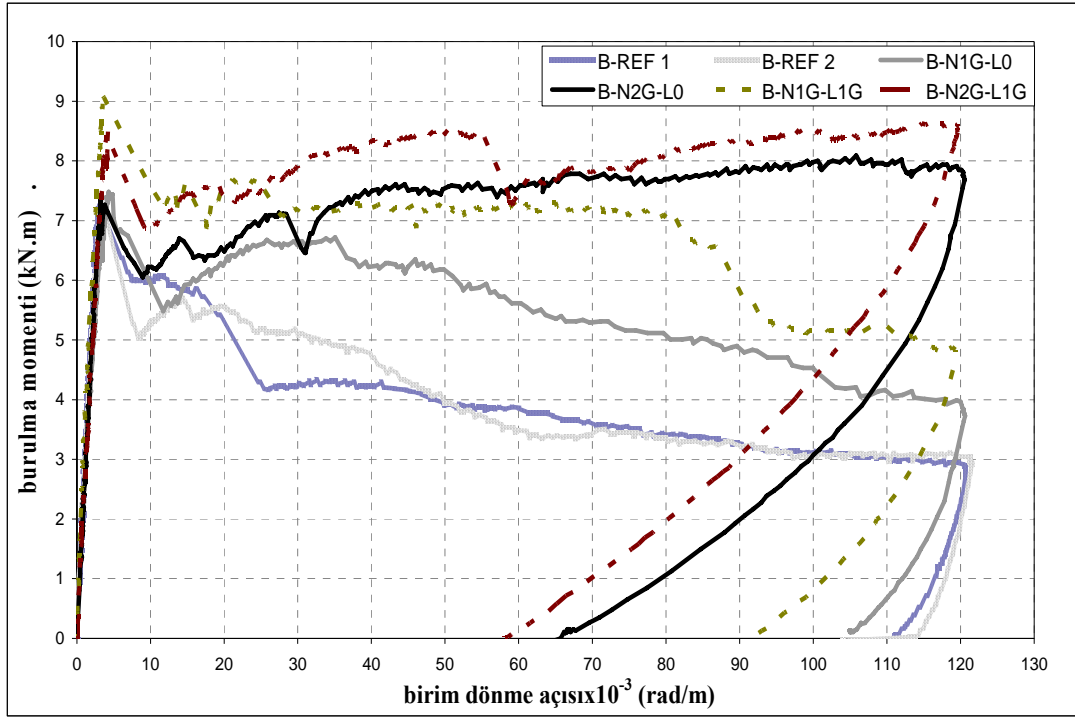
GFRP kullanılarak yapılan boyuna yapıştırma: Tablo 6.11'de cam elyaf kullanılarak enine ve boyuna yapıştırma yapılan numunelere ait çatlama momenti, burulma momenti kapasitesi ve aynı numunenin sadece enine sargılanan numunesine göre yüzdesel artış oranları verilmiştir. Tablo 6.11 içerisinde karşılaştırma numunelerine ait burulma momenti kapasitesi ve çatlama momenti değerlerinin ortalamasını temsil eden B-REF ORT değerleri hatırlatma olarak verilmiştir. Tablo 6.11'de enine sargılama yapılmış olan numunede ilave olarak boyuna yapıştırma yapılması durumunda elde edilen moment artışlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla tabloda yer alan yüzdesel artış değerleri her boyuna yapıştırma yapılmış numunenin sadece enine sargılanmış olan numunesinden elde edilen moment değerlerine karşılık sahip olduğu moment değerlerindeki artışı göstermektedir. Şekil 6.18'de GFRP kullanılarak enine ve boyuna güçlendirilen numunelerin karşılaştırma numuneleri ile birlikte hazırlanmış olan burulma momenti – birim dönme açısı grafiği verilmiştir.

Tablo 6.11: Cam Elyaf Kullanılarak Enine ve Boyuna Güçlendirilen Numunelere Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesele Artışları

Numune Adı	T_{cr} (kN.m)	T_{cr} Artış Oranı (%)	T_u (kN.m)	T_u Artış Oranı (%)
B-REF ORT	7,29		7,29	
B-N1G-L0	7,48	-	7,48	-
B-N1G-L1G	9,13	22,06	9,13	22,06
B-N2G-L0	7,39	-	8,09	-
B-N2G-L1G	8,59	16,24	8,65	6,92

Cam elyaf kullanılarak tek kat enine sargılanan numuneye ilave olarak tek kat boyuna yapıştırma yapıldığı zaman çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesi %22,06 oranında artmaktadır. İki kat enine sargılanan numuneye tek kat boyuna yapıştırma yapıldığı zaman çatlama momenti %16,24 oranında, burulma momenti kapasitesi %6,92 oranında artmaktadır.

Şekil 6.18 incelendiği zaman; sadece tek kat cam elyaf kullanılarak enine sargılanan numunede sargının etkin olamadığı ve aynı numune ilave olarak boyuna yapıştırma yapıldığı durumda boyuna yapıştırmanın etkin olarak kapasite değerlerini yukarı çektiği görülmektedir. İki kat cam elyaf kullanılarak enine olarak sargılanan numuneye tek kat boyuna yapıştırma yapılması durumunda enine sargının her iki numunede de etkin olması nedeniyle boy yapıştırma kapasite değerlerini çok önemli miktarda arttırmadığı görülmektedir. Boyuna yapıştırma uygulanması durumunda tek kat enine sargılı numuneye ait elastik geri dönme deformasyonunda %12,74 oranında, iki kat enine sargılı numuneye ait elastik geri dönme deformasyonunda %11,56 oranında artış göstermiştir. Boyuna yapıştırma yapılan numunelerin yüzde artış oranları aynı numunenin boy yapıştırmasız sadece enine sargılı olması durumunda sahip olduğu elastik geri dönme deformasyonu miktarındaki artışı göstermektedir.



Şekil 6.18: B-REF 1, B-REF 2, B-N1G-L0, B-N1G-L1G, B-N2G-L0 ve B-N2G-L1G numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri

CFRP-N kullanılarak yapılan boyuna yapıştırma: Tablo 6.12’de normal elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak enine ve boyuna yapıştırma yapılan numunelere ait çatlama momenti, burulma momenti kapasitesi ve aynı numunenin sadece enine sargılanan numunesine göre yüzdesel artış oranları verilmiştir. Tablo 6.12 içerisinde karşılaştırma numunelerine ait burulma momenti kapasitesi ve çatlama momenti değerlerinin ortalamasını temsil eden B-REF ORT değerleri hatırlatma olarak verilmiştir. Tablo 6.12’de enine sargılama yapılmış olan numunede ilave olarak boyuna yapıştırma yapılması durumunda elde edilen moment artışlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla tabloda yer alan yüzdesel artış değerleri her boyuna yapıştırma yapılmış numunenin sadece enine sargılanmış olan numunesinden elde edilen moment değerlerine karşılık sahip olduğu moment değerlerindeki artışı göstermektedir. Şekil 6.19’da CFRP-N kullanılarak enine ve boyuna güçlendirilen numunelerin karşılaştırma numuneleri ile birlikte hazırlanmış olan burulma momenti – birim dönme açısı grafiği verilmiştir.

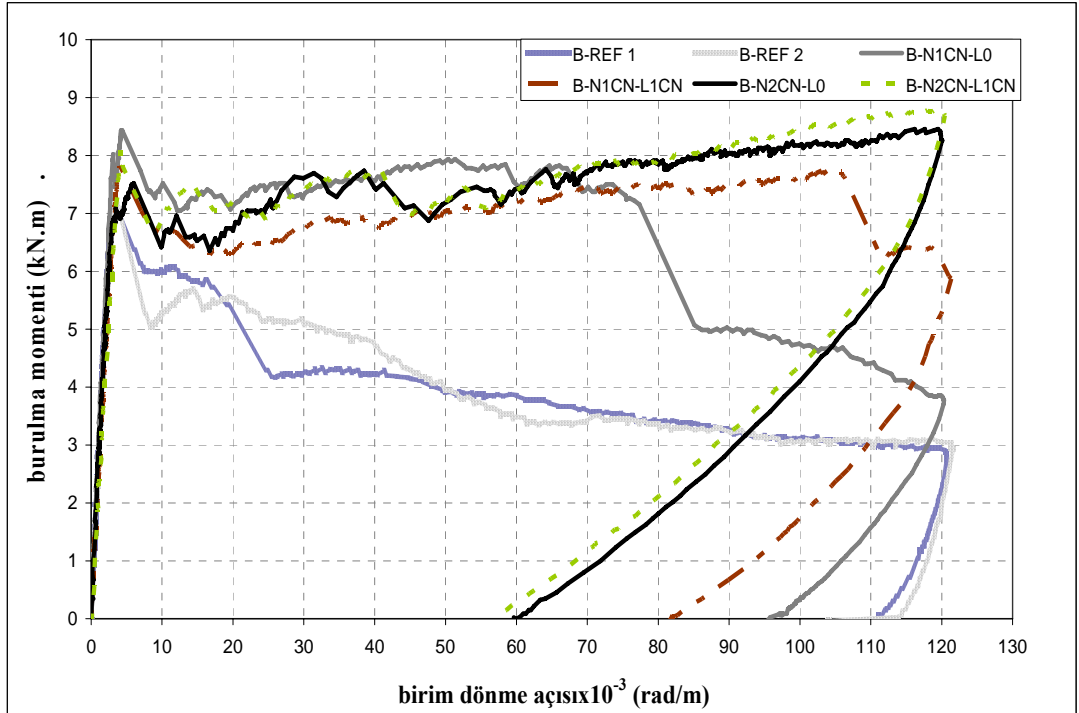
Tek kat CFRP-N kullanılarak yapılan hem enine hem de boyuna yapıştırma, sadece tek kat CFRP-N kullanılarak yapılan enine sargılama sonucunda elde edilen değerlerde herhangi bir artışa neden olmamıştır. İki kat CFRP-N kullanılarak yapılan

hem enine hem de boyuna yapıştırma, sadece iki kat CFRP-N kullanılarak enine sargılanan numuneye ait çatlama momenti değerini %7,58 oranında burulma momenti değerini %4,26 oranında arttırmaktadır.

Tablo 6.12: Normal Elastisite Modüllü Karbon Elyaf Kullanılarak Enine ve Boyuna Güçlendirilen Numunelere Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları

Numune Adı	T_{cr} (kN.m)	T_{cr} Artış Oranı (%)	T_u (kN.m)	T_u Artış Oranı (%)
B-REF ORT	7,29	/	7,29	/
B-N1CN-L0	8,02	-	8,43	-
B-N1CN-L1CN	7,83	-	7,83	-
B-N2CN-L0	7,52	-	8,46	-
B-N2CN-L1CN	8,09	7,58	8,82	4,26

Şekil 6.19 incelendiği zaman yüksek dayanımlı beton kullanılarak hazırlanan numunelerde yapılan sargılamalar sonucunda küçük miktarlarda artış elde edilmiştir. Numunelerin çatlama sonrası davranışları incelendiği zaman birbirlerine yakın davranışlar sergilediği görülmektedir. Boyuna yapıştırma yapılan numunelerin elastik geri dönme deformasyonlarında az da olsa artış gözlenmiştir.



Şekil 6.19: B-REF 1, B-REF 2, B-N1CN-L0, B-N1CN-L1CN, B-N2CN-L0 ve B-N2CN-L1CN numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri

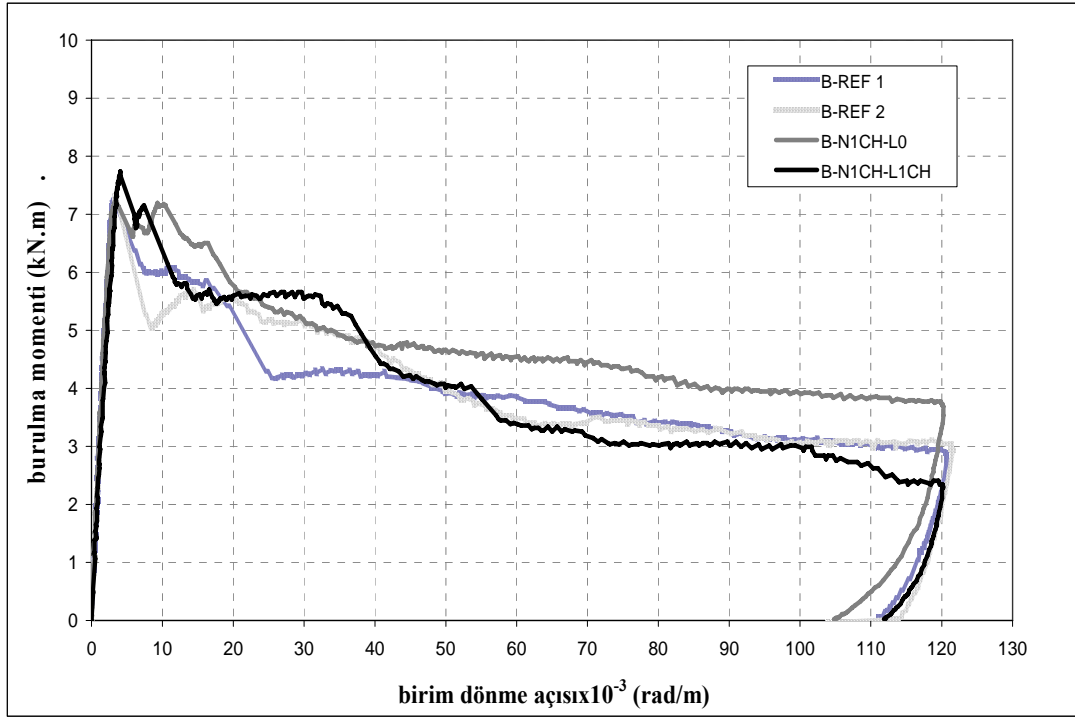
CFRP-H kullanılarak yapılan boyuna yapıştırma: Tablo 6.13’de yüksek elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak enine ve boyuna yapıştırma yapılan numunelere ait çatlama momenti, burulma momenti kapasitesi ve aynı numunenin sadece enine sargılanan numunesine göre yüzdesel artış oranları verilmiştir. Tablo 6.13 içerisinde karşılaştırma numunelerine ait burulma momenti kapasitesi ve çatlama momenti değerlerinin ortalamasını temsil eden B-REF ORT değerleri hatırlatma olarak verilmiştir. Tablo 6.13’de enine sargılama yapılmış olan numunede ilave olarak boyuna yapıştırma yapılması durumunda elde edilen moment artışlarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla tabloda yer alan yüzdesel artış değerleri her boyuna yapıştırma yapılmış numunenin sadece enine sargılanmış olan numunesinden elde edilen moment değerlerine karşılık sahip olduğu moment değerlerindeki artışı göstermektedir. Şekil 6.20’de CFRP-H kullanılarak enine ve boyuna güçlendirilen numunelerin karşılaştırma numuneleri ile birlikte hazırlanmış olan burulma momenti – birim dönme açısı grafiği verilmiştir.

