

**BETONARME KİRİŞLERİN
BURULMA DAVRANIŞI**

Bariş BAYRAK

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalı
Doç. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN
2015
Her Hakkı Saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BETONARME KİRİŞLERİN BURULMA DAVRANIŞI

Barış BAYRAK

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Yapı Bilim Dalı**

**ERZURUM
2015**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

BETONARME KİRİŞLERİN BURULMA DAVRANIŞI

Doç. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN danışmanlığında, Barış BAYRAK tarafından hazırlanan bu çalışma ~~10.12.2015~~ tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı –Yapı Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ (3./3.) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Ertan GÜL

İmza :

Üye : Doç. Dr. A. Cüneyt AYDIN

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Nermin SÖĞÜTÖĞÜ

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 12.12.2018 tarih ve 51.1676 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Ertan YILDIRIM
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BETONARME KİRİŞLERİN BURULMA DAVRANIŞI

Barış BAYRAK

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

Betonarme kiriş elemanlarda etriye oranı, beton tipi ve beton sınıfının burulma davranışı üzerindeki etkisi bu çalışmanın temel konusudur. Test serileri 20 tane 250x300x1500 mm boyutlarında betonarme kiriş içermektedir. Test programında ana parametre olarak etriye oranı, beton tipi ve beton sınıfı seçildi. Bu amaçla test numuneleri sekiz gruba ayrıldı. Normal ve kendiliğinden yerleşen beton tiplerinin yanında C20 ve C40 beton sınıfları ile 80 mm ve 100 mm etriye aralıkları çalışmanın temel parametreleri olarak tasarlandı. Test numunelerinde boyuna donatı 16 mm, etriye olarak ise 8 mm'lik donatı kullanıldı. Betonarme kirişlerin boyutlandırılma ve donatılandırılması Türk Standardı temel alınarak yapıldı. Kiriş numuneleri hazırlandıktan 28 gün sonra burulma momenti deneyine tabi tutuldu. Burulma momentine tabi tutulan betonarme kirişlerin burulma momenti kapasiteleri, dönme açıları, kirişlerde meydana gelen çatlaklar incelendi. Test numunelerinin burulma momenti-dönme açısı arasındaki ilişki irdelendi. Deneysel olarak elde edilen burulma momenti değerleri Amerikan Standardı (ACI), Avrupa Standardı (Eurocode-2) ve Türk Standardı (TS500-2000)'na göre teorik olarak hesaplanan burulma momenti değerleri ile karşılaştırıldı. Deneysel sonuçlara en yakın değerler Türk Standardında elde edildi. Burulma momenti kapasitesinin yanı sıra kritik burulma momenti değeri deneysel olarak ölçüldü. Test edilen betonarme kirişlerde ilk çatlağa neden olan kuvvet deneysel olarak elde edildi. Test edilen kirişlerin burulma moment kapasiteleri elastik, plastik ve yanal eğilme teorileri ile hesaplanan teorik sonuçlarla birlikte değerlendirilmiştir. Teoriler arasında deneysel sonuçlara en yakın değerler yanal eğilme teorisinde elde edilmiştir.

2015, 195 sayfa

Anahtar Kelimeler: burulma momenti, beton sınıfı, beton tipi, etriye oranı, elastik teori, plastik teori, yanal eğilme teorisi

ABSTRACT

Master Thesis

TORSIONAL BEHAVIOUR OF REINFORCEMENT CONCRETE BEAMS

Barış BAYRAK

Atatürk University
Grade School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Building Science

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

The stirrup ratio in reinforced concrete elements and the impact of the concrete class and concrete type on torsional behavior is the basic subject of this study. Test series comprise of 20 units of reinforced concrete beams of 250x300x1500 mm. Stirrup ratio, concrete type and concrete class have been selected as the main parameters of the test program. The test samples were divided into eight groups for this purpose. Besides conventional and self-compacting concrete type, C20 and C40 concrete glass and 80 mm and 100 mm stirrup spacing has been designed as the basic parameters of study. In the test samples, the longitudinal reinforcement was 16 mm, while reinforcement of 8 mm was used for stirrup. The sizing and reinforcement of the reinforced concrete beams was made based on Turkish Standards. The beams samples were subjected to torsion test 28 days after preparation. The torsional moment capacity, rotation angles of the concrete beams subjected to torsional moment as well as the cracks occurring in the beams was investigated. The relationship between the torsional moments and rotation angles of test samples was examined. The torsional moment values obtained experimentally were compared with the torsional moment values calculated theoretically according to American Standard (ACI), European Standard (Eurocode-2) and Turkish Standard (TS500-2000). The values closest to the experimental results are the values calculated according to the TS500-2000. Besides torsional moment capacity, breaking torsional moment was measured experimentally. The force which caused the first crack in the tested reinforced concrete beams was obtained experimentally. The torsional moment capacity of the tested beams was compared with the theoretical results calculated with the elastic, plastic, and the skew-bending theories. The values nearest to the accurate were optioned in the skew-bending theory.

2015, 195 pages

Keywords: Torsional moment, concrete class, concrete type, stirrup spacing, elastic theory, plastic theory, skew-bending theory

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışması olarak sunduğum bu çalışma Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında yapılmıştır. Bu çalışmanın yürütülmesi aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, öğrencisi olduğum için her zaman gurur duyduğum, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN'a,

Çalışmalarım sırasında yakın ilgi ve yardımlarını gördüğüm Sayın Mahyar MAALİ, Sayın Arş. Gör. Mahmut KILIÇ, Sayın Yrd. Doç. Ali ÖZ'e,

Ayrıca çalışmam sürecinde maddi ve manevini desteğini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Barış BAYRAK

Aralık, 2015

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1. Kayma Gerilmesi.....	3
2.1.1. TS 500’de kayma gerilmesi.....	3
2.2. Kesme Kuvveti	7
2.2.1. Kesme donatısız kirişler	11
2.2.1.a. Kesme donatısız kirişlerin davranışı.....	11
2.2.2. Kesme donatılı kirişler	20
2.2.2.a. Kesme donatılı kirişlerin davranışı.....	22
2.2.3. TS 500’de kesme ve burulma	24
2.2.3.a. Kesme kuvveti etkisi	24
2.2.3.b. Kesme kuvveti ve burulma.....	28
2.3. Kendiliğinden Yerleşen Beton	32
2.3.1. Tarihsel gelişimi	34
2.3.2. Kendiliğinden yerleşen betonun avantaj ve dezavantajları	35
2.3.3. Kendiliğinden yerleşen betonun kullanım alanları.....	36
2.3.4. Kendiliğinden yerleşen betonun mekanik özellikleri.....	37
2.3.4.a. Basınç dayanımı	37
2.3.4.b. Çekme dayanımı.....	38
2.3.4.c. Dayanım kazanma hızı	38
2.3.4.d. Boşluk yapısı	39
2.3.4.e. Geçirimsizlik.....	40
2.3.4.f. Elastisite modülü.....	40

2.3.4.g. Sünme	41
2.3.4.h. Rötire	41
2.3.4.1. Sıcaklık genleşme katsayısı.....	41
2.3.4.i. Yangın dayanımı	41
2.3.4.j. Durabilite.....	42
2.4. Burulma Momentinin Tanımı ve Burulma Hakkında Genel Bilgiler.....	42
2.4.1. Uygunluk burulması	44
2.4.2. Denge burulması.....	46
2.4.3. Burulma momenti hesaplarında dikkate alınan yaklaşımlar	50
2.4.3.a. Elastik burulma.....	50
2.4.3.b. Plastik burulma.....	50
2.4.3.c. Coulomb burulması	51
2.4.3.d. Elastisitede dairesel kesitler olmayan çubukların burulması	51
2.4.3.e. Basit burulma.....	51
2.4.4. Burulma teorileri	55
2.4.4.a. Uzay kafes analojisi.....	55
2.4.4.b. Elastik ve plastik teori	58
2.4.4.c. Yanal eğilme teorisi.....	61
2.4.4.d. Diyagonal basınç alanı teorisi	67
2.4.5. Yönetmeliklere göre burulma.....	68
2.4.5.a. ACI şartnamesi	68
2.4.5.b. TS500-2000	69
2.4.5.c. Eurocode-2.....	71
2.5. Literatürde Burulma ile İlgili Yapılmış Olan Bazı Çalışmalar	72
2.5.1. Csikos ve Hegedus	72
2.5.2. Atef H. Bakhsh ve diğerleri.....	74
2.5.3. Rassmussen ve Baker	77
2.5.4. Nasr-Eddine Koutchoukali ve Abdeldjelil Belarbi	80
2.5.5. Saravanan Panchacharam ve Abdeldjelil Belarbi	83
2.5.6. Constantin E. Chalioris.....	88
2.5.7. W. Pawlak ve M. Kaminski.....	93
2.5.8. Constantin E. Chalioris - Chris G. Karayannis	97

3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	103
3.1. Materyal.....	103
3.1.1. Deneylerde kullanılan malzemeler.....	103
3.1.1.a. Çimento	103
3.1.1.b. Agregalar	105
3.1.1.c. Silis dumanı	107
3.1.1.d. Süper akışkanlaştırıcı	109
3.1.1.e. Karışım suyu.....	110
3.1.1.f. Donatı çeliği.....	110
3.1.2. Deneylerde kullanılan aletler.....	111
3.1.2.a. Deney düzeneği	111
3.1.2.b. Numune kırma cihazı	113
3.1.2.c. Betoniyer	114
3.1.2.d. Kalıplar	115
3.1.2.e. Su kürü havuzu	116
3.1.2.f. KYB deneylerinde kullanılan aletler.....	117
3.2. Yöntem	120
3.2.1. Numune boyutları.....	120
3.2.2. Numune isimlendirilmesi	121
4. ARAŞTIRMA ve BULGULAR.....	127
4.1. Normal Beton Deneyleri	127
4.1.1. Burulma momenti birim dönme açısı arasındaki ilişkinin incelenmesi	129
4.1.2. Standartlarla burulma momentinin incelenmesi.....	137
4.1.3. Teorilerle burulma momentinin incelenmesi	139
4.1.4. Kritik burulma momenti değerleri.....	145
4.1.5. Burulma momenti çatlaklarının incelenmesi.....	147
4.2. Kendiliğinden Yerleşen Beton Deneyleri.....	156
4.2.1. Burulma momenti birim dönme açısı arasındaki ilişkinin incelenmesi	161
4.2.2. Standartlarla burulma momentinin incelenmesi.....	165
4.2.3. Teorilerle burulma momentinin incelenmesi	166
4.2.4. Kritik burulma momenti değerleri.....	170
4.2.5. Burulma momenti çatlaklarının incelenmesi.....	170

4.2.6. Çatlak genişliklerinin incelenmesi	176
4.3. Normal Beton ve Kendiliğinden Yerleşen Beton Deneylerinin	
Karşılaştırılması	179
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	183
KAYNAKLAR	187
EKLER.....	190
EK 1.....	190
ÖZGEÇMİŞ	196

SİMGELER DİZİNİ

τ	: Kayma gerilmesi
τ_t	: Burulma kayma gerilmesi
τ_{cr}	: Kritik kayma gerilmesi
τ_{tb}	: Beton tarafından karşılanan kayma gerilmesi
α_p	: Plastik teori sabiti
δ_{DT1}	: LVDT'lerden okunan değerleri
μ	: Kesme sürtünme katsayısının
σ	: Normal gerilme
$\sigma_{bç}$	: Beton çekme dayanımı
σ_b	: Beton basınç dayanımı
α_f	: Kesme-sürtünme donatısının kesme düzlemi ile yaptığı dar açısı
A	: Enkesit toplam alanını
A_c	: Beton kesit alanı
A_e	: Kesit köşelerindeki donatı merkezlerini birleştiren sınır içinde kalan alan
A_k	: Merkezi boyuna donatıların ortası olan kesitin alanını
A_l	: Boyuna donatının alanını
A_o	: Etriye çubuğu kesit alanı
A_{oh}	: Merkezi boyuna donatıların ortası olan kesitin alanını
A_{ot}	: Burulma için gerekli etriye kesit alanı
A_{ov}	: Kesme için gereken etriye kesit alanı
A_s	: Kirişteki bütün boyuna donatıların alanı
A_{sl}	: Toplam yatay donatı kesit alanı
A_{sw}	: Etriye kesit alanı
a_v	: Kesme açıklığı
A_{wf}	: Yalnızca birleşme düzlemine dik doğrultuda düzenlenmiş donatı çubuklarının toplam alanı
b	: Kiriş en kesitinin yatay uzunluğu
b_f	: FRP genişliği

b_j	: Etriye kesitinin yatay uzunluğu
b_w	: Kesit genişliği
d	: Faydalı yükseklik
d'	: Dairesel kesitin çapı
E	: Beton elastisite modülünü
E_{fu}	: FRP'ye ait elastisite modülü,
F	: Eksenel kuvvet
f_{cd}	: Beton tasarım basınç dayanımı
f_{ctd}	: Beton tasarım çekme dayanımı
f_{ctk}	: Beton karakteristik çekme dayanımı
f_{cts}	: Betonun yarmada çekme dayanımını
f_{yd}	: Çeliğin tasarım dayanımı
f_{yld}	: Boyuna donatı olarak kullanılan çeliğin akma dayanımı
f_{ys}	: Çeliğin akma dayanımını
f_{ywd}	: Etriye tasarım dayanımı
G_c	: Betonun kayma modülünü
h	: Kiriş dikey uzunluğu
h_j	: Etriye kesitinin dikey uzunluğu
I	: Atalet momenti
L	: Kiriş toplam boyu
M	: Eğilme momenti
M_t	: Burulma momenti
$M_{tç}$	: Çatlama momenti
n	: Kesitteki etriye kol sayısı
N_d	: Eksenel yük
P	: Deney yükü
P_o	: Kayma gerilmesi akımının olduğu çevre
Q	: Alan momenti
S	: Burulma dayanım momenti
s	: Etriye aralığı
s_f	: FRP aralığı
s_{rm}	: Ortalama çatlak aralığı

S_{rmx}	: Boyuna ortalama çatlak genişliği
S_{rmy}	: Enine ortalama çatlak genişliği
T	: Burulma momenti
T_{ACI}	: ACI şartnamesine göre burulma momenti kapasitesi
T_{cr}	: Kritik burulma momenti
T_d	: Burulma momenti kapasitesi
T_e	: Elastisite teorisi burulma momenti kapasitesi
$t_{ef,i}$	: Etkili cidar kalınlığını
T_{EU}	: Eurocode-2 burulma momenti kapasitesi
t_f	: FRP kalınlığı
T_p	: Plastisite teorisi burulma momenti kapasitesi
T_{Rd1}	: Burulma sırasında ortaya çıkan beton basınç çubukları tarafından taşınabilecek en büyük burulma momenti
T_{Rd2}	: Donatı tarafından karşılanabilecek en büyük burulma momentini
T_{sp}	: Yanal eğilme teorisi burulma momenti kapasitesi
T_{TS}	: Türk Standartlarında burulma momenti kapasitesi
T_u	: Burulma momenti kapasitesi
U	: Enkesitin en dış çevresini
u_e	: A_e alanının çevresi
u_k	: A_k 'nın çevresini
V	: Kesme kuvveti
V_c	: Kesme dayanımına beton katkısı
V_{cc}	: Çatlamamış basınç bölgesindeki beton tarafından taşınan kesme kuvveti
V_{cd}	: Çekme donatısınca taşınan kesme kuvveti
V_c^I	: Düzeltme terimi
V_{ci}	: Çatlak yüzeyindeki sürtünme nedeniyle karşılanan kesme kuvveti
V_{cr}	: Eğik çatlama dayanımı
V_d	: Tasarım kesme kuvveti
V_r	: Kesitin kesme dayanımı
V_{sd}	: Kesme kuvvetini,
V_w	: Kesme kuvveti donatısı katkısı
x	: Kiriş yatay uzunluğu

y	: Kiriş dikey uzunluğu
z_i	: Cidar kenar uzunluğu
α	: Saint-Verne sabiti
$\varepsilon_{ke,f\text{ efektif}}$	: FRP birim şekil değiştirme miktarının karakteristik değeri,
θ	: Dönme açısını