Tablo 6.13: Yüksek Elastisite Modüllü Karbon Elyaf Kullanılarak Enine ve Boyuna Güçlendirilen Numunelere Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları

Numune Adı	T_{cr} (kN.m)	T_{cr} Artış Oranı (%)	T_u (kN.m)	T_u Artış Oranı (%)
B-REF ORT	7,29		7,29	
B-N1CH-L0	7,22	-	7,22	-
B-N1CH-L1CH	7,74	7,20	7,74	7,20

CFRP-H kullanılarak tek kat enine sargılanan numuneye ilave olarak tek kat boyuna yapıştırma yapıldığı zaman çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesi %7,20 oranında artmaktadır.

Şekil 6.20 incelendiği zaman; tek CFRP-H kullanılarak yapılan enine sargılamada çatlama momentinde bir miktar artış olduğu görülmektedir. Hem enine hem boyuna yapıştırma uygulanan numunedeki burulma momenti kapasitesindeki artışın nedeni çatlama momentindeki artıştır. Her iki numuneye ait burulma sonrası davranış incelendiği zaman hem enine hem boyuna yapıştırma yapılmış numunenin kapasitesinde gerçekleşen ani düşüşün nedeni FRP’lerde meydana gelen ani kopmalar ve açılmalarıdır.



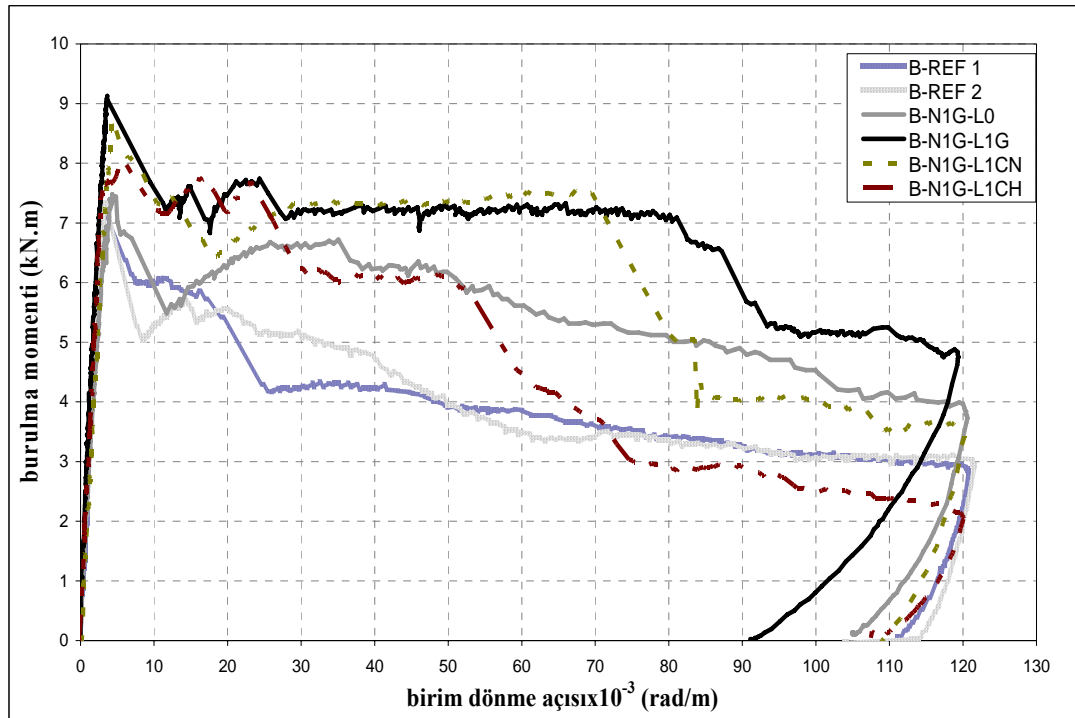
Şekil 6.20: B-REF 1, B-REF 2, B-N1CH-L0 ve B-N1CH-L1CH numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri

Kullanılan boyuna yapıştırma tipinin burulmaya etkisi: Deneysel çalışma kapsamında 3 farklı sargı tipi kullanılarak betonarme kirişlerin güçlendirilmesi yapılmıştır. B-N1G-L1G, B-N1G-L1CN ve B-N1G-L1CH numunelerin sırasıyla cam elyaf, normal elastisite modüllü karbon elyaf ve yüksek elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak boyuna yapıştırmaları yapılmıştır. Daha sonra üç farklı sargı tipine sahip üç numunede boy yapıştırmanın üzerine tek kat cam elyaf kullanılarak enine olarak sargılanmıştır. Bu numuneler sargı tipinin burulma davranışı üzerindeki etkisini görebilmek amacıyla hazırlanmıştır. Tablo 6.14’de bu üç numuneye ait çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesi değerleriyle birlikte sadece tek kat cam elyaf kullanılarak enine olarak sargılanan numunenin (B-N1G-L0) çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesi değerlerine oranla yüzdesel artış miktarları verilmiştir. Tablo 6.14 içerisinde karşılaştırma numunelerine ait burulma momenti kapasitesi ve çatlama momenti değerlerinin ortalamasını temsil eden B-REF ORT değerleri hatırlatma olarak verilmiştir. Şekil 6.21’de Tablo 6.14 içerisindeki numunelere ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri verilmiştir.

Tablo 6.14: B-N1G-L0, B-N1G-L1G, B-N1G-L1CN ve B-N1G-L1CH Numunelerine Ait Burulma Momenti Değerleri ve Yüzdesel Artışları

Numune Adı	T_{cr} (kN.m)	T_{cr} Artış Oranı (%)	T_u (kN.m)	T_u Artış Oranı (%)
B-REF ORT	7,29	/	7,29	/
B-N1G-L0	7,48	-	7,48	-
B-N1G-L1G	9,13	22,06	9,13	22,06
B-N1G-L1CN	8,74	16,85	8,74	16,85
B-N1G-L1CH	8,04	7,49	8,04	7,49

Cam elyaf kullanılarak enine sargılanan numunelere boy yapıştırma olarak; cam elyaf kullanıldığı zaman çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesi %22,06 oranında artış göstermiştir. CFRP-N kullanıldığı zaman çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesinde %16,85 oranında artış göstermiştir. CFRP-H kullanıldığı zaman ise çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesinde %7,49 oranında artış göstermiştir.



Şekil 6.21: B-REF 1, B-REF 2, B-N1G-L0, B-N1G-L1G, B-N1G-L1CN ve B-N1G-L1CH numunelerine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafikleri

Yüksek dayanımlı kirişlerde boyuna yapıştırma olarak cam elyaf ve normal elastisite modüllü karbon elyaf kullanılması burulma sonrası davranışta benzer özellikler göstermektedir. Ancak birim dönme açısının 0,070 rad/m olduğu anda boyuna yapıştırma olarak CFRP-N kullanılan numunede bulunan enine sargılanmış cam elyaf şeritlerinin ikisinde birden meydana gelen kopma ve açılma nedeniyle kapasitede ani düşüş gözlenmiştir. Boy yapıştırma olarak CFRP-H kullanılması durumunda çatlama momentinde artış gözlendikten sonra enine yapıştırılan cam elyaf şeritlerinde kopmalar meydana gelmiştir. Ancak kopan şeritlerin altından geçen çatlakların açılmasıyla CFRP-H şeritlerinde kopmalar meydana gelmiştir. Burulma davranışında aktif özelliğini kaybeden enine sargılamada boyuna yapıştırılan FRP şeritlerinin de kopmasıyla kapasite eğrisinde hızlı düşüşler gözlenmiştir.

6.3. Burulma Momenti – Toplam Boy Uzama Grafiklerinin Değerlendirilmesi

Normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı beton kullanılarak hazırlanan betonarme kirişlerle yapılan basit burulma deneylerinde numunenin deney bölgesi boyunca meydana gelen toplam uzamaları belirlenmiştir. Bu bölümde normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonarme kirişlere ait burulma momenti – toplam boy uzama grafikleri değerlendirilecektir. Bu grafiklerde, betonarme kirişin deney bölgesinde meydana gelen uzama ile birlikte taşıyabildiği burulma momenti büyüklükleri karşılaştırılacaktır.

6.3.1. NDB kirişlerde toplam boy uzama etkisi

Normal dayanımlı beton kullanılarak hazırlanan betonarme kiriş numunelerine ait burulma momenti – toplam boy uzama grafikleri kullanılan sargı tipi göz önüne alınarak GFRP, CFRP-N ve CFRP-H olmak üzere gruplandırılarak değerlendirilecektir.

GFRP sargı kullanılması durumunda: Cam elyaf kullanılarak tek kat ve iki kat enine sargılama yapılan ve hem enine hem de boyuna yapıştırma yapılan numunelere ait

burulma momenti – toplam boy uzama grafikleri Bölüm 5’te bulunan Şekil 5.15’de verilmiştir. Şekil 5.15, NDB kirişlere ait karşılaştırma numunelerinin burulma momenti – toplam boy uzama grafiklerinin bulunduğu Şekil 5.14 ile karşılaştırıldığı zaman, sargılama yapılan tüm numunelerde aynı boy uzama değerlerinde sargılanmış numunelerin daha fazla moment taşıdığı görülmüştür.

Cam elyaf kullanılarak sadece enine sargılanmış numunelere (A-N1G-L0 ve A-N2G-L0) ait eğrilerle bu numunelere ilave olarak tek kat boyuna yapıştırma yapılan numunelere (A-N1G-L1G ve A-N2G-L1G) ait eğriler karşılaştırıldığı zaman; bu numuneler üzerinde boy yapıştırmanın çatlaklar oluşmaya başladığı andan itibaren taşınan burulma momenti miktarında artışa neden oldukları görülmektedir. Tek kat enine sargılama yapılması durumunda, enine sargı ile birlikte boyuna yapıştırma kullanılması durumunda aynı boy uzama seviyesinde taşınan burulma momenti değerinde önemli artışlar gözlenmiştir. Enine sargının iki kat olması durumunda, boyuna yapıştırmanın aynı boy uzaması değerlerinde taşınan burulma momenti üzerinde küçük miktarlarda artışa neden olduğu görülmüştür.

CFRP-N sargı kullanılması durumunda: Normal elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak tek kat enine sargılama yapılan ve hem enine hem de boyuna yapıştırma yapılan numunelere ait burulma momenti – toplam boy uzama grafikleri Bölüm 5’te bulunan Şekil 5.16’da verilmiştir. Şekil 5.16, NDB kirişlere ait karşılaştırma numunelerinin burulma momenti – toplam boy uzama grafiklerinin bulunduğu Şekil 5.14 ile karşılaştırıldığı zaman; i.)A-N1CN-L0 ve A-N1CN-L1CN numunelerine ait taşınan burulma momenti eğrilerinin ilk çatlak oluşuktan sonra birbirlerine yakın davranış sergiledikleri (aynı boy uzamasında benzer moment seviyesi), ii.) güçlendirilmiş numunelerin güçlendirilmemiş olanlara oranla aynı boy uzaması değerlerinde daha fazla moment taşıdığı görülmektedir.

CFRP-H sargı kullanılması durumunda: Yüksek elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak tek kat enine sargılama yapılan ve hem enine hem de boyuna yapıştırma yapılan numunelere ait burulma momenti – toplam boy uzama grafikleri Bölüm 5’te bulunan Şekil 5.16’da verilmiştir. Şekil 5.16, NDB kirişlere ait karşılaştırma numunelerinin burulma momenti – toplam boy uzama grafiklerinin bulunduğu Şekil

5.14 ile karşılaştırıldığı zaman; A-N1CH-L0 ve A-N1CH-L1CH numunelerine ait taşınan burulma momenti eğrilerinde hızlı düşüşler gözlenmiştir.

Yüksek elastisite modüllü karbon elyafın kırılma özelliğinden dolayı her iki numunede de açılan çatlaklarla beraber sargı malzemesinin zarar görmesi nedeniyle taşınan burulma momenti kapasitesinde kalıcı artış olmamıştır.

6.3.2. YDB kirişlerde toplam boy uzama etkisi

Yüksek dayanımlı beton kullanılarak hazırlanan betonarme kiriş numunelerine ait burulma momenti – toplam boy uzama grafikleri kullanılan sargı tipi göz önüne alınarak GFRP, CFRP-N ve CFRP-H olmak üzere gruplandırılarak değerlendirilecektir.

GFRP sargı kullanılması durumunda: Cam elyaf kullanılarak tek kat ve iki kat enine sargılama yapılan ve hem enine hem de boyuna yapıştırma yapılan numunelere ait burulma momenti – toplam boy uzama grafikleri Bölüm 5’te bulunan Şekil 5.19’da verilmiştir. Şekil 5.19, YDB kirişlere ait karşılaştırma numunelerinin burulma momenti – toplam boy uzama grafiklerinin bulunduğu Şekil 5.18 ile karşılaştırıldığı zaman, sargılama yapılan tüm numunelerde elastik ötesi bölgede boy uzamanın artmasına rağmen taşınan burulma momenti miktarında artış gözlenmektedir. Diğer taraftan, karşılaştırma numunelerinde toplam boy uzamanın artması, hızla düşen burulma momenti kapasitesine sebep olmaktadır.

Cam elyaf kullanılarak sargılama yapılan katman sayısının taşınan burulma momentine etkisini görmek için B-N1G-L0 ile B-N2G-L0 numunelerine ait eğriler incelenmiştir. Kat sayısının artması kirişte sabit boy uzaması değerinde daha fazla momentin taşınmasını sağlamıştır. Cam elyaf kullanılarak sadece enine sargılanmış numunelere (B-N1G-L0 ve B-N2G-L0) ait eğrilerle bu numunelere ilave olarak tek kat boy yapıştırma yapılan numunelere (B-N1G-L1G ve B-N2G-L1G) ait eğriler karşılaştırıldığı zaman; bu numuneler üzerinde boy yapıştırmanın çatlaklar oluşmaya başladığı andan itibaren taşınan burulma momenti miktarında artışa neden oldukları

ve GFRP sargılanan diğer numunelere oranla sabit boy uzaması değerinde daha yüksek burulma momenti taşıdıkları görülmüştür.

CFRP-N sargı kullanılması durumunda: Normal elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak tek kat ve iki kat enine sargılama yapılan ve hem enine hem de boyuna yapıştırma yapılan numunelere ait burulma momenti – toplam boy uzama grafikleri Bölüm 5’te bulunan Şekil 5.20’de verilmiştir. Şekil 5.20, YDB kirişlere ait karşılaştırma numunelerinin burulma momenti – toplam boy uzama grafiklerinin bulunduğu Şekil 5.18 ile karşılaştırıldığı zaman, sargılama yapılan tüm numunelerde boy uzaması değerlerinin artmasına rağmen taşınan burulma momenti miktarında artış gözlenmektedir.

Normal elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak yapılan tek kat ve iki kat enine sargılanarak hazırlanan B-N1CN-L0 ve B-N2CN-L0 numunelerine ait grafikler incelendiği zaman iki kat sargılama yapılması durumunda boy uzaması değerinin artmasıyla taşınan burulma momenti miktarında küçük artışlar gözlenmiştir. Bu numunelere ilave olarak boyuna yapıştırma yapılması durumunda tek kat enine sargılı numuneye ait taşınan burulma momenti değerinde artış gözlenmemekle beraber iki kat enine sargılı numuneye ait taşınan burulma momenti değerinde küçük artış gözlenmiştir.

CFRP-H sargı kullanılması durumunda: Yüksek elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak tek kat enine sargılama yapılan ve hem enine hem de boyuna yapıştırma yapılan numunelere ait burulma momenti – toplam boy uzama grafikleri Bölüm 5’te bulunan Şekil 5.21’de verilmiştir. Şekil 5.21, YDB kirişlere ait karşılaştırma numunelerinin burulma momenti – toplam boy uzama grafiklerinin bulunduğu Şekil 5.18 ile karşılaştırıldığı zaman, yüksek elastisite modüllü karbon elyaf kullanılarak enine sargılama yapılan yüksek dayanımlı numunelerde ilk çatlamanın ani ve gevrek olması nedeniyle sargılarda kopmalar meydana gelmiş ve toplam boy uzama değerinin artmasıyla birlikte taşınan burulma momenti değerinde hızlı bir düşüş gözlenmiştir.

7. ANALİTİK MODELİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, Bölüm 2’de verilen elastik, plastik ve yanal eğilme teorileri kullanılarak hesaplanan çatlama momenti değerleri ile deneysel olarak elde edilen çatlama momenti değerleri karşılaştırılacaktır. FRP kullanılarak güçlendirilen normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin çatlama momentlerinin belirlenebilmesi amacıyla bu tez çalışması kapsamında analitik bir model önerilmiştir. Önerilen analitik model, Bölüm 3.2.2 ve 3.2.3’de verilen deneylerden elde edilen çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesi değerleriyle karşılaştırılarak incelenecektir. Aynı zamanda Bölüm 3.2.2’de Saravanan Panchacharam ve Abdeldjelil Belarbi tarafından çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesinin önceden belirlenmesi için önerilen analitik model ile bu çalışma kapsamında önerilen analitik model karşılaştırmalı olarak incelenecektir.

7.1. Burulma Teorileri ile Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Bu bölümde, Bölüm 2’de açıklanmış olan elastik, plastik ve yanal eğilme teorileri kullanılarak çatlama momenti değerleri normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin her biri için ayrı ayrı hesaplanarak deneyler sonucunda elde edilen çatlama momenti değerleri ile karşılaştırmalı olarak incelenecektir.

Elastik teoriye göre çatlama momenti değeri Denklem 7.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$T_e = \alpha_e \cdot x^2 \cdot y \cdot f_{ctf} \quad (7.1)$$

Burada x ve y numune boyutları olup $x = 150$ mm $y = 200$ mm olarak alınmıştır. St. Venant sabiti (α_e) Tablo 2.1'de verilen değerlerden enterpolasyon yapılarak $\alpha_e = 0,224$ olarak bulunmuştur. f_{ctf} betonun eğilmede çekme dayanımı olup hesaplarda Tablo 4.14'de her bir numune için deneysel olarak bulunmuş değerler kullanılmıştır.

Plastik teoriye göre çatlama momenti değeri Denklem 7.2 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$T_p = \alpha_p \cdot x^2 \cdot y \cdot f_{ctf} \quad (7.2)$$

Plastisite sabiti α_p Denklem 7.3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\alpha_p = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{6} \cdot \frac{x}{y} \right) \quad (7.3)$$

Yanal eğilme teorisine göre çatlama momenti değeri Denklem 7.4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$T_{sb} = \frac{x^2 \cdot y}{3} \cdot f_{cts} \quad (7.4)$$

Burada f_{cts} betonun yarmada çekme dayanımı olup hesaplarda Tablo 4.15'de her bir numune için deneysel olarak bulunmuş değerler kullanılmıştır.

Tablo 7.1'de normal ve Tablo 7.2'de yüksek dayanımlı betonarme kirişler için elastik, plastik, yanal eğilme teorilerine göre hesaplanan ilk çatlama değerleri ve deneysel sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 7.1: Normal Dayanımlı Numunelere Ait Deneysel ve Analitik Sonuçlar

Numune Adı	Deneysel T_{cr_den} (kN.m)	Elastik Teori		Plastik Teori		Yanal Eğilme Teorisi	
		T_e (kN.m)	$\frac{T_{cr_den}}{T_e}$	T_p (kN.m)	$\frac{T_{cr_den}}{T_p}$	T_{sb} (kN.m)	$\frac{T_{cr_den}}{T_{sb}}$
A-REF 1	3,99	5,06	0,79	8,47	0,47	3,84	1,04
A-REF 2	4,60	5,51	0,83	9,23	0,50	4,11	1,12
A-N1G-L0	4,72	5,06	0,93	8,47	0,56	3,84	1,23
A-N2G-L0	5,42	5,51	0,98	9,23	0,59	4,11	1,32
A-N1G-L1G	5,70	5,51	1,03	9,23	0,62	4,11	1,39
A-N2G-L1G	5,70	5,06	1,13	8,47	0,67	3,84	1,48
A-N1CN-L0	5,44	5,24	1,04	8,78	0,62	4,31	1,26
A-N1CN-L1CN	5,33	5,24	1,02	8,78	0,61	4,31	1,24
A-N1CH-L0	5,55	5,33	1,04	8,93	0,62	4,41	1,26
A-N1CH-L1CH	6,74	5,33	1,26	8,93	0,76	4,41	1,53
A-N1G-L1CN	6,35	5,24	1,21	8,78	0,72	4,31	1,48
A-N1G-L1CH	6,24	5,33	1,17	8,93	0,70	4,41	1,41

Tablo 7.2: Yüksek Dayanımlı Numunelere Ait Deneysel ve Analitik Sonuçlar

Numune Adı	Deneysel T_{cr_den} (kN.m)	Elastik Teori		Plastik Teori		Yanal Eğilme Teorisi	
		T_e (kN.m)	$\frac{T_{cr_den}}{T_e}$	T_p (kN.m)	$\frac{T_{cr_den}}{T_p}$	T_{sb} (kN.m)	$\frac{T_{cr_den}}{T_{sb}}$
B-REF 1	7,24	6,45	1,12	10,80	0,67	7,04	1,03
B-REF 2	7,33	7,06	1,04	11,81	0,62	7,08	1,04
B-N1G-L0	7,48	7,06	1,06	11,81	0,63	7,08	1,06
B-N2G-L0	7,39	7,06	1,05	11,81	0,63	7,08	1,04
B-N1G-L1G	9,13	6,96	1,31	11,64	0,78	6,83	1,34
B-N2G-L1G	8,59	6,96	1,24	11,64	0,74	6,83	1,26
B-N1CN-L0	8,02	6,74	1,19	11,29	0,71	7,17	1,12
B-N2CN-L0	7,52	6,82	1,10	11,42	0,66	7,01	1,07
B-N1CN-L1CN	7,83	6,74	1,16	11,29	0,69	7,17	1,09
B-N2CN-L1CN	8,09	6,74	1,20	11,29	0,72	7,17	1,13
B-N1CH-L0	7,22	6,82	1,06	11,42	0,63	7,01	1,03
B-N1CH-L1CH	7,74	6,82	1,13	11,42	0,68	7,01	1,10
B-N1G-L1CN	8,74	6,96	1,26	11,64	0,75	6,83	1,28
B-N1G-L1CH	8,04	6,45	1,25	10,80	0,74	7,04	1,14

Elastik, plastik ve yanal eğilme teorileri sargılanmamış numunelerin (REF) çatlama momentlerini önceden belirlemek amacıyla önerilmiş eşitliklerdir. Bu nedenle Tablo 7.1 ve Tablo 7.2’de verilen A-REF 1, A-REF 2, B-REF 1 ve B-REF 2 numunelerine ait analitik ve deneysel sonuçlar incelendiği zaman yanal eğilme teorisi sonucunda bulunan çatlama momenti değerlerinin deneysel olarak elde edilen çatlama momenti

değerleriyle yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Önerilen bu eşitlikler sonucunda elde edilen sargılanmış numunelere ait çatlama momenti değerlerinin, deneysel olarak elde edilen çatlama momenti değerlerine yakın sonuçlar vermedikleri görülmüştür.

7.2. Önerilen Analitik Model

7.2.1. Çatlama momentinin hesabı için önerilen analitik model

FRP kullanılarak güçlendirilmesi yapılan 12 adet normal ve 14 adet yüksek dayanımlı betonarme kirişe ait basit burulma deneyleri sonucunda elde edilen çatlama momenti değerlerinin önceden belirlenmesi amacıyla deneysel sonuçlar kullanılarak bu çalışma kapsamında bir analitik model önerilmiştir. Önerilen analitik modelin başlangıç noktası olarak TS500/2000’de tasarım burulma momenti (T_d) altında betonarme kirişte bulunması gereken etriye miktarı ve boy donatı miktarına ait eşitlikler kullanılmıştır (Denklem 7.5 ve 7.6).

$$A_{ot} = \frac{T_d}{2.A_e.f_{ywd}}.s \quad (7.5)$$

$$A_{sl} = \frac{A_{ot}}{s}.u_e.\frac{f_{ywd}}{f_{yd}} \quad (7.6)$$

Denklem 7.5’den elde edilen etriyenin karşılayacağı burulma momenti değeri, Denklem 7.7’de verildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$T_d = \frac{A_{ot}}{s}.2.A_e.f_{ywd} \quad (7.7)$$

Denklem 7.7’de verilen eşitlik, FRP kullanılarak yapılan enine sargılamının karşılayacağı burulmada çatlama momenti değerini verecek şekilde düzenlendiğinde Denklem 7.8 elde edilmektedir. Denklem 7.8’de dışarıdan betonarme kiriş üzerine

yapıştırılarak yapılan güçlendirmede enine olarak yapıştırılan FRP şeridinin taşıdığı çatlama momenti değerine katkısı verilmiştir.

$$T_{cr_t} = \frac{(t_t \cdot b_t)}{s_f} 2 \cdot (b \cdot h) \cdot (\varepsilon_t \cdot E_t) \quad (7.8)$$

Burada; Denklem 7.5 içerisinde bulunan (T_d) tasarım burulma momenti, enine sargının çatlama momentine katkısı ele alındığından dolayı T_{cr_t} olarak alınmıştır. t_t enine yapıştırılan FRP şeridinin bir tanesine ait kalınlık, b_t enine yapıştırılan FRP şeridinin bir tanesine ait genişliktir. Enine donatı kesit alanı (A_{0t}) yerine ($t_t \cdot b_t$) ifadesi kullanılarak enine sargı kesit alanı verilmiştir. Burulma için çekirdek alan (A_e), etriyenin dışardan kapattığı alan olarak alındığı için bu terim enine sargılamada, sargı kirişin kesitini dışarıdan kapattığı için brüt kesit alanına ($b \cdot h$) eşit alınmıştır. Enine donatı akma dayanımı (f_{ywd}) değeri yerine, ilk çatlağın oluştuğu anda enine sargıda meydana gelen birim şekil değiştirme miktarı (ε_t) ile sargının elastisite modülünün (E_t) çarpımı alınmıştır. Analitik modelde ilk çatlağın oluştuğu anda betonun birim uzama miktarı 0,00012 olarak kabul edilmiştir (AKPINAR, 2004). FRP ile beton arasındaki aderansın tam olarak meydana geldiği ve burulma çatlakların 45° ile oluştuğu kabulü ile $\varepsilon_t = 0,00012 \cdot \sin(45)$ olarak alınmıştır. İki etriye arası mesafe (s), enine sargılamada için iki enine sargı şeridinin merkezinden merkezine olan mesafe olarak alınmıştır.