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Kiriş içerisindeki yatay kayma gerilmeleri.....	3
Şekil 2.2. Dikdörtgen kesitli homojen bir kirişte kayma gerilmeleri	6
Şekil 2.3. Tasarım kesme kuvveti için dikkate alınacak kesitler	8
Şekil 2.4. Homojen bir kirişteki üç noktada asal gerilmeler ve çekme, basınç gerilme yörüngeleri	9
Şekil 2.5. Dikdörtgen kesitte gerilme dağılımı	10
Şekil 2.6. Dikkate alınan kesme donatısız kiriş ve oluşan kesit etkileri	12
Şekil 2.7. Betonarme kesitte normal ve kayma gerilmeleri değişimi	12
Şekil 2.8. Güç tükenmesi durumunda kirişte çatlama biçimleri	14
Şekil 2.9. Kesme açıklığının kirişin taşıma gücüne etkisi	15
Şekil 2.10. Betonarme kiriş elemanda burulma	17
Şekil 2.11. Kesme kuvveti donatısız kirişte eğik çatlama ve kesme kuvvetinin	18
Şekil 2.12. Basınç kuvvetinin kesmeye etkisi.....	19
Şekil 2.13. Oluşacak çatlak yüzeyinin kesmeye etkisi	19
Şekil 2.14. Çekme donatısının kaldıraç etkisi.....	20
Şekil 2.15. Kirişlerde uygulanan kesme donatılan.....	21
Şekil 2.16. Kesme donatılı kirişte kesme kuvveti etkisinin karşılanması.....	23
Şekil 2.17. Değişik mesnetlenme türleri	25
Şekil 2.18. Fransız Standartı P18-503'e göre yüzey boşluk yapısı.....	40
Şekil 2.19. Burulma etkisinde kalan kirişler	43
Şekil 2.20. Burulma donatısız elemanın kırılması	43
Şekil 2.21. Uygunluk burulmasına ilişkin bazı örnekler	45
Şekil 2.22. Denge (a,b) ve uygunluk (c,d) burulmaları	47
Şekil 2.23. Kenar kiriş burulma rijitliğine bağlı olarak döşeme şeridinde eğilme momenti ve kenar kirişinde burulma momenti değişimi.....	47
Şekil 2.24. Denge burulmasına ilişkin bazı örnekler	48
Şekil 2.25. Bazı denge burulması durumlarında burulma momentinin değeri	49
Şekil 2.26. ODTÜ'de denenen bir kirişin kırılma biçimi	52

Şekil 2.27. Kırılma konumuna ulaşan kirişte asal çekme gerilmelerine dik yönde oluşan çatlaklar.....	53
Şekil 2.28. (a) Dikdörtgen bir kesti için elastisite teorisinden elde edilen burulma dağılımı (b) plasitisite teorisine göre burulma altında oluşan gerilme dağılımı.....	54
Şekil 2.29. Etriye ve boyuna donatı üzerinde ölçülen birim deformasyonlar temel alınarak hesaplanan gerilmeler.....	55
Şekil 2.30. Dolu ve boşluklu kesitlerde taşınan burulma momenti-donatı oranı grafiği	56
Şekil 2.31. Boşluklu kesit anolojisi modeli	56
Şekil 2.32. Elastik teoriye göre basit burulma etkisindeki dikdörtgen enkesitlerde kayma gerilmesi dağılımı	59
Şekil 2.33. Plastik teoriye göre basit burulma etkisindeki dikdörtgen en kesitlerde kayma gerilmesi dağılımı	60
Şekil 2.34. Yanal eğilme teorisine göre beton bir elemanın kırılma yüzeyi.....	62
Şekil 2.35. Çeşitli deneylerden elde edilen çatlama momenti değerlerinden plastik teori kullanılarak elde edilen kayma gerilmeleri grafiği	64
Şekil 2.36. Çeşitli deneylerden elde edilen çatlama momenti değerlerinden elastik teori kullanılarak elde edilen kayma gerilmeleri grafiği	65
Şekil 2.37. Çeşitli deneylerden elde edilen çatlama momenti değerlerinden yan al eğilme teorisi kullanılarak elde edilen kayma gerilmeleri grafiği.....	66
Şekil 2.38. Basınç alanı teorisine göre kayma akımı	67
Şekil 2.39. Eurocode-2 de burulma momenti hesabı için önerilen ince cidarlı enkesit..	72
Şekil 2.40. Burulma momenti beton basınç dayanımı ilişkisi	76
Şekil 2.41. Burulma momenti birim dönme ilişkisi	76
Şekil 2.42. Farklı dayanımlardaki numuneler için burulma momenti-çatlak genişliği ilişkisi	78
Şekil 2.43. Normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonarme kirişler için burulma momenti-birim dönme ilişkisi	79
Şekil 2.44. Birinci grup numuneler için burulma momenti-birim dönme açısı ilişkisi..	82
Şekil 2.45. İkinci grup numuneler için burulma momenti-birim dönme açısı ilişkisi ...	83
Şekil 2.46. Lif düzeni etkisine ait burulma momenti-birim dönme açısı grafiği	86

Şekil 2.47. Sürekli ve aralıklı sargılamamanın etkisine ait burulma momenti–birim dönme açısı grafiği	86
Şekil 2.48. Her iki yönde beraber yapılan sargılamamanın etkisine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafiği	87
Şekil 2.49. Dikdörtgen kesitli “a” grubu kirişlere ait burulma momenti – birim dönme açısı grafiği	91
Şekil 2.50. Dikdörtgen kesitli “b” grubu kirişlere ait burulma momenti – birim dönme açısı grafiği	91
Şekil 2.51. Tablalı kirişlere ait burulma momenti–birim dönme açısı grafiği	92
Şekil 2.52. Pawlak ve Kaminski test elemanları	94
Şekil 2.53. BK-T numunesinde meydana gelen çatlaklar	94
Şekil 2.54. BK-T numunesinde kırılma anında meydana gelen çatlaklar	94
Şekil 2.55. İncelenen çatlakların yeri	94
Şekil 2.56. Kırılma anında meydana gelen çatlak genişlikleri (BK-T)	95
Şekil 2.57. BK-TVM_1 kirişinde yük-çatlak genişliği grafiği ve BK-TVM_1 kirişinde meydana gelen çatlaklar	96
Şekil 2.58. BK-TVM_2 kirişinde yük-çatlak genişliği grafiği ve BK-TVM_2 kirişinde meydana gelen çatlaklar	96
Şekil 2.59. BK-TVM_3 kirişinde yük-çatlak genişliği grafiği ve BK-TVM_3 kirişinde meydana gelen çatlaklar	96
Şekil 2.60. BK-TVM_4 kirişinde yük-çatlak genişliği grafiği ve BK-TVM_4 kirişinde meydana gelen çatlaklar	97
Şekil 2.61. Costantin E. Chalioris ve Chris G. Karayannis deney numuneleri	98
Şekil 2.62. Costantin ve Karayannis deney numune detayları	99
Şekil 2.63. Costantin ve Karayannis deney düzeneği	100
Şekil 2.64. 200 kontrol grubu burulma-dönme açısı grafiği	100
Şekil 2.65. 150 kontrol grubu burulma-dönme açısı grafiği	101
Şekil 2.66. 100 kontrol grubu burulma-dönme açısı grafiği	101
Şekil 2.67. Kontrol grubu kirişlerinde oluşan çatlaklar	102
Şekil 2.68. a) 200 grubu b)150 grubu c) 100 grubu kirişlerinde oluşan çatlaklar ..	102
Şekil 3.1. CEM I 42,5 R portland çimentosu	104
Şekil 3.2. KYB üretiminde kullanılan 0-5 mm çaplı ince agrega	107

Şekil 3.3. KYB üretiminde kullanılan 5-15 mm çapındaki agrega.....	107
Şekil 3.4. KYB üretimi için kullanılan silis dumanı.....	109
Şekil 3.5. KYB üretimi için kullanılan yeni nesil akışkanlaştırıcı.....	110
Şekil 3.6. d=16 mm ve d=8 mm nervürlü inşaat demiri	110
Şekil 3.7. Deney düzeneğinde kullanılan LVDT ve strain gauge.....	111
Şekil 3.8. Deney düzeneği çizimleri	112
Şekil 3.9. Deney düzeneği kelepçeler ve profil	113
Şekil 3.10. Pres makinesi	114
Şekil 3.11. Betoniyer	115
Şekil 3.12. Ahşap kalıplar	115
Şekil 3.13. Küp kalıplar	116
Şekil 3.14. Su kürü havuzu	116
Şekil 3.15. L Kutusu deney aleti düzeneği	117
Şekil 3.16. L Kutusu deney aleti	117
Şekil 3.17. V Hunisi deney aleti	118
Şekil 3.18. J Halkası deney aleti	119
Şekil 3.19. Çökme yayılma deney aleti	119
Şekil 3.20. 8 cm Etriye aralıklı kiriş numune detayları	120
Şekil 3.21. 10 cm Etriye aralıklı kiriş numune detayları	121
Şekil 4.1. Kalıplarına oturtulmuş kiriş numuneleri.....	127
Şekil 4.2. Normal beton deneyleri için beton dökümü	128
Şekil 4.3. Kür işlemi	128
Şekil 4.4. Deney düzeneğine oturtulmuş kiriş numunesi.....	129
Şekil 4.5. NC2E8-1 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	130
Şekil 4.6. NC2E8-2 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	130
Şekil 4.7. NC2E8-3 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	131
Şekil 4.8. NC2E10-1 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	131
Şekil 4.9. NC2E10-2 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	132
Şekil 4.10. NC2E10-3 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	132
Şekil 4.11. NC4E8-1 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	133
Şekil 4.12. NC4E8-2 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	133
Şekil 4.13. NC4E8-3 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	134