Denklem 7.6'da verilmiş olan burulma için gerekli boy donatı miktarına ait eşitlik içerisinde yer alan A_{0t} ifadesi yerine Denklem 7.5'deki eşitlik yazılırsa Denklem 7.9 elde edilmektedir.

$$T_d = \frac{2 \cdot A_{st} \cdot A_e \cdot f_{yd}}{u_e} \quad (7.9)$$

Denklem 7.9'da bulunan eşitlik, FRP kullanılarak yapılan boyuna yapıştırmanın karşılayacağı burulma momenti değerini verecek şekilde düzenlendiğinde Denklem 7.10 elde edilmektedir. Denklem 7.10'da dışarıdan betonarme kiriş üzerine yapıştırılarak yapılan güçlendirmede boyuna olarak yapıştırılan FRP şeridinin çatlama momentine katkısını vermektedir.

$$T_{cr_l} = \frac{(4.t_l.b_l).(b.h).(e_l.E_l)}{(b+h)} \quad (7.10)$$

Burada; Denklem 7.9 içerisinde bulunan (T_d) tasarım burulma momenti, boyuna yapıştırmanın çatlama momentine katkısı ele alındığından dolayı T_{cr_l} olarak alınmıştır. t_l boyuna yapıştırılan FRP şeridinin bir tanesine ait kalınlık, b_l boyuna yapıştırılan FRP şeridinin bir tanesine ait genişliktir. Boyuna donatı kesit alanı (A_{sl}) yerine, boyuna yapıştırma kirişin 4 yüzeyine uygulandığı için ($4.t_l. b_l$) ifadesi kullanılarak boyuna yapıştırma kesit alanı verilmiştir. Burulma için çekirdek alan (A_e), etriyenin dışardan kapattığı alan olarak alındığı için bu terim brüt kesit alanına ($b.h$) eşit alınmıştır. Aynı şekilde A_e alanına ait çevre (u_e) değeri yerine, ($2.(b+h)$) değeri kullanılmıştır. Boy donatı akma dayanımı (f_{yd}) değeri yerine, ilk çatlağın oluştuğu anda boyuna yapıştırmada meydana gelen birim şekil değiştirme miktarı (ϵ_l) ile sargının elastisite modülünün (E_l) çarpımı alınmıştır. Analitik modelde ilk çatlağın oluştuğu anda betonun birim uzama miktarı 0,00012 olarak kabul edilmiştir. FRP ile beton arasındaki aderansın tam olarak meydana geldiği ve burulma çatlakların 45° ile oluştuğu kabulü ile $\epsilon_f=0,00012*\cos(45)$ olarak alınmıştır.

Analitik model içerisinde betonun taşıyabileceği moment değeri, betonun eğilmede çekme dayanımının $f_{ctf} = 0,65\sqrt{f_{ck}}$ olduğu kabulü ile Denklem 7.11'de verilmiştir.

$$T_{cr_c} = S.0,65.\sqrt{f_{ck}} \quad (7.11)$$

Sonuç olarak FRP sargılanarak hem enine hem de boyuna olarak güçlendirilen betonarme kirişlerin çatlama dayanımının önceden tahmin edilmesi için önerilen analitik model Denklem 7.12'de verilmiştir.

$$T_{cr}' = T_{cr_c} + \omega_t.T_{cr_t} + \omega_l.T_{cr_l} \quad (7.12)$$

Burada ω_t ve ω_l sırasıyla enine ve boyuna yapıştırma etkinlik faktörüdür. Etkinlik faktörleri kullanılan FRP'nin elastisite modülü ve betonun elastisite modülünün bir fonksiyonudur. Betonun elastisite modülü $E_c = 5500.\sqrt{f_{ck}}$ olarak kabul edilmiştir.

Etkinlik faktörlerinin belirlenmesinde kullanılan eşitlikler Denklem 7.13'te verilmiştir.

$$\omega_t = \frac{E_t}{4.(5500.\sqrt{f_{ck}})} \quad \text{ve} \quad \omega_l = \frac{E_l}{4.(5500.\sqrt{f_{ck}})} \quad (7.13)$$

Enine ve boyuna FRP yapıştırılmış betonarme kirişin çatlama momentinin hesaplanması için Denklem 7.12'de verilen eşitlik kullanılarak tüm numunelere ait çatlama momentinin analitik hesabı ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması normal dayanımlı betonlar için Tablo 7.3'te yüksek dayanımlı betonlar için Tablo 7.4'te verilmiştir.

Tablo 7.3: Normal Dayanımlı Numuneler İçin Önerilen Analitik Model Kullanılarak Hesaplanan Çatlama Momenti Değerleri

Numune Adı	Deneysel T_{cr_den} (kN.m)	Önerilen Analitik Model (kN.m)				
		T_{cr_c} (Denk 6.11)	$\omega_t T_{cr_t}$ (Denk 6.8)	$\omega_l T_{cr_l}$ (Denk 6.10)	T_{cr}' (Denk 6.12)	$\frac{T_{cr_den}}{T_{cr}'}$
A-REF 1	3,990	5,053	0,000	0,000	5,053	0,79
A-REF 2	4,600	5,342	0,000	0,000	5,342	0,86
A-N1G-L0	4,720	5,053	0,015	0,000	5,068	0,93
A-N2G-L0	5,420	5,342	0,028	0,000	5,370	1,01
A-N1G-L1G	5,700	5,342	0,014	0,008	5,364	1,06
A-N2G-L1G	5,700	5,053	0,029	0,008	5,091	1,12
A-N1CN-L0	5,440	5,305	0,115	0,000	5,420	1,00
A-N1CN-L1CN	5,330	5,305	0,115	0,066	5,486	0,97
A-N1CH-L0	5,550	5,204	0,994	0,000	6,199	0,90
A-N1CH-L1CH	6,740	5,204	0,994	0,568	6,767	1,00
A-N1G-L1CN	6,350	5,305	0,014	0,066	5,385	1,18
A-N1G-L1CH	6,240	5,204	0,014	0,568	5,787	1,08

Tablo 7.4: Yüksek Dayanımlı Numuneler İçin Önerilen Analitik Model Kullanılarak Hesaplanan Çatlama Momenti Değerleri

Numune Adı	Deneysel T_{cr_den} (kN.m)	Önerilen Analitik Model (kN.m)				
		T_{cr_c} (Denk 6.11)	$\omega_f T_{cr_f}$ (Denk 6.8)	$\omega_l T_{cr_l}$ (Denk 6.10)	T_{cr}' (Denk 6.12)	$\frac{T_{cr_den}}{T_{cr}'}$
B-REF 1	7,240	7,174	0,000	0,000	7,174	1,01
B-REF 2	7,330	7,478	0,000	0,000	7,478	0,98
B-N1G-L0	7,480	7,478	0,010	0,000	7,488	1,00
B-N2G-L0	7,390	7,478	0,020	0,000	7,498	0,99
B-N1G-L1G	9,130	7,072	0,010	0,006	7,088	1,29
B-N2G-L1G	8,590	7,072	0,021	0,006	7,099	1,21
B-N1CN-L0	8,020	7,558	0,080	0,000	7,638	1,05
B-N2CN-L0	7,520	7,616	0,160	0,000	7,776	0,97
B-N1CN-L1CN	7,830	7,558	0,080	0,046	7,684	1,02
B-N2CN-L1CN	8,090	7,558	0,161	0,046	7,765	1,04
B-N1CH-L0	7,220	7,616	0,680	0,000	8,296	0,87
B-N1CH-L1CH	7,740	7,616	0,680	0,388	8,684	0,89
B-N1G-L1CN	8,740	7,072	0,010	0,049	7,132	1,23
B-N1G-L1CH	8,040	7,174	0,010	0,412	7,597	1,06

FRP kullanılarak enine ve boyuna yapııştırma yapılan betonarme kirişlerin çatlama momentlerinin hesabı için Denklem 7.12'de önerilen eşitlik kullanılarak hazırlanan Tablo 7.3 ve 7.4'te verilen analitik ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığı zaman önerilen analitik modelin deneyler sonucunda elde edilen değerlere çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Önerilen analitik model kullanılarak, enine ve boyuna yapııştırılarak güçlendirilmesi yapılan normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin çatlama momenti değerleri yaklaşık olarak önceden hesaplanabilmektedir.

7.2.2. Burulma momenti kapasitesi hesabı için önerilen analitik model

FRP kullanılarak güçlendirilmesi yapılan 12 adet normal ve 14 adet yüksek dayanımlı betonarme kirişe ait basit burulma deneyleri sonucunda elde edilen burulma momenti kapasitesi değerlerinin önceden belirlenmesi amacıyla deneysel sonuçlar kullanılarak bu çalışma kapsamında bir analitik model önerilmiştir. Önerilen analitik modelin başlangıç noktası olarak TS500/2000'de burulma momenti altında betonarme kirişte bulunması gereken etriye miktarı ve boy donatı miktarına ait eşitlikler kullanılmıştır (Denklem 7.5 ve 7.6).

Önerilen Burulma momenti kapasitesi hesabında kesit çatlayıp maksimum burulma momenti kapasitesine ulaştığında; i.) agrega sürtünmesi ve donatı kafesi tarafından taşınan moment ii.) enine sargılanan FRP'nin taşıdığı moment iii.) boyuna yapıştırılan FRP'nin taşıdığı moment, değerleri ayrı ayrı göz önüne alınmıştır.

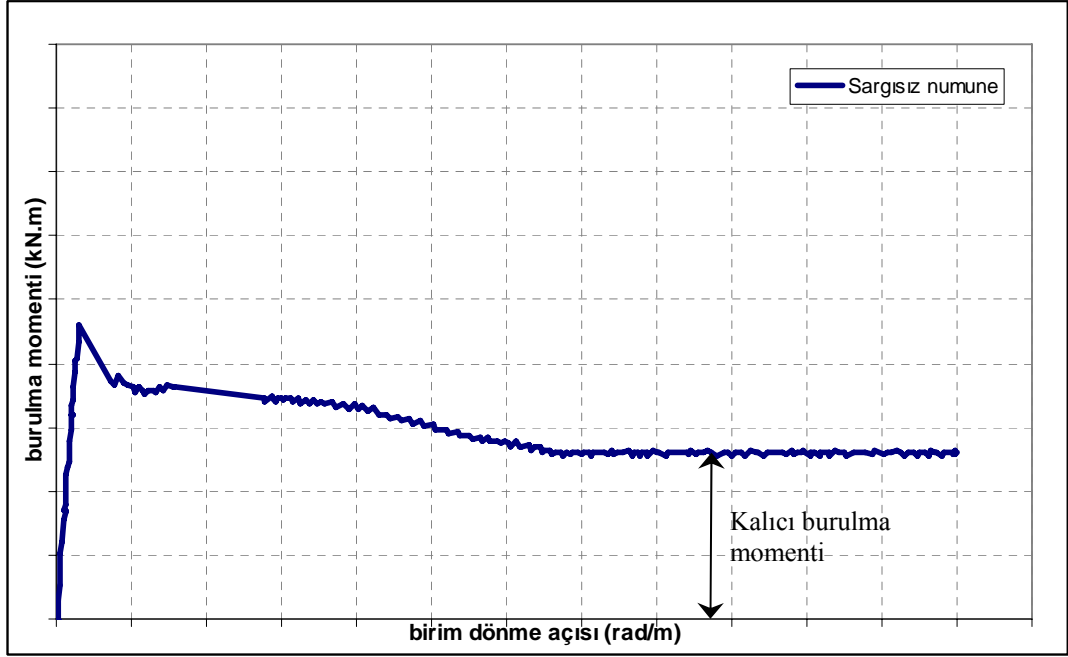
Betonarme kirişin çatladıktan sonra boy uzamasının sınırlandırıldığı dolayısıyla çatlayan kesitin iki yüzünün birbirleri üzerinde sürtünerek döndüğü kabul edilmiştir. Bundan dolayı beton ve kiriş içerisinde yer alan donatı kafesinin kompozit katkısıyla taşınan burulma momenti değeri (T_{u_c}), betonarme kirişin çatlama momenti değerinin hesaplandığı Denklem 7.11 kullanılarak hesaplanmıştır. Ancak çatlak oluşuktan sonra çatlama momenti kapasitesinde de düşüş olmasından dolayı bu denklem k_I katsayı ile çarpılarak küçültülmüştür. Burulma momentine kompozitin katkısı Denklem 7.14'te gösterildiği şekilde alınmıştır.

$$T_{u_c} = k_I \cdot S \cdot 0,65 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (7.14)$$

Burada k_I , kompozitin burulma momenti katkısı için çatlama momenti küçültme faktörüdür. Bu değer NDB ve YDB sargılanmamış kirişlerin basit burulma deneyleri sonucunda elde edilen değerler göz önüne alınarak belirlenmiştir. NDB sargısız numunelerin burulma momenti – birim dönme açısı grafiği incelendiğinde (Şekil 5.1), bu kirişlere ait taşınan kalıcı burulma momenti değeri yaklaşık olarak 2,25 kN.m ve ortalama basınç dayanımı 26 MPa olarak bulunmuştur. YDB sargısız numunelerin burulma momenti – birim dönme açısı grafiği incelendiğinde (Şekil 5.7), bu kirişlere ait taşınan kalıcı burulma momenti değeri yaklaşık olarak 3,00 kN.m ve ortalama basınç dayanımı 56 MPa olarak bulunmuştur. Taşınan kalıcı burulma momenti miktarları Şekil 7.1'de verilen burulma momenti – birim dönme açısı grafiğinde gösterildiği gibi belirlenmiştir. Taşınan kalıcı moment değeri ve ortalama basınç dayanımı ilişkisi incelendiği zaman k_I değeri Tablo 7.5'te tanımlandığı şekilde alınmıştır.

Tablo 7.5: Kompozitin Burulma Momenti Katkısı İçin Çatlama Momenti Küçültme Faktörü

	26 MPa < f_{ck}	26 MPa < f_{ck} < 56 MPa	f_{ck} > 56 MPa
k_I	0,45	0,45 – [(f_{ck} – 26).0,0013]	0,40



Şekil 7.1: Güçlendirilmemiş numunelerde kalıcı burulma momenti değeri

Kullanılan enine ve boyuna FRP yapıştırılmalarının etkinliklerinin bir göstergesi olan sargı hacimsel oranı, enine ve boyuna yapıştırmanın burulma momenti kapasitesine katkısının hesaplanmasında göz önünde bulundurulmuştur. Hesaplarda kullanılan enine ve boyuna yapıştırma hacimsel oranı sırasıyla Denklem 7.15 ve 7.16'da verilmiştir.

$$\rho_t = \frac{2 \cdot (t_t \cdot b_t)}{b \cdot h} \quad (7.15)$$

$$\rho_l = \frac{n \cdot (t_l \cdot b_l)}{b \cdot h} \quad (7.16)$$

Burada n boy şeridin yapıştırıldığı yüzey sayısını göstermektedir ancak bu sayı 4'ten küçük olamaz yani boyuna yapıştırma kirişin 4 yüzüne de yapıştırılmış olması gerekmektedir. t_t enine yapıştırılan FRP şeridinin bir tanesine ait kalınlık, b_t enine yapıştırılan FRP şeridinin bir tanesine ait genişliktir. t_l boyuna yapıştırılan FRP şeridinin bir tanesine ait kalınlık, b_l boyuna yapıştırılan FRP şeridinin bir tanesine ait genişliktir. Etriyenin burulma momenti kapasitesi için öngörülen donatı aralığı (s) kiriş etkili derinliğinin yarısından küçük olmalı şartına benzer şekilde enine sargının burulmada etkin olabilmesi için de enine sargı aralığının (s_f) kiriş etkili derinliğinin

yarısından küçük olma şartı geçerlidir. Enine sargılanan FRP şeritleri arasındaki mesafe kiriş etriye derinliğinin yarısından küçükse enine sargılamanın burulma momenti kapasitesine etkisi Denklem 7.17 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$T_{F_t} = \rho_t \cdot b^2 \cdot h \cdot \varepsilon_{F_{tu}} \cdot E_t \quad (7.17)$$

Burada; T_{F_t} enine sargılama yapılarak karşılanan burulma momenti kapasitesi değeri, ρ_t enine sargılama hacimsel oranı, b ve h kiriş boyutları, $\varepsilon_{F_{tu}}$ enine sargılama yapılan FRP'ye ait üretici tanımlı maksimum birim deformasyon miktarı, E_t enine sargılama yapılan FRP'ye ait elastisite modülü değeridir.