Şekil 4.14. NC4E10-1 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	134
Şekil 4.15. NC4E10-2 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	135
Şekil 4.16. NC4E10-3 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	135
Şekil 4.17. Deneysel Burulma momenti kapasitelerinin teori ve standartlarla karşılaştırılması	144
Şekil 4.18. NC2E8-1 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları	148
Şekil 4.19. NC2E8-2 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları	149
Şekil 4.20. NC2E8-3 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları	149
Şekil 4.21. NC2E10-1 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları	150
Şekil 4.22. NC2E10-2 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları	150
Şekil 4.23. NC2E10-3 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları	151
Şekil 4.24. NC4E8-1 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları	151
Şekil 4.25. NC4E8-2 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları	152
Şekil 4.26. NC4E8-3 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları	152
Şekil 4.27. NC4E10-1 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları	153
Şekil 4.28. NC4E10-2 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları	153
Şekil 4.29. NC4E10-3 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları	154
Şekil 4.30. Beton dökümü bitmiş KYB girişleri.....	156
Şekil 4.31. C20 beton sınıfı yayılma deneyi	158
Şekil 4.32. C40 beton sınıfı yayılma deneyi	158
Şekil 4.33. C20 beton sınıfı V hunisi deneyi	159
Şekil 4.34. C40 beton sınıfı V hunisi deneyi	159
Şekil 4.35. C20 beton sınıfı L kutusu deneyi.....	160
Şekil 4.36. C40 beton sınıfı L kutusu deneyi.....	160
Şekil 4.37. KC2E8-1 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	161
Şekil 4.38. KC2E8-2 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	162
Şekil 4.39. KC2E10-1 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	162
Şekil 4.40. KC2E10-2 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	163
Şekil 4.41. KC4E8-1 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	163
Şekil 4.42 KC4E8-2 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	164
Şekil 4.43 KC4E10-1 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	164
Şekil 4.44 KC4E10-1 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği.....	165

Şekil 4.45. KYB serisi için deneysel burulma momenti kapasitelerinin teori ve standartlarla karşılaştırılması.....	169
Şekil 4.46. KYB deney girişleri.....	171
Şekil 4.47. KC2E8-1 numunesinde meydana gelen çatlaklar.....	172
Şekil 4.48. KC2E8-2 numunesinde meydana gelen çatlaklar.....	172
Şekil 4.49. KC2E10-1 numunesinde meydana gelen çatlaklar.....	173
Şekil 4.50. KC2E10-2 numunesinde meydana gelen çatlaklar.....	173
Şekil 4.51. KC4E8-1 numunesinde meydana gelen çatlaklar.....	174
Şekil 4.52. KC4E8-2 numunesinde meydana gelen çatlaklar.....	174
Şekil 4.53. KC4E10-1 numunesinde meydana gelen çatlaklar.....	175
Şekil 4.54. KC4E10-2 numunesinde meydana gelen çatlaklar.....	175
Şekil 4.55. Normal beton numunelerinde meydana gelen çatlak genişlikleri.....	176
Şekil 4.56. KYB numunelerinde meydana gelen çatlak genişlikleri	177

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Değişik durumlar için kesme-sürtünme katsayısı.....	27
Çizelge 2.2. Değişik kesitler için yaklaşık burulma dayanım momentleri	29
Çizelge 2.3. h/b oranına bağlı olarak α ve β katsayıları	58
Çizelge 2.4. Dikdörtgen ve tablalı kirişler için elastik ve plastik teori denklemleri.....	61
Çizelge 2.5. Basit burulma için maksimum kayma gerilmeleri.....	70
Çizelge 2.6. Deneylerden ve hesaplardan elde edilen çatlama momenti değerleri.....	73
Çizelge 2.7. Deneysel ve teorik olarak elde edilen burulma dayanımları	75
Çizelge 2.8. Deney sonuçları	77
Çizelge 2.9. Numune beton ve donatı özellikleri.....	80
Çizelge 2.10. Deneylerden elde edilen sonuçlar	81
Çizelge 2.11. Numune beton ve donatı özellikleri.....	84
Çizelge 2.12. Panchacharam ve Belarbi deney sonuçları	85
Çizelge 2.13. Deney sonuçları ve analitik modelden elde edilen sonuçların karşılaştırması.....	87
Çizelge 2.14. Numune donatı ve sargılama şekilleri	89
Çizelge 2.15. Chalioris deney sonuçları	90
Çizelge 2.16. Eurocode-2 ye göre hesaplanmış çatlak genişlikleri	95
Çizelge 3.1. CEM I 42,5 portland çimentosu kimyasal özellikleri.....	104
Çizelge 3.2. CEM I 42.5 portland çimentosu fiziksel özellikleri	105
Çizelge 3.3. Kiriş numunelerinin isimlendirilmesi	122
Çizelge 4.1. Deneysel burulma momenti kapasitesinin standartlarla karşılaştırılması (kNm).....	138
Çizelge 4.2. Elastik plastik ve yanal eğilme teorileri ile deneysel burulma momenti kapasitesinin karşılaştırılması (kNm).....	140
Çizelge 4.3. Kritik burulma momenti değerleri	146
Çizelge 4.4. Deneysel verilerin teori ve standartlarla karşılaştırılma	155
Çizelge 4.5. KYB akma değerleri	157
Çizelge 4.6. KYB V hunisi değerleri	157
Çizelge 4.7. KYB L kutusu değerleri.....	157

Çizelge 4.8. KYB için deneysel burulma momenti kapasitesinin standartlarla karşılaştırılması (kNm)	166
Çizelge 4.9. KYB serisi için elastik plastik ve yanal eğilme teorileri ile deneysel burulma momenti kapasitesinin karşılaştırılması (kNm).....	167
Çizelge 4.10. KYB serisi için kritik burulma momenti değerleri	170
Çizelge 4.11. KYB serisi için deneysel verilerin teori ve standartlarla karşılaştırılması	178
Çizelge 4.12. Normal beton ve KYB kirişlerinin burulma momenti kapasitelerinin karşılaştırılması	179
Çizelge 4.13. Normal beton ve KYB kirişlerinin kritik burulma momenti değerlerinin karşılaştırılması	180
Çizelge 4.14. Normal beton ve KYB kirişlerinin karşılaştırılması	181
Çizelge 4.15. Normal beton ve KYB kirişlerinin maksimum çatlak genişliklerinin karşılaştırılması	182

1. GİRİŞ

Betonarme kiriş elemanlarda burulma momenti gerek Türk Standartlarında gerekse uluslararası standartlarda pek fazla yer bulamamaktadır. Betonarme yapılarda burulma momenti uygulamada yapı elemanına tek başına etki ettiği durumlar pek fazla değildir. Burulma momenti yapı elemanlarına eğilme momenti ve kesme kuvveti ile birlikte etki etmektedir. Dolayısıyla betonarme elemanlara burulma momentinin tek başına etki ettiği durumlar genelde akademik çalışma konusudur. Bu çalışmada da hazırlanan test numunelerine burulma momenti tek başına etki ettirilmiştir.

Bu çalışmanın önde gelen amaçlarından bir tanesi de burulma momentine maruz kalan yapı elemanlarının davranışı hakkında ilgililere bilgi vermektir. Bunun yanında burulma momenti üzerinde daha önce çalışma yapmış olan akademisyenlerin tecrübe ve analizlerine dayanarak çıkarmış oldukları teoriler ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Betonarme kiriş elemanlarda burulma momentinin etki etmesi durumunda yapı elemanlarında inşaat mühendisliğinin en önemli sorunlarından biri olan çatlaklar oluşur. Betonarme yapı elemanlarında meydana gelen çatlakların sebepleri kesin bir sonuca bağlanamamıştır. Fakat elemanda meydana gelen çatlağın büyüklüğü ve yönü gibi parametreler kullanılarak çatlağın sebebi hakkında bilgi sahibi olunmaya çalışılmıştır. Betonarme yapı elemanlarında meydana gelen çatlaklar zamanla ilerleyerek yük taşıyıcı elemanın kırılması ile sonuçlanan olaylara sebep olmaktadır. Bundan dolayı betonarme taşıyıcı yapı elemanlarında çatlak önemlidir. Bu amaçla bu tez çalışmasında burulma momentinden kaynaklanan çatlaklar incelenmiştir.