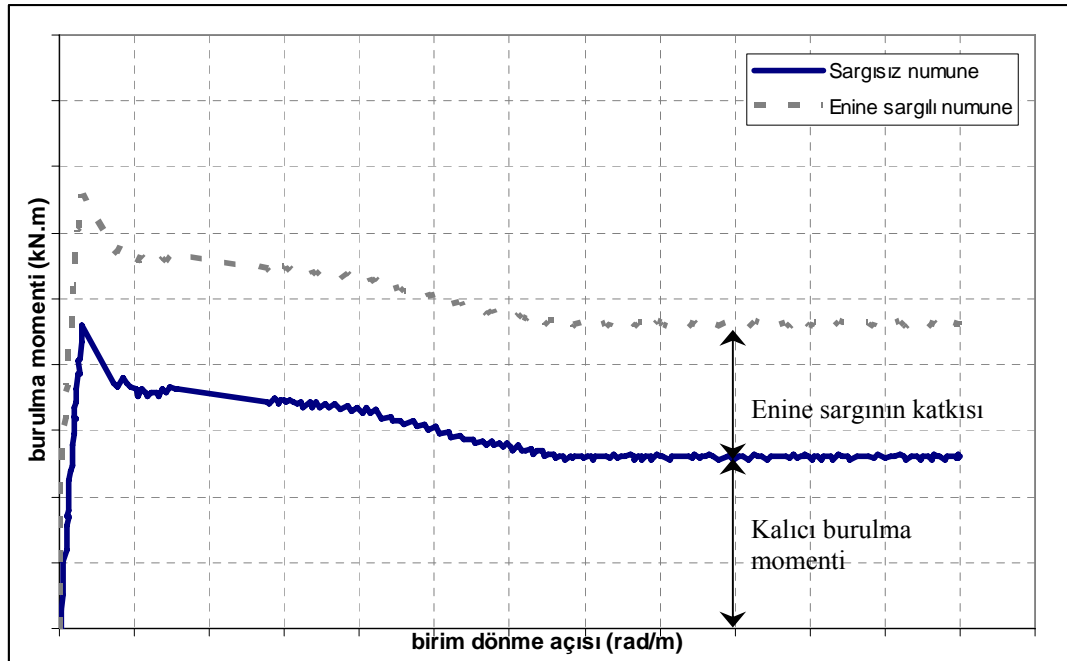
Yapılmış olan deneysel çalışmalar ve literatür araştırmaları sonucu, enine sargılanan FRP şeritlerinin maksimum birim deformasyon miktarına ulaşmadan çok daha düşük birim deformasyon ve yük miktarlarında koştukları belirlenmiştir. Bu bilgi göz önünde bulundurulduğu zaman enine sargının burulma kapasitesi miktarının k_2 katsayısı ile çarpılarak küçültülmesi gerekmektedir. k_2 katsayısı enine sargılanan FRP için etkinlik katsayısı olarak tanımlanmıştır ve FIB'nin 2007 tarihli Betonarme Yapılar için FRP ile Güçlendirme yayınında yer alan etkinlik katsayısı eşitliği dikkate alınarak Denklem 7.18'de gösterildiği şekilde düzenlenmiştir.

$$k_2 = \alpha_t \cdot \left(\frac{0,65 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{E_t \cdot \rho_t} \right)^{\beta_t} \quad (7.18)$$

Burada α_t ve β_t enine sargılama yapılan FRP şeridinin burulma kapasitesi için etkinlik katsayısı olan k_2 katsayısına ait ampirik değerlerdir. Bu iki değerde yapılmış olan basit burulma deneyleri sonucunda elde edilen değerler göz önünde bulundurularak GFRP, CFRP-N ve CFRP-H sargı tipleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

k_2 katsayısı için; sadece enine sargılama yapılarak güçlendirilen kirişlerde, burulma momenti kapasitesi değerlerinden taşınan kalıcı burulma momenti miktarı değerleri çıkartılarak sadece enine sargılama yapılarak elde edilen burulma momenti artışı

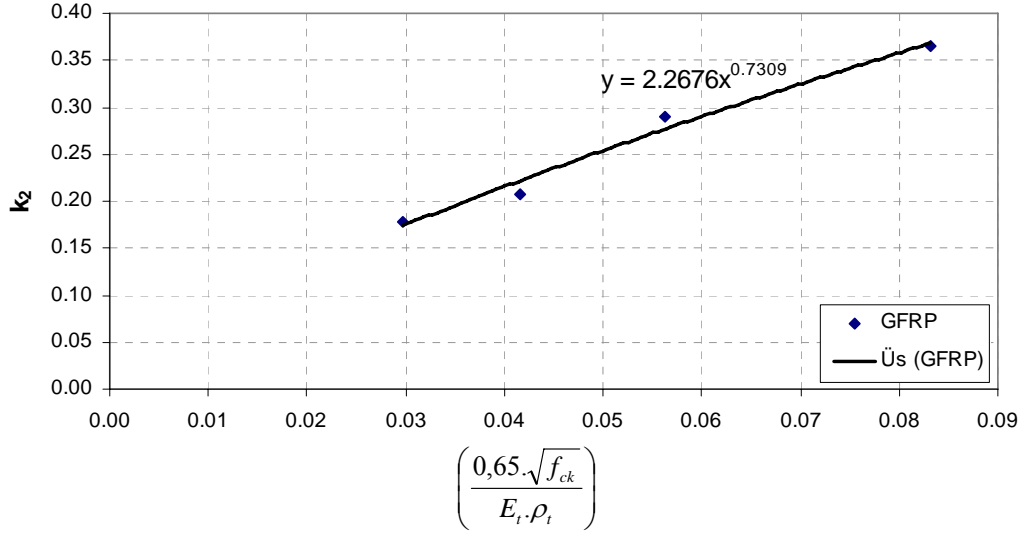
değerleri bulunmuştur (Şekil 7.2). Bulunan bu değer, enine sargılama yapılarak karşılanan burulma momenti kapasitesi değerine (T_{F_t}) bölünerek küçültme faktörü olan k_2 değeri sadece enine sargılanan numuneler için belirlenmiştir. Enine sargı olarak GFRP, CFRP-N ve CFRP-H kullanılan numunelere ait deneysel değerler Tablo 7.6'da özetlenmiştir. Bu numunelere ait k_2 katsayısının hesaplanmasında kullanılan α_t ve β_t ampirik değerlerinin elde edildiği grafikler GFRP için Şekil 7.3, CFRP-N için Şekil 7.4 ve CFRP-H için Şekil 7.5'te gösterilmiştir. Her üç grafikte bulunan değerler içerinden en uygun eğri geçirilerek grafik üzerinde elde edilen α_t ve β_t değerleri gösterilmiştir.



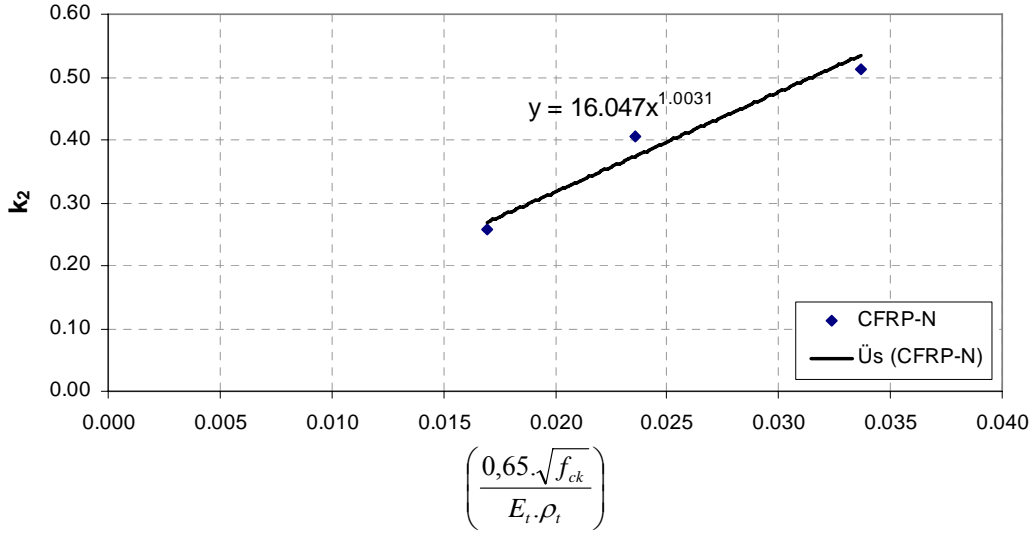
Şekil 7.2: Enine sargılı numunelerde burulma momenti kapasitesi katkı oranları

Tablo 7.6: k_2 Hesabında α_t ve β_t Değerlerinin Elde Edilmesi İçin Kullanılan Deneysel Değerler

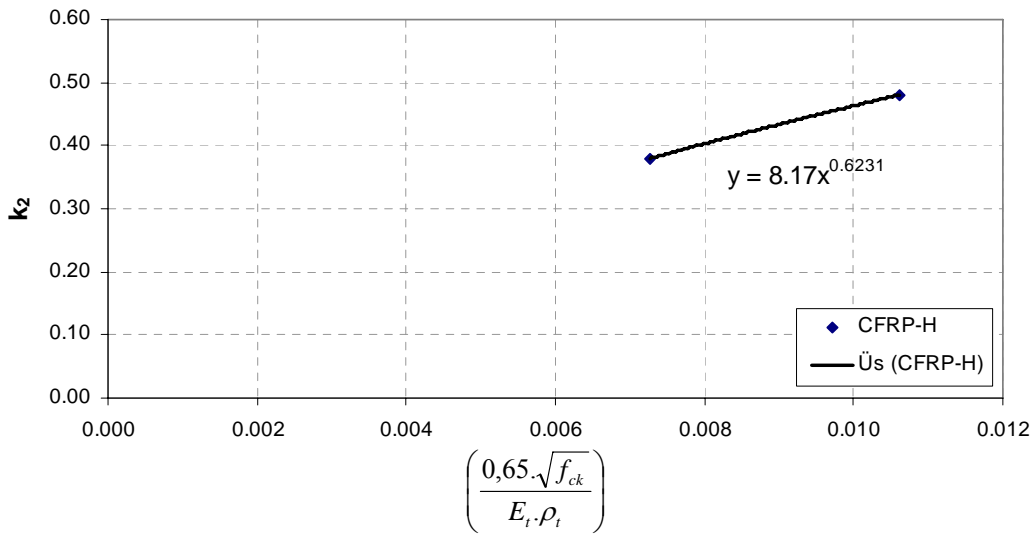
Enine Sargı Tipi	Numune Adı	k_2 Değerleri	$\left(\frac{0,65 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{E_t \cdot \rho_t} \right)$ Değerleri
GFRP	A-N1G-L0	0,2901	0,05619
	A-N2G-L0	0,1781	0,02970
	B-N1G-L0	0,3652	0,08315
	B-N2G-L0	0,2077	0,04158
CFRP-N	A-N1CN-L0	0,4066	0,02362
	B-N1CN-L0	0,5135	0,03364
	B-N2CN-L0	0,2575	0,01695
CFRP-H	A-N1CH-L0	0,3796	0,00726
	B-N1CH-L0	0,4812	0,01063



Şekil 7.3: GFRP enine sargıda k_2 katsayısı için α_t ve β_t değerleri



Şekil 7.4: CFRP-N enine sargıda k_2 katsayısı için α_t ve β_t değerleri



Şekil 7.5: CFRP-H enine sargıda k_2 katsayısı için α_t ve β_t değerleri

k_2 katsayısı için grafiklerden elde edilen tüm α_t ve β_t değerleri GFRP, CFRP-N ve CFRP-H sargı tipleri için ayrı ayrı Tablo 7.7’de özetlenmiştir.

Tablo 7.7: GFRP, CFRP-N ve CFRP-H Sargı Tipleri İçin α_t ve β_t Değerleri

Enine Sargı Tipi	α_t Değerleri	β_t Değerleri
GFRP	2,27	0,731
CFRP-N	16,05	1,003
CFRP-H	8,17	0,623

Boyuna yapıştırmanın burulma momenti kapasitesine etkisi Denklem 7.19 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$T_{F-l} = \rho_l \cdot \left(\frac{b^2 \cdot h^2}{b+h} \right) \cdot \varepsilon_{F-lu} \cdot E_l \quad (7.19)$$

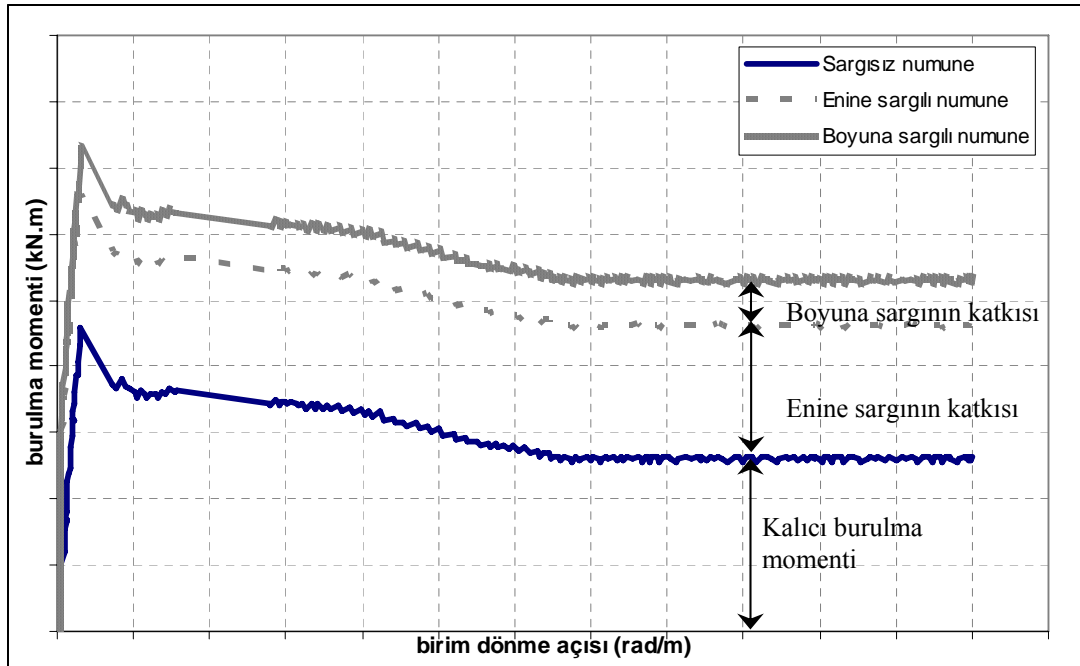
Burada; T_{F-l} boyuna yapıştırma yapılarak karşılanan burulma momenti kapasitesi değeri, ρ_l boyuna yapıştırma hacimsel oranı, b ve h kiriş boyutları, ε_{F-lu} boyuna yapıştırma yapılan FRP’ye ait üretici tanımlı maksimum birim deformasyon miktarı, E_l boyuna yapıştırma yapılan FRP’ye ait elastisite modülü değeridir.

Yapılmış olan deneysel çalışmalar ve literatür araştırmaları sonucu, boyuna yapıştırma yapılan FRP şeritlerinin maksimum birim deformasyon miktarına ulaşmadan çok daha düşük birim deformasyon ve yük miktarlarında koptukları belirlenmiştir. Bu bilgi göz önünde bulundurulduğu zaman boyuna yapıştırmanın burulma kapasitesi miktarının k_3 katsayısı ile çarpılarak küçültülmesi gerekmektedir. k_3 katsayısı boyuna yapıştırılan FRP için etkinlik katsayısı olarak tanımlanmıştır ve FIB’nin 2007 tarihli Betonarme Yapılar için FRP ile Güçlendirme yayınında yer alan etkinlik katsayısı eşitliği dikkate alınarak Denklem 7.20’de gösterildiği şekilde düzenlenmiştir.

$$k_3 = \alpha_l \cdot \left(\frac{0,65 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{E_l \cdot \rho_l} \right)^{\beta_l} \quad (7.20)$$

Burada α_l ve β_l boyuna yapıştırma yapılan FRP şeridinin burulma kapasitesi için etkinlik katsayısı olan k_3 katsayısına ait ampirik değerlerdir. Bu iki değerde yapılmış olan basit burulma deneyleri sonucunda elde edilen değerler göz önünde bulundurularak normal ve yüksek dayanımlı betonlar için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Deneysel sonuçları üzerinde yapılan incelemeler boyuna yapıştırmanın etkinlik katsayısının beton basınç dayanımı ile ilişkisinin daha yakın olduğunu göstermiştir.

k_3 katsayısı için; hem enine hem de boyuna yapıştırma yapılarak güçlendirilen kirişlerde, burulma momenti kapasitesi değerinden taşınan kalıcı burulma momenti değeri ve enine sargı ile taşınan burulma momenti değeri çıkarılarak sadece boyuna yapıştırma ile taşınan burulma momenti değeri elde edilmiştir (Şekil 7.6). Bulunan bu değer, boyuna yapıştırma yapılarak karşılanan burulma momenti kapasitesi değerine (T_{F_l}) bölünerek küçültme faktörü olan k_3 değeri hem enine hem de boyuna yapıştırma uygulanan numuneler için belirlenmiştir.



Şekil 7.6: Enine sargılı numunelerde burulma momenti kapasitesi katkı oranları

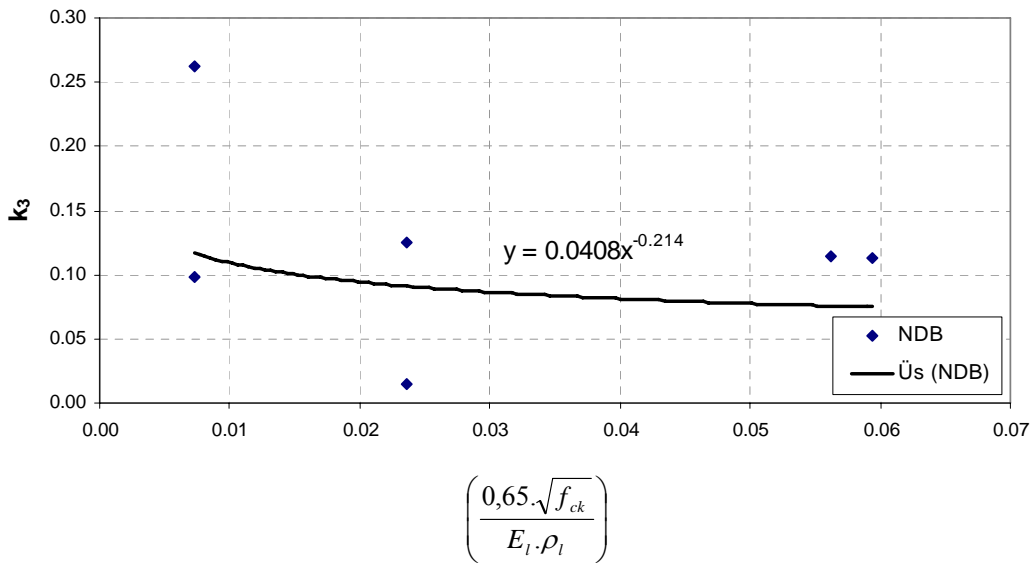
Normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişlere ait deneysel değerler Tablo 7.8'de özetlenmiştir. Tablo 7.8 içerisinde verilen deneysel değerler kullanılarak normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişler için k_3 katsayısını belirlemek amacıyla sırasıyla

Şekil 7.7 ve 7.8’de verilmiş olan grafikler çizilmiştir. Her iki grafikte bulunan değerler içerinden en uygun eğri geçirilerek grafik üzerinde elde edilen α_l ve β_l değerleri gösterilmiştir.

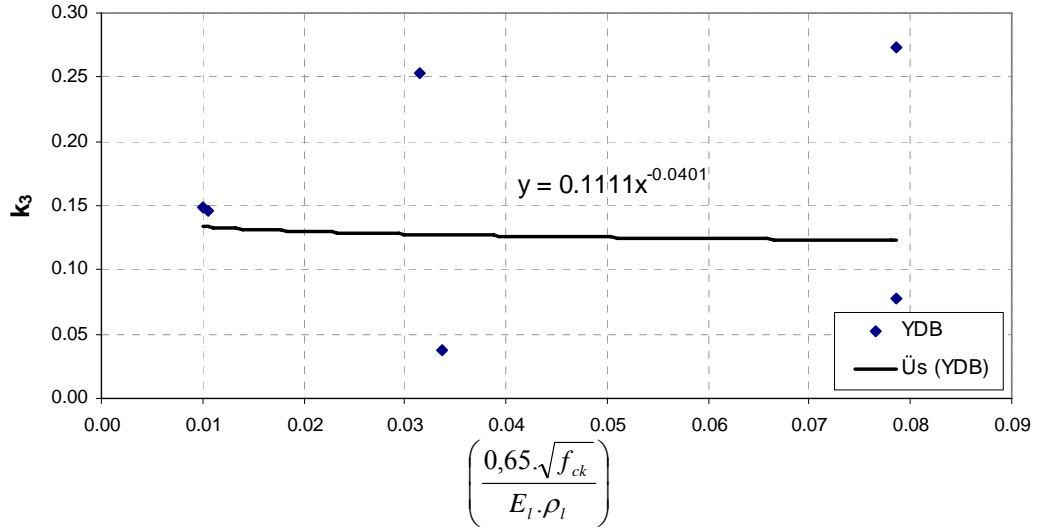
Tablo 7.8: k_3 Hesabında α_l ve β_l Değerlerinin Elde Edilmesi İçin Kullanılan Deneysel Değerler

Beton Basınç Dayanımı	Numune Adı	k_3 Değerleri	$\left(\frac{0,65 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{E_t \cdot \rho_t}\right)$ Değerleri
$f_{ck} < 35 \text{ MPa}$ (NDB)	A-N1G-L1G	0,1132	0,05940
	A-N2G-L1G	0,1144	0,05619
	A-N1CN-L1CN	0,0154	0,02362
	A-N1CH-L1CH	0,2623	0,00726
	A-N1G-L1CN	0,1250	0,02362
	A-N1G-L1CH	0,0981	0,00726
$35 \text{ MPa} < f_{ck} < 69 \text{ MPa}$ (YDB)	B-N1G-L1G	0,2734	0,07863
	B-N2G-L1G	0,0774	0,07863
	B-N2CN-L1CN	0,0377	0,03364
	B-N1CH-L1CH	0,1460	0,01063
	B-N1G-L1CN	0,2525	0,03148
	B-N1G-L1CH	0,1493	0,01001

Şekil 7.7 ve 7.8 üzerinde gösterilen her iki beton basınç dayanımına ait k_3 değerlerinin hesaplanması amacıyla belirlenen α_l ve β_l değerleri Tablo 7.9’da özetlenmiştir.



Şekil 7.7: NDB kirişlerde boyuna yapıştırmada k_3 katsayısı için α_l ve β_l değerleri



Şekil 7.8: YDB kirişlerde boyuna yapıştırmada k_3 katsayısı için α_l ve β_l değerleri

Tablo 7.9: NDB ve YDB Kirişler İçin α_l ve β_l Değerleri

Beton Basınç Dayanımı	α_l Değerleri	β_l Değerleri
NDB	0,04	-0,214
YDB	0,11	-0,040

Analitik olarak elde edilen k_3 değerleri kullanılarak numuneye ait birim deformasyon değerleri, deney sırasında ölçümleri alınan deney bölgesine ait toplam boy uzaması (ΔL) miktarları kullanılarak da elde edilebilir. Analitik olarak elde edilen k_3 değerlerini karşılaştırmak amacıyla, boy yapıştırmanın bulunduğu normal ve yüksek dayanımlı kirişlere ait Bölüm 5.2.'de yer alan burulma momenti – toplam boy uzama grafikleri kullanılmıştır. Bu numunelere ait maksimum burulma momenti değerine karşılık gelen toplam boy uzaması miktarları belirlenmiştir. Bu değerler deney bölgesi uzunluğuna bölünerek deneysel ortalama birim deformasyon miktarları ($\varepsilon_{den,l}$) hesaplanmıştır. Deneysel birim deformasyon miktarları, k_3 katsayısı ile boyuna yapıştırma olarak kullanılan FRP'nin üretici tanımlı maksimum birim deformasyon miktarlarının çarpımı ile karşılaştırılmıştır. Yapılan işlemler Tablo 7.10'da özetlenmiştir. B-N1G-L1G ve B-N1G-L1CN numunelerine ait toplam boy uzama grafikleri incelendiği zaman bu numunelerde maksimum burulma momenti miktarına karşılık gelen toplam boy uzamanın sıfır olduğu yani çatlama momenti değerinden sonra moment kapasitesinde artış olmadığı görülmektedir. Bu nedenle bu numunelere ait değerler analitik ve deneysel birim deformasyon değerlerinin karşılaştırılmasında göz önüne alınmamıştır.

Tablo 7.10: Deneysel ve Analitik k_3 Değerlerinin Karşılaştırılması

Numune Adı	ΔL (mm)	ϵ_{den_l}	k_3	ϵ_{F_lu}	$\epsilon_{ana} = k_3 * \epsilon_{F_lu}$	$\epsilon_{den_l} / \epsilon_{ana}$
A-N1G-L1G	2,291	0,00244	0,073	0,045	0,00329	0,74
A-N2G-L1G	2,720	0,00289	0,074	0,045	0,00333	0,87
A-N1G-L1CN	1,080	0,00115	0,089	0,016	0,00142	0,81
A-N1CN-L1CN	1,641	0,00175	0,089	0,016	0,00142	1,23
A-N1G-L1CH	0,653	0,00069	0,115	0,004	0,00046	1,51
A-N1G-L1G	2,291	0,00244	0,073	0,045	0,00329	0,74
B-N2G-L1G	3,127	0,00333	0,122	0,045	0,00549	0,61
B-N1CN-L1CN	2,158	0,00230	0,126	0,016	0,00202	1,14
B-N1G-L1CH	0,052	0,00005	0,132	0,004	0,00053	0,10

Burulma momenti kapasitesinin belirlenmesi için önerilen analitik model içerisinde boyuna yapıştırılan FRP'ye ait maksimum birim deformasyon değerleri kullanılmıştır. Ancak deneysel çalışmalar ve literatür araştırmaları FRP'lerin bu birim deformasyon miktarların daha düşük değerlerde koptuğunu göstermektedir. Bu nedenle küçültme faktörü olarak kullanılan k_3 katsayısı ile FRP'ye ait maksimum birim deformasyon değerleri çarpıldığında FRP'nin taşıdığı gerçek birim deformasyon değerleri elde edilmektedir. Tablo 7.10 incelendiği zaman; deneysel olarak elde edilen birim deformasyon değerleri ile k_3 katsayısı kullanılarak analitik olarak elde edilen birim deformasyon değerlerinin yaklaşık olarak yakın değerler verdiği görülmektedir. Tablo 7.10 içerisinde deneysel ve analitik birim deformasyon oranlarında bazı sapmalar görülmektedir. Bu sapmaların nedeni Şekil 7.7 ve 7.8'de verilen grafiklerdeki bazı numunelere ait değerlerde gözlenen farklılıklar olarak gösterilebilir. Sonuç olarak deneysel ve analitik birim deformasyon oranları incelendiğinde; k_3 katsayısı kullanılarak hesaplanan, boyuna yapıştırmanın burulma momentine katkısının gerçek değerlere yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Elde edilen deneysel veriler kullanılarak enine ve boyuna yapıştırma yapılmış normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin burulma momenti kapasitelerinin önceden belirlenmesi amacıyla önerilen analitik model Denklem 7.21'de gösterilmiştir.

$$T'_u = k_1.T_{u_c} + k_2.T_{F_t} + k_3.T_{F_l} \quad (7.21)$$

Denklem 7.21’de önerilen analitik model kullanılarak, normal dayanımlı betonarme kirişler için hesaplanan burulma momenti kapasitesi Tablo 7.11’de ve yüksek dayanımlı betonarme kirişler için hesaplanan burulma momenti kapasitesi Tablo 7.12’de deneysel olarak elde edilen verilerle birlikte verilmiştir. Tablo 7.11 ve 7.12 içerisinde 3. sütunda Tablo 7.5 kullanılarak hesaplanan k_1 değeri ile Denklem 7.14 kullanılarak hesaplanan betonun taşıdığı burulma momenti miktarı değerinin çarpımı, 4. sütunda Tablo 7.7 ve Denklem 7.18 kullanılarak hesaplanan k_2 değeri ile Denklem 7.17 kullanılarak hesaplanan enine sargının karşıladığı burulma momenti kapasitesi değerinin çarpımı, 5. sütunda Tablo 7.9 ve Denklem 7.20 kullanılarak hesaplanan k_3 değeri ile Denklem 7.19 kullanılarak hesaplanan boyuna yapıştırmanın karşıladığı burulma momenti kapasitesi değerinin çarpımı, 6.sütunda ise bu değerlerin toplamı sonucunda analitik olarak elde edilen burulma momenti kapasitesi değeri verilmiştir.