Yukarıda sıralanan amaçlar doğrultusunda bu tez kapsamında burulma momentine maruz bırakılan kiriş numuneleri beton sınıfı, beton tipi ve etriye oranına göre sınıflandırılmıştır. Bu bağlamda hazırlanan betonarme kiriş numunelerine burulma momenti uygulanmış ve kirişlerde meydana gelen çatlaklar, burulma momenti-birim

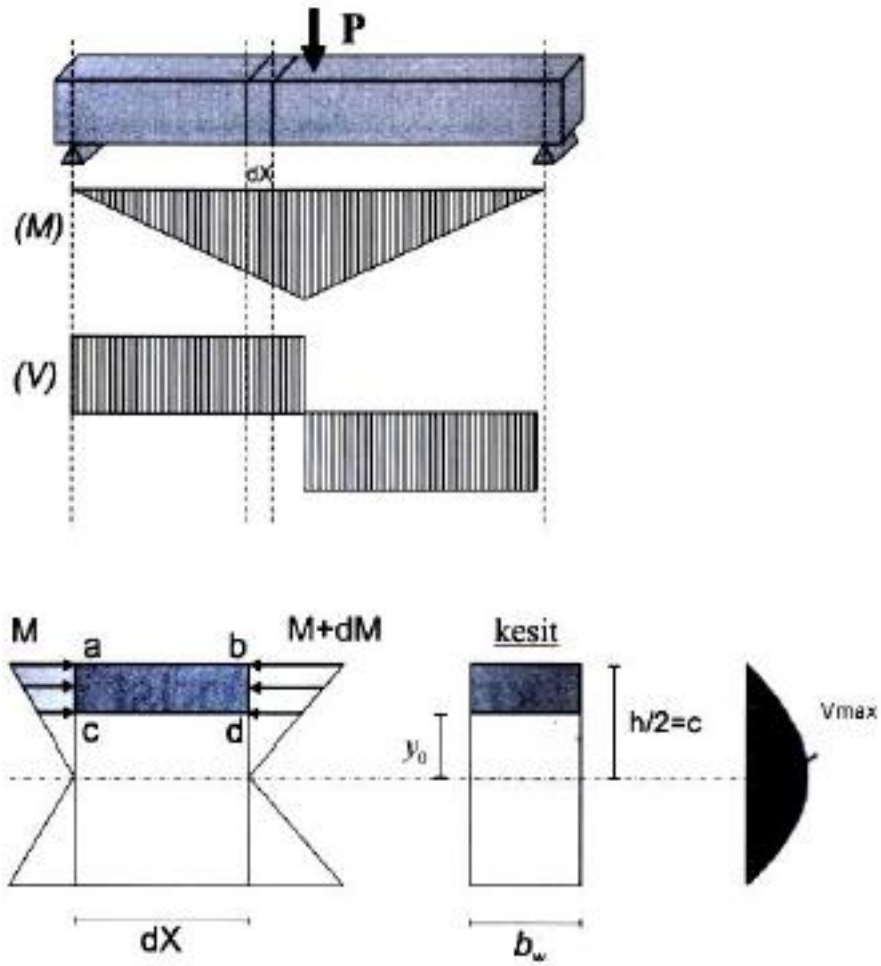
dönme açısı, burulma momenti kapasitesi, kritik burulma momenti değerleri bulunmuştur. Deneysel olarak elde edilen bu değerlerin TS500-2000, American Concrete Institute (ACI) ve Eurocode-2'ye göre elde edilen teorik değerlerle karşılaştırılmaları yapılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Kayma Gerilmesi

2.1.1. TS 500'de kayma gerilmesi

Yük etkisi altındaki kirişte yatay ve düşey kayma gerilmeleri meydana gelir.



Şekil 2.1. Kiriş içerisindeki yatay kayma gerilmeleri

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi kiriş boyunda bir diferansiyel (dx) elaman düşünelim. Sol taraf kesite etkiyen moment (M) ve sağ taraftaki kesite etkiyen moment (M+dM) olsun.

Tarafsız eksenenden (y) mesafede sol kesitte (a-c) normal gerilme:

$$f = \frac{M}{I} y \text{ dir.} \quad (2.1)$$

Tarafsız eksenenden (y) mesafede sağ kesitte (b-d) normal gerilme

$$f = \frac{(M+dM)}{I} y \quad (2.2)$$

Elemandaki taralı alan (abcd) nin dengesi düşünülürse (a-c) yüzeyinde (da) alanı gibi bir alan üzerine etkiyen kuvvet:

$$f(da) = \frac{My}{I} (da) \quad (2.3)$$

(a-c) boyunca sol taraf alan üzerine etkiyen kuvvetlerin toplamı:

$$\int_{y_0}^c \frac{My}{I} da \quad (2.4)$$

Aynı şekilde sağ tarafta (b-d) yüzeyi boyunca etkiyen kuvvetler toplamı:

$$\int_{y_0}^c \frac{(M+dM)y}{I} da \quad (2.5)$$

ifadeleriyle belirlenebilir. Görüldüğü gibi (abcd) elemanın bir tarafından etkiyen normal kuvvet diğer tarafından etkiyene eşit değildir. Dolayısıyla taralı elemanın dengede olabilmesi için ilave yatay kuvvet etkiyor olmalıdır. Bu elemanın üst (a-b) yüzeyi serbest olduğundan ancak (c-d) yüzeyine kuvvet etkiyor olabilir. Bu yüzeye

etkiyen gerilme v ile gösterilirse (c-d) yüzeyi boyunca etkiyen toplam yatay kayma kuvveti: $v \cdot b_w \cdot dx$ olarak belirlenir. Yatay doğrultuda etkiyen kuvvetler toplamı eşitliği yazılırsa:

$$\int_{y_0}^c \frac{My}{I} da - \int_{y_0}^c \frac{(M+dM)y}{I} d + vb_w \cdot dx = 0 \quad (2.6)$$

$$v = \frac{1}{I \cdot b_w} \frac{dM}{dx} \int_{y_0}^c y \cdot da \quad (2.7)$$

$$\frac{dM}{dx} = v \quad (2.8)$$

$$\int_{y_0}^c y \cdot da = Q \quad (2.9)$$

$$v = \frac{v \cdot Q}{I \cdot b_w} \quad (2.10)$$

kayma gerilmesi analitik ifadesi belirlenmiş olur. Burada Q alan momenti, V kesme kuvveti, I atalet momenti, b_w kesit genişliğidir. Dikdörtgen kesitteki bütün alanda kayma gerilmesinin değişimini belirlemek için:

$$Q = \int_{y_0}^{h/2} y \cdot b_w dy = b_w \int_{y_0}^{h/2} y \cdot dy = \frac{b_w}{2} |y^2|_{y_0}^{h/2} = \frac{b_w}{2} \left[\frac{h^2}{4} - y_0^2 \right] \quad (2.11)$$

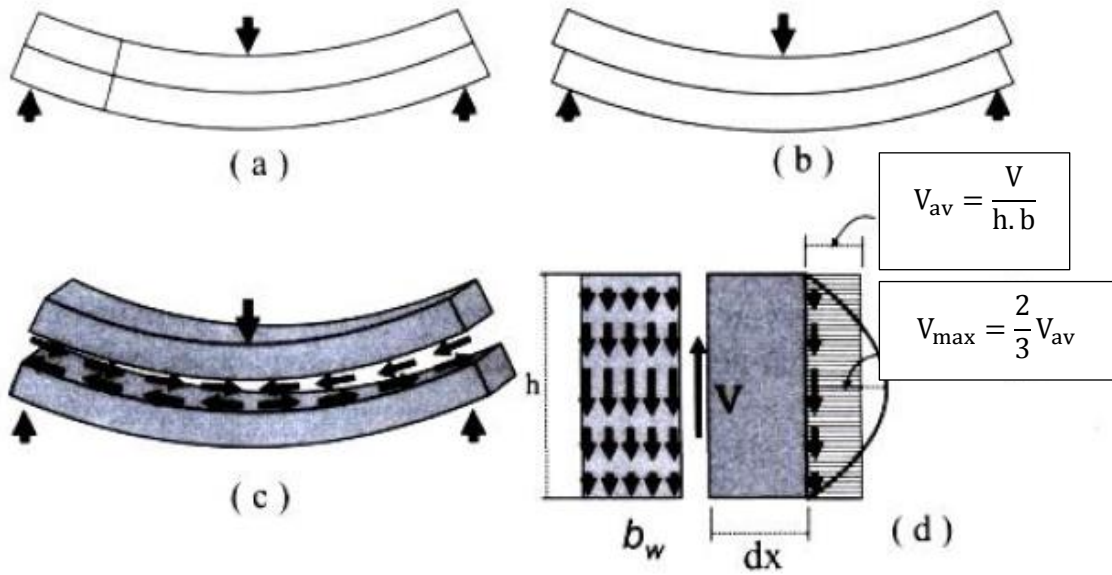
Tarafsız eksenden y_0 kadar mesafede kayma gerilmesi ifadesi yazılırsa;

$$v = \frac{v}{I \cdot b_w} \left(\frac{b_w}{2} \left[\frac{h^2}{4} - y_0^2 \right] \right) = \frac{v}{2I} \left[\frac{h^2}{4} - y_0^2 \right] \quad (2.12)$$

kayma gerilmesinin tarafsız eksen üzerinde aldığı maksimum gerilme değeri belirlenir.