Tablo 7.11: Normal Dayanımlı Numuneler İçin Önerilen Analitik Model Kullanılarak Hesaplanan Burulma Momenti Kapasitesi Değerleri

Numune Adı	Deneysel T_{u_den} (kN.m)	Önerilen Analitik Model (kN.m)				
		$k_1 T_{u_c}$	$k_2 T_{F_t}$	$k_3 T_{F_l}$	T_u'	$\frac{T_{u_den}}{T_u'}$
A-N1G-L0	5,790	2,268	3,359	0,000	5,628	1,03
A-N2G-L0	6,700	2,376	4,216	0,000	6,592	1,02
A-N1G-L1G	6,660	2,376	3,499	0,508	6,383	1,04
A-N2G-L1G	7,110	2,268	4,048	0,514	6,830	1,04
A-N1CN-L0	6,610	2,363	3,915	0,000	6,278	1,05
A-N1CN-L1CN	6,370	2,363	3,915	0,532	6,810	0,94
A-N1CH-L0	5,590	2,325	3,267	0,000	5,592	1,00
A-N1CH-L1CH	6,740	2,325	3,267	0,564	6,156	1,09
A-N1G-L1CN	6,590	2,363	3,481	0,532	6,376	1,03
A-N1G-L1CH	6,240	2,325	3,433	0,564	6,322	0,99

Tablo 7.12: Yüksek Dayanımlı Numuneler İçin Önerilen Analitik Model Kullanılarak Hesaplanan Burulma Momenti Kapasitesi Değerleri

Numune Adı	Deneysel T_{u_den} (kN.m)	Önerilen Analitik Model (kN.m)				
		$k_1 T_{u_c}$	$k_2 T_{F_I}$	$k_3 T_{F_I}$	T_u'	$\frac{T_{u_den}}{T_u'}$
B-N1G-L0	7,480	2,991	4,474	0,000	7,466	1,00
B-N2G-L0	8,090	2,991	5,391	0,000	8,383	0,97
B-N1G-L1G	9,130	2,938	4,295	0,845	8,078	1,13
B-N2G-L1G	8,650	2,938	5,176	0,845	8,958	0,97
B-N1CN-L0	8,430	3,023	5,584	0,000	8,607	0,98
B-N2CN-L0	8,460	3,046	5,615	0,000	8,662	0,98
B-N1CN-L1CN	7,830	3,023	5,584	0,752	9,359	0,84
B-N2CN-L1CN	8,820	3,023	5,572	0,752	9,347	0,94
B-N1CH-L0	7,220	3,046	4,142	0,000	7,189	1,00
B-N1CH-L1CH	7,740	3,046	4,142	0,648	7,837	0,99
B-N1G-L1CN	8,740	2,938	4,295	0,754	7,987	1,09
B-N1G-L1CH	8,040	2,966	4,340	0,650	7,956	1,01

FRP kullanılarak enine ve boyuna yapıştırma yapılan betonarme kirişlerin burulma momenti kapasitelerinin hesabı için Denklem 7.21’de önerilen eşitlik kullanılarak hazırlanan Tablo 7.10 ve 7.11’de verilen analitik ve deneysel sonuçlar karşılaştırıldığı zaman önerilen analitik modelin deneyler sonucunda elde edilen değerlere çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Önerilen analitik model kullanılarak, enine ve boyuna yapıştırma ile güçlendirilmesi yapılan normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin burulma momenti kapasitesi değerleri yaklaşık olarak önceden hesaplanabilmektedir.

7.3. Analitik Model Karşılaştırması

Bu bölümde çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesinin hesabı için önerilen analitik modellerden elde edilen sonuçlar Saravanan Panchacharam ve Abdeldjelil Belarbi [25] ve Constantin E. Chalioris [8] tarafından yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Panchacharam ve Belarbi yaptıkları deneysel çalışma sonucunda çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesi değeri için bir analitik model önermişlerdir. Bu çalışma kapsamında önerilen analitik model, Panchacharam ve Belarbi tarafından yapılan deneylerin sonuçlarıyla ve önerdikleri

analitik modelden elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Chalioris tarafından yapılan çalışma sonucunda elde edilen deneysel veriler bu çalışma kapsamında önerilen analitik model kullanılarak hesaplanan çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesi değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Panchacharam ve Belarbi tarafından çatlama momenti için Denklem 7.22 ve burulma momenti kapasitesi hesabı için Denklem 7.23 önerilmiştir. Ancak bu denklemler sadece betonarme kirişe enine sargılama yapılması durumunda, yapılan enine sargının burulma kapasitesine katkısını göz önünde bulundurmaktadır.

$$T_{cr_panc} = c_1 \cdot b^2 \cdot h \cdot f_{ctf} \cdot \sqrt{1 + \frac{\text{efektif _ önerilme}}{f_{ctf}}} \quad (7.22)$$

$$T_{u_panc} = \frac{2 A_e A_{ot} f_{yw}}{s} \cot(\theta) + 2 \cdot \varepsilon_{ke,f} \cdot E_{fu} \frac{t_f \cdot b_f}{s_f} \cdot b \cdot h \cdot \cot(\theta) \quad (7.23)$$

Çatlama momenti hesabı için önerilen Denklem 7.12 ile 7.22 kullanılarak sadece enine sargılanmış olan normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişler için elde edilen çatlama momenti değerleri, deney sonuçlarıyla birlikte Tablo 7.13'te verilmiştir.

Tablo 7.13: Enine FRP Sargılanmış Numunelerin Çatlama Momenti Hesabı İçin Analitik Modellerin Karşılaştırılması

Numune Adı	Deneysel T_{cr_den} (kN.m)	T_{cr}' (kN.m) (Denk 6.12)	$\frac{T_{cr_den}}{T_{cr}'}$	T_{cr_panc} (kN.m) (Denk 6.24)	$\frac{T_{cr_den}}{T_{cr_panc}}$
A-REF 1	3,990	5,053	0,79	5,060	0,79
A-REF 2	4,600	5,342	0,86	5,514	0,83
A-N1G-L0	4,720	5,068	0,93	6,434	0,73
A-N2G-L0	5,420	5,370	1,01	6,900	0,79
A-N1CN-L0	5,440	5,420	1,00	9,015	0,60
A-N1CH-L0	5,550	6,199	0,90	13,205	0,42
B-REF 1	7,240	7,174	1,01	6,451	1,12
B-REF 2	7,330	7,478	0,98	7,056	1,04
B-N1G-L0	7,480	7,488	1,00	8,474	0,88
B-N2G-L0	7,390	7,498	0,99	8,474	0,87
B-N1CN-L0	8,020	7,638	1,05	10,709	0,75
B-N2CN-L0	7,520	7,776	0,97	10,799	0,70
B-N1CH-L0	7,220	8,296	0,87	15,276	0,47

Burulma momenti kapasitesi hesabı için önerilen Denklem 7.21 ile 7.23 kullanılarak sadece enine sargılanmış olan normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişler için elde edilen burulma momenti kapasitesi değerleri, deney sonuçlarıyla birlikte Tablo 7.14’de verilmiştir.

Tablo 7.14: Enine FRP Sargılanmış Numunelerin Burulma Momenti Kapasitesi Hesabı İçin Analitik Modellerin Karşılaştırılması

Numune Adı	Deneysel T_{u_den} (kN.m)	T_u' (kN.m) (Denk 6.23)	$\frac{T_{u_den}}{T_u'}$	T_{u_panc} (kN.m) (Denk 6.25)	$\frac{T_{u_den}}{T_{u_panc}}$
A-N1G-L0	5,790	5,628	1,03	7,815	0,74
A-N2G-L0	6,700	6,592	1,02	7,933	0,84
A-N1CN-L0	6,610	6,278	1,05	7,719	0,86
A-N1CH-L0	5,590	5,592	1,00	7,642	0,73
B-N1G-L0	7,480	7,466	1,00	7,882	0,95
B-N2G-L0	8,090	8,383	0,97	8,017	1,01
B-N1CN-L0	8,430	8,607	0,98	7,754	1,09
B-N2CN-L0	8,460	8,662	0,98	7,834	1,08
B-N1CH-L0	7,220	7,189	1,00	7,659	0,94

Tablo 7.13 incelendiğinde, çatlama momenti hesabı için önerilen ve Denklem 7.22’de gösterilen analitik model kullanılarak hesaplanan çatlama momenti değerlerine oranla Denklem 7.12’de önerilen analitik model kullanılarak hesaplanan çatlama momenti değerleri enine FRP sargılanmış normal ve yüksek dayanımlı kirişlerin deneysel sonuçlarına daha yakın değerler vermektedir. Tablo 7.14 incelendiğinde, burulma momenti kapasitesi hesabı için önerilen ve Denklem 7.23’de gösterilen analitik model kullanılarak hesaplanan burulma momenti kapasitesi değerlerine oranla Denklem 7.21’de önerilen analitik model kullanılarak hesaplanan değerler enine FRP sargılanmış normal ve yüksek dayanımlı kirişlerin deneysel sonuçlarına daha yakın değerler vermektedir.

Panchacharam ve Belarbi tarafından önerilen analitik model boyuna yapıştırma yapılan kirişleri kapsamamasına rağmen Denklem 7.22 kullanılarak yaklaşık bir çatlama momenti hesabı yapılmış ve Denklem 7.12’de önerilen analitik model ile karşılaştırılarak sonuçlar Tablo 7.15’te gösterilmiştir. Denklem 7.23 kullanılarak yaklaşık olarak burulma momenti kapasitesi hesabı yapılmış ve Denklem 7.21’de önerilen analitik model ile karşılaştırılarak sonuçlar Tablo 7.16’da gösterilmiştir.

Tablo 7.15: Boyuna FRP Yapıştırılmış Numunelerin Çatlama Momenti Hesabı İçin Analitik Modellerin Karşılaştırılması

Numune Adı	Deneysel T_{cr_den} (kN.m)	T_{cr}' (kN.m) (Denk 6.12)	$\frac{T_{cr_den}}{T_{cr}'}$	T_{cr_panc} (kN.m) (Denk 6.24)	$\frac{T_{cr_den}}{T_{cr_panc}}$
A-N1G-L1G	5,700	5,364	1,06	6,900	0,83
A-N2G-L1G	5,700	5,091	1,12	6,434	0,89
A-N1CN-L1CN	5,330	5,486	0,97	9,015	0,59
A-N1CH-L1CH	6,740	6,767	1,00	13,205	0,51
A-N1G-L1CN	6,350	5,385	1,18	6,621	0,96
A-N1G-L1CH	6,240	5,787	1,08	6,714	0,93
B-N1G-L1G	9,130	7,088	1,29	8,372	1,09
B-N2G-L1G	8,590	7,099	1,21	8,372	1,03
B-N1CN-L1CN	7,830	7,684	1,02	10,709	0,73
B-N2CN-L1CN	8,090	7,765	1,04	10,709	0,76
B-N1CH-L1CH	7,740	8,684	0,89	15,276	0,51
B-N1G-L1CN	8,740	7,132	1,23	8,372	1,04
B-N1G-L1CH	8,040	7,597	1,06	7,859	1,02

Tablo 7.16: Boyuna FRP Yapıştırılmış Numunelerin Burulma Momenti Kapasitesi Hesabı İçin Analitik Modellerin Karşılaştırılması

Numune Adı	Deneysel T_{u_den} (kN.m)	T_u' (kN.m) (Denk 6.23)	$\frac{T_{u_den}}{T_u'}$	T_{u_panc} (kN.m) (Denk 6.25)	$\frac{T_{u_den}}{T_{u_panc}}$
A-N1G-L1G	6,660	6,383	1,04	7,824	0,85
A-N2G-L1G	7,110	6,830	1,04	7,921	0,90
A-N1CN-L1CN	6,370	6,810	0,94	7,719	0,83
A-N1CH-L1CH	6,740	6,156	1,09	7,642	0,88
A-N1G-L1CN	6,590	6,376	1,03	7,823	0,84
A-N1G-L1CH	6,240	6,322	0,99	7,820	0,80
B-N1G-L1G	9,130	8,078	1,13	7,871	1,16
B-N2G-L1G	8,650	8,958	0,97	8,002	1,08
B-N1CN-L1CN	7,830	9,359	0,84	7,754	1,01
B-N2CN-L1CN	8,090	9,347	0,94	7,833	1,13
B-N1CH-L1CH	7,740	7,837	0,99	7,659	1,01
B-N1G-L1CN	8,740	7,987	1,09	7,871	1,11
B-N1G-L1CH	8,040	7,956	1,01	7,874	1,02

Tablo 7.15 ve 7.16’da verilen değerler incelendiği zaman; Panchacharam ve Belarbi tarafından çatlama ve burulma momenti kapasitesi hesabı için önerilen analitik model kullanılarak hesaplanan değerlere oranla bu çalışma kapsamında önerilen (Denklem 7.12 ve 7.21) analitik modeller kullanılarak hesaplanan değerler deneysel sonuçlara daha yakın değerler vermektedir.