Elastik ve homojen bir kiriş kesitinde kayma gerilmesi $v = \frac{v \cdot Q}{I \cdot b_w}$ ve ilaveten normal

eğilme gerilmeleri; $f = \frac{M}{I}y$ etkimektedir. Şayet kesme kuvveti sıfır değilse söz konusu kesit her iki gerilmenin etkisi altındadır. Kayma gerilmelerinin rolü Şekil 2.2.a'dan anlaşılmaktadır. Kiriş dikdörtgen kesitten ibarettir ve her iki kesit birbirine yapıştırılmıştır. Eğer yapışma yeteri kadar kuvvetli ise iki eleman tek bir kiriş gibi davranır. Şayet yapışkanlık zayıf ise iki parça birbirinden ayrılarak Şekil 2.2.b'de görüldüğü gibi her parça kendi hareketini ayrı ayrı yapar.



Şekil 2.2. Dikdörtgen kesitli homojen bir kirişte kayma gerilmeleri

Yapışkan kuvvetli ise, iki parçayı birlikte tutuyorsa Şekil 2.2.c'de görülen kuvvetlerin varlığı anlaşılmaktadır. Bu gerilmeler yatay kesitin her birinde oluşmaktadır ve tarafsız eksene olan mesafeye göre farklı değerler almaktadır. Şekil 2.2.d'de kesite etkiyen V kesme kuvvetinin yukarı doğru hareketi sağ kesitteki kayma gerilmeleri ile dengelenir.

Elastik homojen kirişlerin davranışı donatısız yani sadece beton kirişlerin davranışlarına benzer. Beton kirişe yük uygulandığında ve yükün artırılmasıyla çekme bölgesinde en uç liften başlayan çatlak oluşur. Yükün artımı devam ettiğinde çatlak ilerler ve sonuçta kiriş kırılır. Şayet özel bir durum yoksa çatlak, en büyük eğilme momentinin olduğu

kesitin en uç lifinden başlar ve gelişir. Eğer çekme donatısı kirişe konulmuş ise durum çok farklıdır.

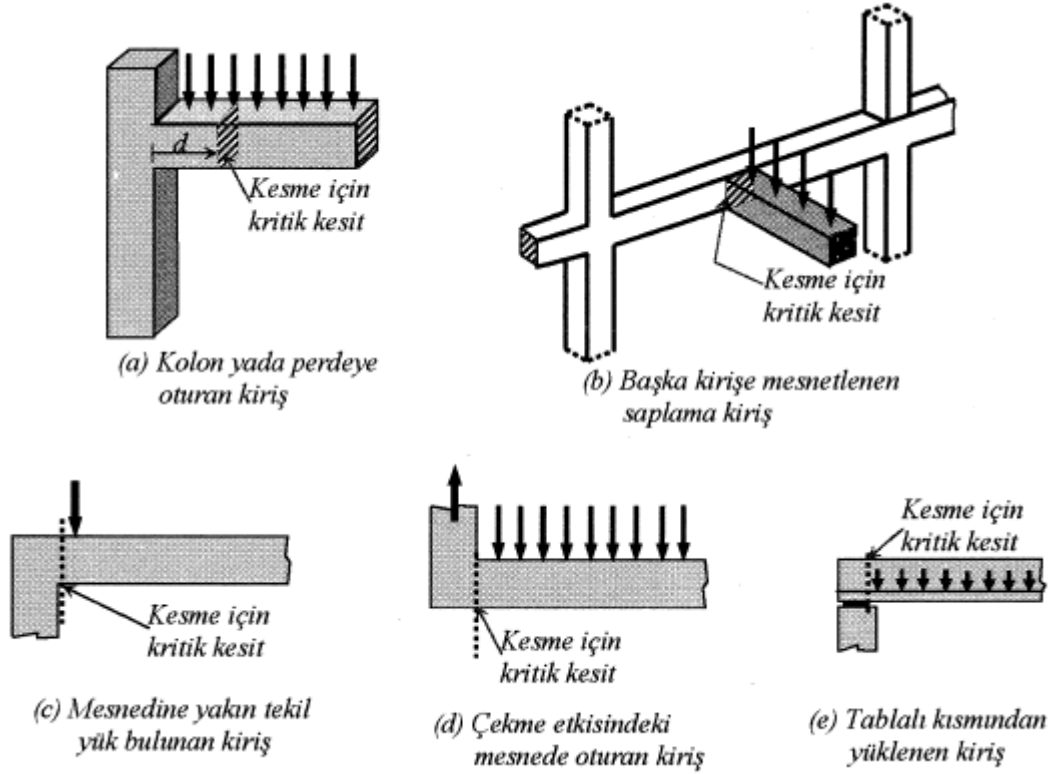
Beton içinde çekme çatlakları oluşsa bile gerekli olan çekme dayanımı çelik tarafından karşılanır ve böylece çok daha büyük yükler kirişe taşıtılabilir.

Donatısız kirişte eğilme çatlaklarının olduğu yük seviyesinde kayma gerilmeleri henüz küçük değerlidir ve kirişin dayanımına etkisi ihmal edilebilecek seviyededir. Ancak kirişin çekme tarafına donatı konulduğunda kirişin taşıyacağı yük artar ve orantılı olarak yük arttıkça kayma gerilmeleri de artar ve sonuçta büyük kesme kuvvetinin bulunduğu bölgede diyagonal çekme gerilmeleri önemli değerlere ulaşır. Kirişin eğilme hesabında çekme etkisi için çekme yüzeyine yakın tarafa yerleştirilmiş bulunan boyuna çekme donatısının varlığı kiriş içerisinde başka bir bölgede oluşan diyagonal çekme gerilmelerine karşı etkisiz kalır. Sonuç olarak çekme gerilmelerinin değeri betonu çatlatacak değere ulaştığında çekme gerilmesine dik doğrultuda diyagonal çatlaklar oluşur. Kiriş gövdesine diyagonal çekme gerilmelerini karşılayacak kayma donatısı bulunmaması halinde meydana gelecek diyagonal çatlakların büyümesi ise kirişi göçmeye götürebilecektir.

2.2. Kesme Kuvveti

Kesitte eksenel kuvvet ve eğilme momenti normal gerilme (σ) oluştururken, kesme kuvveti ve burulma momenti kayma gerilmesi (τ) oluşturmaktadır. Kirişlerde yüklemeye bağlı olarak, kiriş uzunluğu boyunca kesme kuvvetinin değeri değişmektedir. Bu durumda, kiriş için dikkate alınacak olan tasarım kesme kuvvetinin değerinin ne olacağı sorusu ortaya çıkmaktadır. Tasarım kesme kuvvetinin dikkate alınacağı kesitler yükleme durumuna ve mesnetleme şekline göre değişmektedir. Şekil 2.3.a'da doğrudan mesnede oturan kiriş için, Şekil 2.3.b'de saplama kiriş olarak dolaylı mesnede oturan kiriş için, Şekil 2.3.c'de mesnede yakın tekil yük etkisindeki kiriş için, Şekil 2.3.d'de çekme etkisindeki bir mesnede oturan kiriş için ve Şekil 2.3.e'de ise tabla

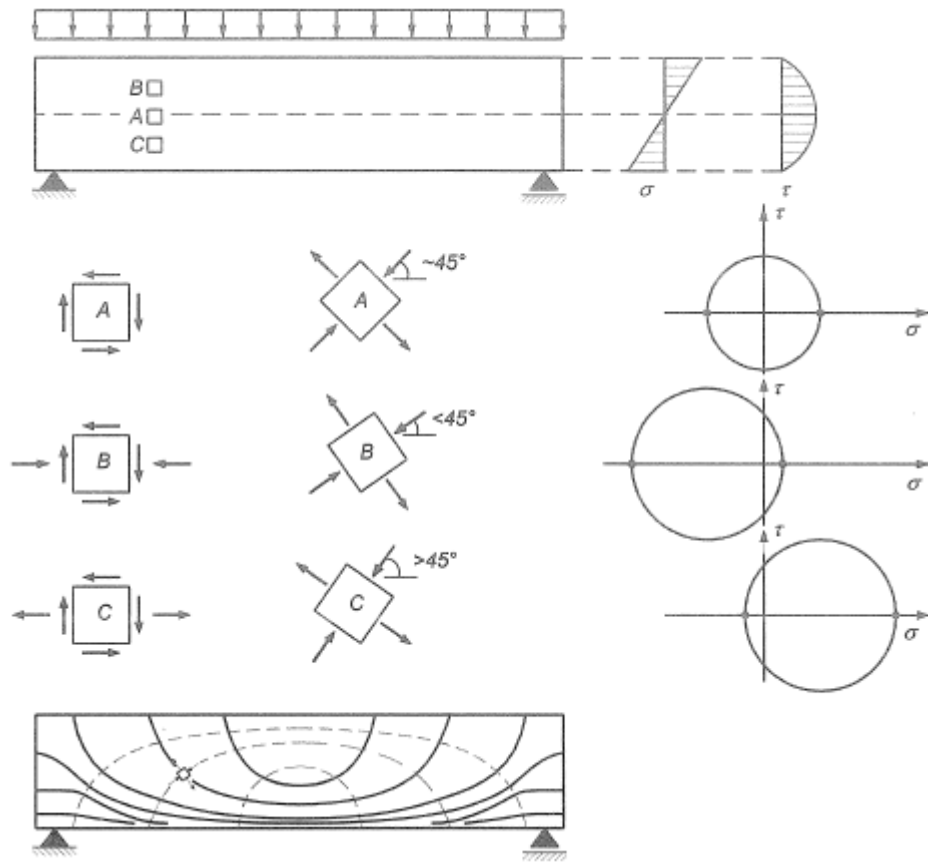
kısımında yüklenen kirişler için dikkate alınacak kesitler görülmektedir (Doğangün 2008).



Şekil 2.3. Tasarım kesme kuvveti için dikkate alınacak kesitler (Doğangün 2008)

Homojen taşıyıcı elemanların kesme kuvveti etkisi altındaki davranışının incelenmesi mukavemette genel kabul görmüş ilkeler kullanılarak yapılabilir. Eğilme momenti ve kesme kuvveti etkisi elemanlarda iki eksenli bir gerilme durumu ortaya çıkarır. Çatlamanın oluşmadığı betonarme kirişin davranışı ve meydana gelen gerilmeler bu kabullerle elde edilen ifadelerin kullanılmasıyla hesap edilebilir. Şekil 2.4’de gösterilen kirişteki üç elemanda sadece kayma gerilmesi (A), kayma gerilmesiyle basınç gerilmesi (B) ve kayma gerilmesi ile çekme gerilmesi (C) meydana gelmektedir. Bu elemanlardaki asal gerilmeler hesaplandığında eğik asal basınç gerilmeleri yanında ona dik doğrultuda çekme gerilmelerinin de oluştuğu görülür. Yalnız kayma gerilmesini bulunması durumunda asal gerilmeler eşit olarak 45° eğimle ortaya çıktığı halde, kayma gerilmesine ek olarak basınç veya çekme gerilmelerinin bulunması bu açının

değişmesine neden olur. Şekil 2.4'deki kirişteki asal gerilme yörüngeleri de gösterilmiştir. Basınç asal gerilme yörüngeleri eleman içinde oluşan kemerler olarak ve çekme asal gerilmeleri ise askılar olarak düşünülebilir. Bu ikisinin beraber bulunması sonucu yükün karşılanarak mesnetlere iletilmesi sağlanır. Bu durumda kayma gerilmelerinin, eğik çekme ve basınç gerilmelerinin bulunmasına yarayan bir hesap büyüklüğü olarak da kabul edilebileceği görülür (Celep 2011).

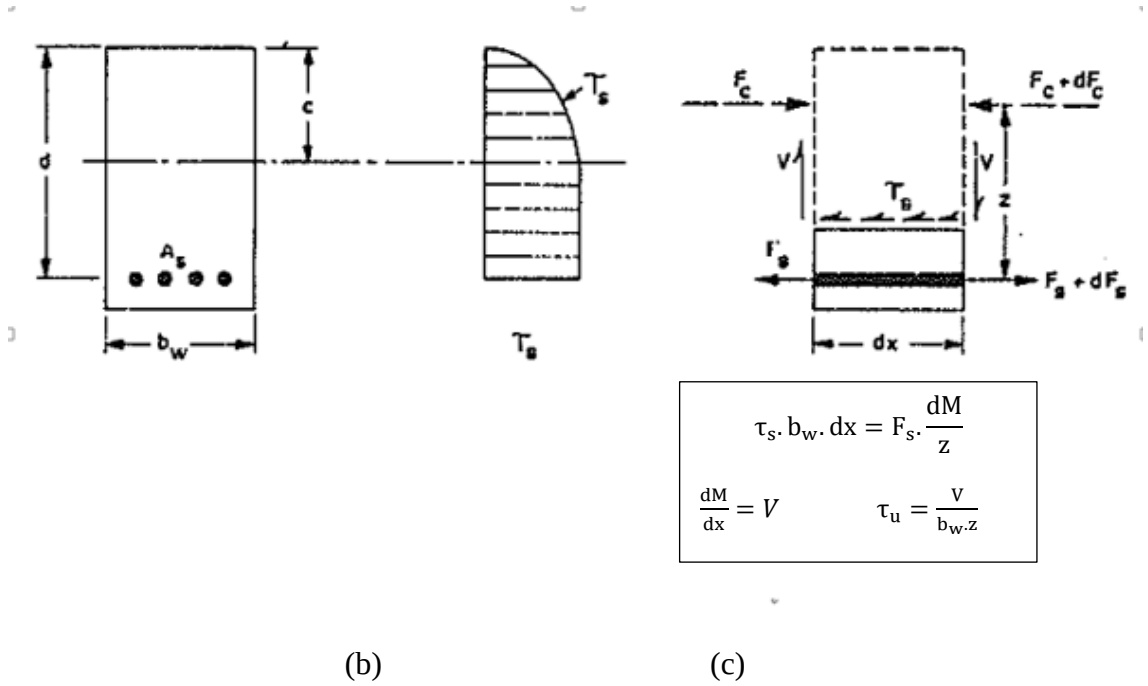


Şekil 2.4. Homojen bir kirişteki üç noktada asal gerilmeler ve çekme, basınç gerilme yörüngeleri (Celep 2011)

Betonarme elemanlarda kayma gerilmelerinin sorun yaratmadığını, çatlama ve kırılmalara, bu gerilmelerin de katkısı ile oluşan asal çekme gerilmelerinin neden olduğu, ilk kez Ritter tarafından öne sürülmüştür. Daha sonraları, Mörsch bazı deneyler yaparak kesme kuvvetlerinin neden olduğu eğik çatlama ve kırılmaları incelemiş ve Ritter'in ortaya attığı tezi geliştirerek savunmuştur. Mörsch, kesme ve eğilme etkisinde

denediği kirişlerde gözlediği eğik çatlama ve kırılmaların nedeninin asal çekme gerilmeleri olduğunu kanıtladıktan sonra, geliştirdiği teori ile kayma güvenliğinin nasıl sağlanabileceğini hususunda önerilerde bulunmuştur. 1916 yılına gelindiğinde, betonarme kesme sorunu ile ilgili tartışmalar son bulmuş ve Mörsch teorisi akademik camia tarafından benimsenmiştir. Mörsch, önerdiği hesap yönteminde asal çekme gerilmeleri yerine, kayma gerilmelerini temel almıştır. Bunun nedeni, Mörsch'ün kayma gerilmelerinin asal çekme gerilmeleri için bir ölçü olacağına inanmasıydı. Asal çekme gerilmelerinin bir ölçüsü olan kayma gerilmelerinin hesabı için, çatlamış bir betonarme kesit ele alınmış ve Şekil 2.5.b'de gösterildiği gibi, tarafsız eksen üzerinde (basınç bölgesi) kayma gerilmelerinin dağılımı, klasik teoriye uygun olarak, ikinci dereceden bir eğri ile ifade edilmiştir. Tarafsız eksen altındaki beton çatlamış olduğundan, bu bölgede kayma gerilmelerinin sabit olduğu varsayılmıştır. Şekil 2.5.c'de gösterilen serbest cisim diyagramından, şeklin altında gösterilen yol izlenerek “Mörsch Denklemi” olarak tanınan bağıntı elde edilmiştir (Ersoy 1975).

$$\tau_s = \frac{V}{b_w d} = \frac{V}{0.9 b_w d} \quad (2.13)$$



Şekil 2.5. Dikdörtgen kesitte gerilme dağılımı (Ersoy 1975)

Denklemin çıkarılmasında, Şekil 2.5.b’de gösterilen gerilme dağılımı temel alınmış ve hesaplar, donatıdaki kuvvetin dx uzaklığında dF_s kadar arttığına göre yapıldığından, kenetlenmenin (aderansın) tam olduğu varsayılmıştır. Şekilde gösterilen dF_s , dx ’e bölündüğünde, birim kenetlenme kuvveti elde edilir (Ersoy 1975).

Klasik Mörsch teorisi 1950 yılına kadar tüm dünyada uygulanmış, yalnız A.B.D. de Talbot’un önerisine uyularak, çatlamış kirişte bile beton katkısının var olduğu varsayılmıştır. 1950 yılından sonra Avrupa ve özellikle A.B.D.’de yapılan yoğun deneysel araştırmalar sonucunda, betonarme kirişlerin kayma dayanımını etkileyen ve Mörsch teorisinde dikkate alınmayan bazı yeni değişkenler bulunmuştur. Otuz beş yıldır devam eden bu çalışmalar sonunda, Mörsch teorisinin ancak aderansın tam olduğu durumlar için geçerli olduğu görülmüştür. Ayrıca, klasik kafes kiriş analojisinin de bazı durumlarda gerçeğe uymadığı gözlenmiş ve bu analogi değiştirilmiştir.