Constantin E. Chalioris tarafından yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar, bu çalışma kapsamında çatlama ve burulma momenti kapasiteleri için önerilen Denklem 7.12 ve 7.21 ile hesaplanarak karşılaştırılmışlardır. Chalioris tarafından hazırlanmış olan 3 adet enine sargılı numuneye ait boyut ve malzeme özellikleri Tablo 7.17’de verilmiştir.

Tablo 7.17: Numune Boyutları ve Özellikleri (Chalioris, 2006)

Numune Adı	bxh (mm)	f_{ck} (MPa)	CFRP-N				
			t_t (mm)	b_t (mm)	E_t (MPa)	ϵ_{t_u}	s_f
Ra-Fs150(2)	100x200	27,5	0,22	150	230.000	0,015	300
Rb-Fs200(1)	150x300	28,8	0,11	200	230.000	0,015	400
Rb-Fs300(1)	150x300	28,8	0,11	300	230.000	0,015	450

Tablo 7.17’de özellikleri verilen numunelerin tümünde etriye kullanılmamıştır, boy donatı olarak da 4 adet Ø8’lik donatı kullanılmıştır. Analitik model kullanılarak numunelerin burulma momenti dayanımının hesaplanmasında donatının (etriye ve boy donatı) katkısı ihmal edilmiştir. Sadece çatlama sonrasında betonun burulma momenti kapasitesine katkısı ve enine sargılanan FRP’nin burulma momentine katkısı göz önüne alınmıştır. Tablo 7.18’de, Denklem 7.12 kullanılarak hesaplanan çatlama momenti değerleri deney sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 7.19’da, Denklem 7.21 kullanılarak hesaplanan burulma momenti kapasitesi değerleri deney sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak verilmiştir

Tablo 7.18: Önerilen Analitik Model Kullanılarak Hesaplanan Çatlama Momenti Değerleri

Numune Adı	Deneysel T_{cr_den} (kN.m)	Önerilen Analitik Model (kN.m)				
		T_{cr_c}	$\omega_t T_{cr_t}$	$\omega_l T_{cr_l}$	T_{cr}'	$\frac{T_{cr_den}}{T_{cr}'}$
Ra-Fs150(2)	2,219	2,272	0,171	0,000	2,444	0,91
Rb-Fs200(1)	6,278	7,849	0,188	0,000	8,037	0,78
Rb-Fs300(1)	6,960	7,849	0,251	0,000	8,100	0,86

Tablo 7.19: Önerilen Analitik Model Kullanılarak Hesaplanan Burulma Momenti Kapasitesi Değerleri

Numune Adı	Deneysel T_{u_den} (kN.m)	Önerilen Analitik Model (kN.m)				
		$k_1 T_{u_c}$	$k_2 T_{F_1}$	$k_3 T_{F_1}$	T_u'	$\frac{T_{cr_den}}{T_{cr}'}$
Ra-Fs150(2)	3,020	1,018	1,617	0,000	2,635	1,15
Rb-Fs200(1)	9,320	3,503	5,603	0,000	9,106	1,02
Rb-Fs300(1)	7,520	3,503	5,598	0,000	9,102	0,83

Chalioris tarafından yapılan deneysel çalışmanın sonuçları önerilen analitik model kullanılarak tekrar hesaplandığında sonuçların birbirlerine yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Deneysel verilerin analitik değerlerden küçük olmasının sebebi sargı aralığının artmasıyla çatlakların sargılanmamış büyük boşluklarda oluşmasıdır. Buda deneysel moment değerlerinde düşmeye neden olmaktadır.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

FRP kullanılarak sargılanan normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişler üzerinde yapılan basit burulma deneylerinden elde edilen verilerin incelenmesi sonucunda aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

1. Yüksek dayanımlı numunelerin çatlama ve burulma momenti kapasitesi değerleri normal dayanımlı numunelere oranla daha yüksektir.
2. Yüksek dayanımlı numuneler normal dayanımlı numunelere oranla daha ani ve gevrek çatlarlar.
3. GFRP ve CFRP-N kullanılarak enine ve boyuna yapıştırma yapılan normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde çatlama momenti değerinde ve burulma momenti kapasitelerinde sargısız kirişlere oranla önemli miktarda artış gözlenmiştir.
4. CFRP-H kullanılarak enine ve boyuna yapıştırma yapılan normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin burulma davranışında, FRP şeritlerinin beklenenden erken kopması nedeniyle sargısız kirişlere oranla önemli miktarda artış gözlenmemiştir.
5. GFRP ve CFRP-N kullanılarak güçlendirilen normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde elastik uzama ve çatlak genişliğinin artması sonucunda deney bölgesinde meydana gelen toplam boy uzama miktarı arttıkça taşınan burulma momenti miktarında da artış gözlenmiştir. CFRP-H kullanılarak güçlendirilen numunelerde ise toplam boy uzamanın artması sonucu taşınan burulma momenti miktarında artış gözlenmemiştir.

6. Elastik, plastik ve yanal eğilme teorileri karşılaştırıldığında sargılanmamış numunelere ait çatlama momenti değerlerine en yakın sonuçlar yanal eğilme teorisinden elde edilmektedir.

7. Elastik, plastik ve yanal eğilme teorileri kullanılarak sargılanmış numunelere ait çatlama momenti değerleri doğru olarak belirlenmemektedir.

Mevcut binalarda bulunan betonarme kirişler eski şartnamelere uyularak yapıldıkları göz önünde bulundurulduğunda etriye aralıklarının olması gerekenden çok daha büyük oldukları düşünülebilir. Bu kirişlerin FRP sargılanarak burulma kapasitelerini arttırmak istenildiği takdirde, tasarım amaçlı çalışmalarda TS-500/2000 ve literatürde yer alan çalışmaların yetersiz kaldığı görülmektedir. Literatürde yer alan araştırmalar incelendiği takdirde elde edilen analitik modellerin, sargılamanın sadece enine yapıldığı durumlar göz önünde bulundurularak hazırlandıkları görülmektedir. Bu çalışmada hem enine hem de boyuna FRP yapıştırılan normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin çatlama ve burulma momenti kapasitesini önceden belirlemek amacıyla iki farklı analitik model önerilmiştir.

8. Bu çalışma kapsamında çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesinin önceden belirlenmesi amacıyla önerilen analitik modeller (sırasıyla Denklem 8.1 ve 8.2) deneysel verilere yakın sonuçlar vermektedir.

$$T'_{cr} = T_{cr_c} + \omega_t \cdot T_{cr_t} + \omega_l \cdot T_{cr_l} \quad (8.1)$$

$$T'_u = k_1 \cdot T_{u_c} + \min(T_{sl}, T_{st}) + k_2 \cdot T_{F_t} + k_3 \cdot T_{F_l} \quad (8.2)$$

9. Önerilen analitik model literatürde yer alan benzer analitik modellerle karşılaştırıldığında, diğer modellere göre deneysel verilere daha yakın değerler verdiği görülmüştür.

10. Literatürde yer alan analitik modellerde enine ve boyuna yapıştırmanın etkinliği ayrı ayrı olarak ele alınmamakla birlikte bu tez çalışması kapsamında önerilen analitik modelde enine ve boyuna sargının etkisi ayrı ayrı olarak ele alınmıştır.

Bu tez kapsamında yapılmış olan deneysel çalışmada 26 adet numune kullanılmıştır. Deneysel sonuçlarda önerilen analitik model içerisinde yer alan katsayılar deneylerden elde edilen verilerin değerlendirilmesiyle belirlenmiştir. Bu katsayıların daha kesin olarak elde edilebilmesi için daha fazla numune sayısına sahip deneylerin yapılması önerilmektedir. Mevcut binalarda bulunan betonarme yapı elemanlarına ait beton basınç dayanımlarının beklenenden çok düşük değerlerde olmaları göz önünde bulundurularak daha düşük beton basınç dayanımıyla hazırlanan numunelerin kullanıldığı deneylerin yapılması önerilmektedir. Kesit boyutlarının burulma davranışı üzerindeki etkinliğinin belirlenmesi amacıyla sabit etriye aralığı ve değişik kesit boyutları ile hazırlanan numunelerin kullanıldığı deneylerin yapılması önerilmektedir. Boyuna yapıştırma yapılan numunelerin burulma davranışı üzerindeki etkinliğinin belirlenmesi amacıyla sadece boyuna yapıştırma yapılan numunelerin bulunduğu deneylerin yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] ACI Committee 318, “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318–02) and Commentary (ACI 318R–02)”, *American Concrete Institute*, Farmington Hills, Michigan, (2002).
- [2] Akpınar, E., “Normal Dayanımlı Betonda Donatı Kenetleme Özelliklerinin Karbon Elyaf Sargısı ile İyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmit, (2004).
- [3] Bakhsh, A. H., Wafa, F. F., and Akhtaruzzaman, A. A., “Torsional Behavior of Plain High-Strength Concrete Beams”, *ACI Structural Journal*, Title No. 87-S59, pp. 583–588, (1990).
- [4] Bakis, et al., “Fiber – Reinforced Polymer Composites for Construction – Satate of the Art Review”, *Journal of Composites for Construction*, Volume 6, pp. 73–87, (2002).
- [5] Beer, F. P., and Johnston, E. R., “Mechanics of Materials”, Second Edition, *The McGraw-Hill Companies*, London, (1992).
- [6] Berktaş, İ., “Betonarme I-Taşıma Gücü ve Kesit Hesapları”, *İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi*, İstanbul, (1995).
- [7] Celep, Z., ve Kumbasar N., “Betonarme Yapılar”, *Sema Matbaacılık*, İstanbul, (1996).
- [8] Chalioris, C. E., “Torsional Strengthening of Rectangular and Flanged Beams Using Carbon Fibre – Reinforced – Polymers – Experimental Series”, *Construction and Building Materials*, In Press, doi:10.1016/j.conbuiltmat.2006.09.003
- [9] Csikos, A., and Hegedus, I., “Torsion of Reinforced Concrete Beams”, *2nd Int. Symposium in Civil Engineering*, Budapest, (1998).
- [10] De Rose, D., “The Rehabilitation of a Concrete Structure Using Fibre Reinforced Plastics”, Master Thesis, *Department of Civil Engineering, University of Toronto*, (1997).
- [11] Doudak, E., and Ersoy, U., “Reinforced Concrete Beams in Pure Torsion”, *Int. Symposium on Shear, Bond and Torsion*, Coimbatore, (1969).

- [12] Engin, S., “Çelik Lif ile Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Burulma Davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmit, (2005).
- [13] Ersoy, U., “Betonarmede Burulma”, *Güven Kitabevi*, Ankara, (1975).
- [14] Ersoy, U., “Betonarme – Temel İlkeler ve Taşıma Gücü Hesabı”, Üçüncü Baskı, *Evrım Yayınevi*, İstanbul, (1985).
- [15] Ersoy, U., ve Özcebe, G., “Betonarme, Geliştirilmiş Yeni Baskı”, Evrim Yayınevi, İstanbul, (2001).
- [16] Fang, I. K., and Chiu H. J., “Torsional Behavior of High-Strength Concrete Beams with Lower Amounts of Torsional Reinforcement”, *ACI Structural Journal*, pp. 741–760, (2005).
- [17] Gerritse, A., and Schurhoff, H. J., “Prestressing with Aramid Tendons,” *Proceedings, 10th FIP Congress*, New Delhi, (1986).
- [18] Hsu, T., “Torsion of Structural Concrete-Behaviour of R.C. Rectangular Members”, *ACI Symposium Volume on Torsion*, ACI SP-18, (1968).
- [19] Koutchoukali, N. E., Belarbi, A., “Torsion of High – Strength Concrete Beams and Minimum Reinforcement Requirement”, *ACI Structural Journal*, Title No. 98-S44, pp. 462–469, (2001).
- [20] Leet, K., and Bernal, D., “Reinforced Concrete Design”, Third Edition, *The McGraw-Hill Companies*, New York, (1997).
- [21] MacGregor, J. G., and Ghoneim, M. G., “Design for Torsion”, *ACI Structural Journal*, Title No. 92-S20, pp. 211–218, (1995).
- [22] Mallick, P. K., “Fiber-Reinforced Composites – Materials, Manufacturing, and Design,” *Marcel Dekker, Inc.*, New York, (1988).
- [23] Nanni, A., et al., “State of the Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures”, *ACI Structural Journal*, ACI-440R-96, pp. 440R–1 - 440R–68, (2002).
- [24] Nichols, R. W., 1988. “Advanced Materials by Design,” *U.S. Congress, Office of Technology Assessment*, OTA E-351, Washington, pp. 335, (1988).
- [25] Panchacharam, S., Belarbi, A., “Torsional Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Composites”, *First FIB Congress*, Osaka, Japan, (2002).
- [26] Rasmussen, L. J., Baker, G., “Torsion in Reinforced Normal and High – Strength Concrete Beams – Part 1: Experimental Series”, *ACI Structural Journal*, Title No. 92-S7, pp. 56–62, (1995).

[27] Rubinsky, I. A., and Rubinsky, A., 1954. "An Investigation into the Use of Fiber-Glass for Prestressed Concrete", *Magazine of Concrete Research*, Volume 6, (1954).

[28] Türk Standartları Enstitüsü (TSE), "TS-500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları", Birinci Baskı, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2000).

[29] Triantafillou, et al., "Externally Bonded FRP Reinforcement for RC Structures", Technical Report, *FIB Bulletin-14*, Switzerland, (2001).

[30] Wines, J. C. et al., "Laboratory Investigation of Plastic-Glass Fiber Reinforcement for Reinforced and Prestressed Concrete," *U.S. Army Corps of Engineers*, Volume 1 & 2, Vicksburg, pp. 228, (1996).

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında İzmit'te doğdu. İlk öğrenimini M.T.S. İlk Öğretim okulunda ve orta öğrenimini Tuzla Lisesi'nde tamamladı. 2000 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2004 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. 2004 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başladı.

2005 yılından bu yana Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.