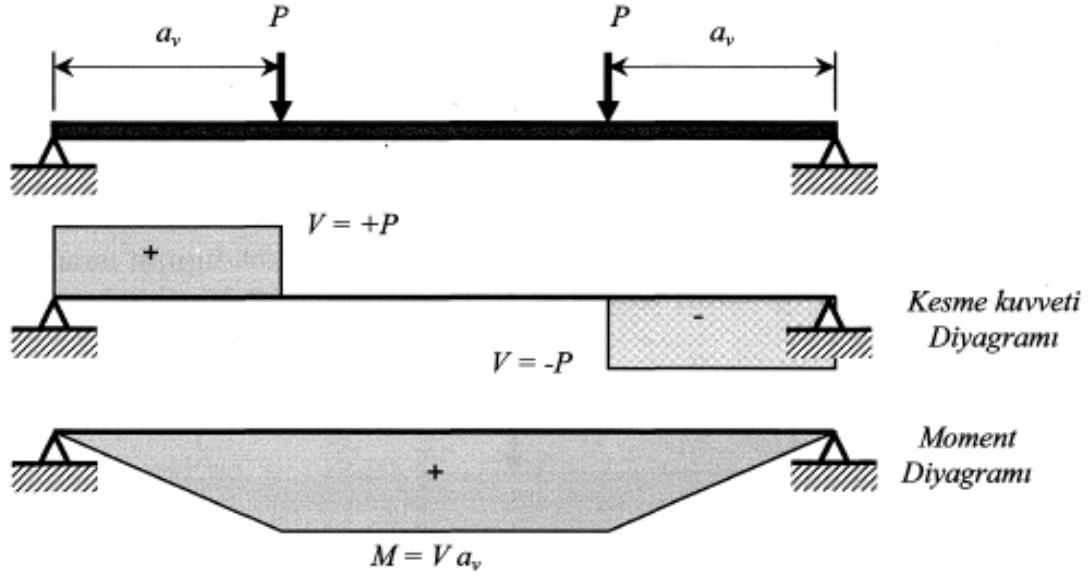
2.2.1. Kesme donatısız kirişler

Uzunluğu boyunca kesme donatısı bulunmayan bir kirişin tasarlanması yönetmelikler gereği mümkün değildir. Ancak davranışın daha iyi anlaşılabilmesi için bu başlık altında kesme donatısız kirişin davranışı açıklanmaya çalışılmaktadır. Dolayısıyla burada dikkate alınacak kirişlerde açıklığı boyunca sadece boyuna donatı bulunmaktadır.

2.2.1.a. Kesme donatısız kirişlerin davranışı

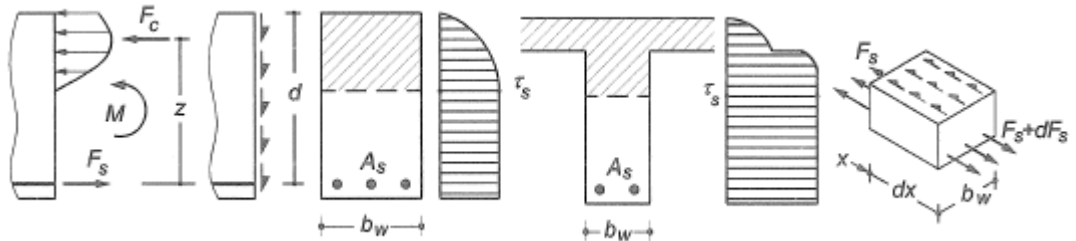
Kesitinde kesme donatısı bulunmayan bir kirişin davranışı Şekli 2.6’da gösterildiği gibi, genellikle mesnet ortasına göre simetrik olarak etkiyen ve büyüklüğü eşit iki tekil yük altında incelenmektedir. Dolayısıyla, bu kirişin mesnetlerinden tekil yüklere kadar olan kısımda kesme kuvveti ve eğilme momenti, iki tekil yük arasındaki kısımda ise sadece eğilme momenti oluşmaktadır. Tekil yükten mesnede kadar olan a_v mesafesi kesme açıklığı olarak adlandırılmaktadır. Tekil yük için tanımlanan a_v nin, diğer yükleme

durumlarını da kapsayacak şekilde genel tanımı momentin kesme kuvvetlerine oranı (M/V) olarak yapılabilir.



Şekil 2.6. Dikkate alınan kesme donatısız kiriş ve oluşan kesit etkileri

Betonarme bir kesitte oluşan eğilme normal gerilmeleri ile kayma gerilmelerinin dağılımı Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Burada tarafsız eksen altında beton çekme gerilemeleri olmadığı için kayma gerilmeleri tarafsız ekseninde en büyük değeri almakta ve donatı seviyesine kadar bu değerle devam etmektedir.

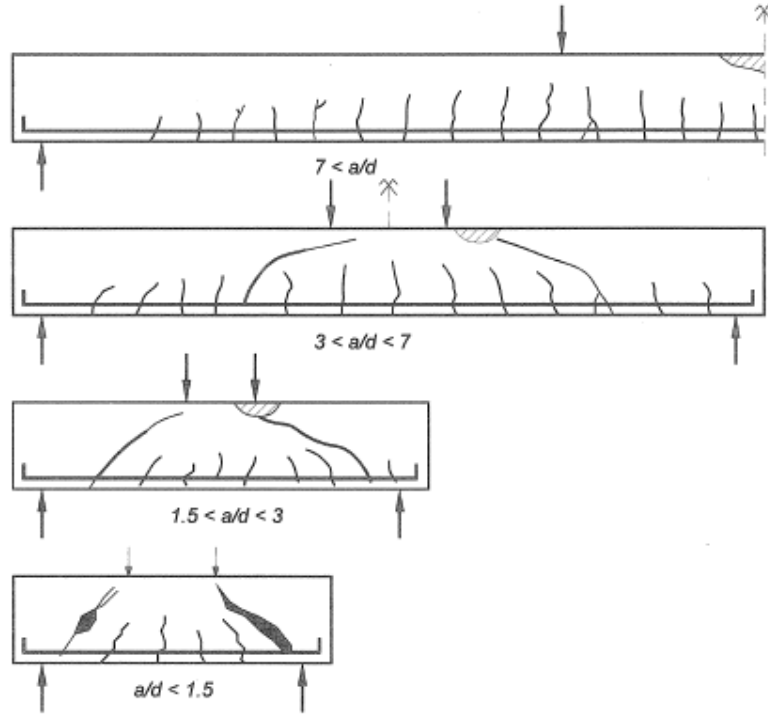


Şekil 2.7. Betonarme kesitte normal ve kayma gerilmeleri değişimi

Kiriş kesme davranışını etkileyen en önemli parametrelerden biri kesme açıklığının faydalı yüksekliğe oranıdır (a/d). Söz konusu oranının kirişin davranışını nasıl değiştirdiğine ilişkin olarak literatürde birbirine yakın olmakla birlikte faydalı bilgiler bulunmaktadır.

a/d oranının çok büyük olduğu durumlarda (yaklaşık olarak, $a/d > 7$) kiriş eğilmedeki taşıma gücüne erişebilecektir. Bu tür bir kirişte eğik çatlamlar oluşamayacağından, kırılma üzerinde kesme kuvvetinin etkisi olmayacaktır. Bunun temel nedeni, kesme açıklığı büyük olduğundan, eğilmedeki taşıma gücüne erişildiğinde kesme kuvvetinin, dolayısıyla tarafsız eksen ve onun altında oluşan asal çekme gerilmelerinin düşük düzeyde kalmasıdır.

a/d oranı 7'den büyükse, kirişin güç tükenmesi kesitin eğilme taşıma gücüne erişmesiyle meydana gelir. Kesme açıklığı büyük olduğu için, küçük kesme kuvvetlerine karşılık büyük eğilme momenti meydana gelirken, oluşan eğilme çatlaklarının büyümesiyle kesit eğilme göçmesine erişir. Kesme kuvvetinin oluşturduğu eğik çekme gerilmeleri önemli değerlere ulaşmadığı için eğik çatlaklar kirişin güç tükenmesine etkili olmaz. Eğilme çatlaklarının ilerlemesi sonucu kirişte büyük yer değiştirmeler oluşur. Şekil 2.8'de görüldüğü gibi basınç bölgesindeki betonun ezilmesiyle kiriş tamamen dayanımını kaybeder. Güç tükenmesi, büyük yer değiştirmelerden sonra olduğu için sünek ve haberli türdendir.

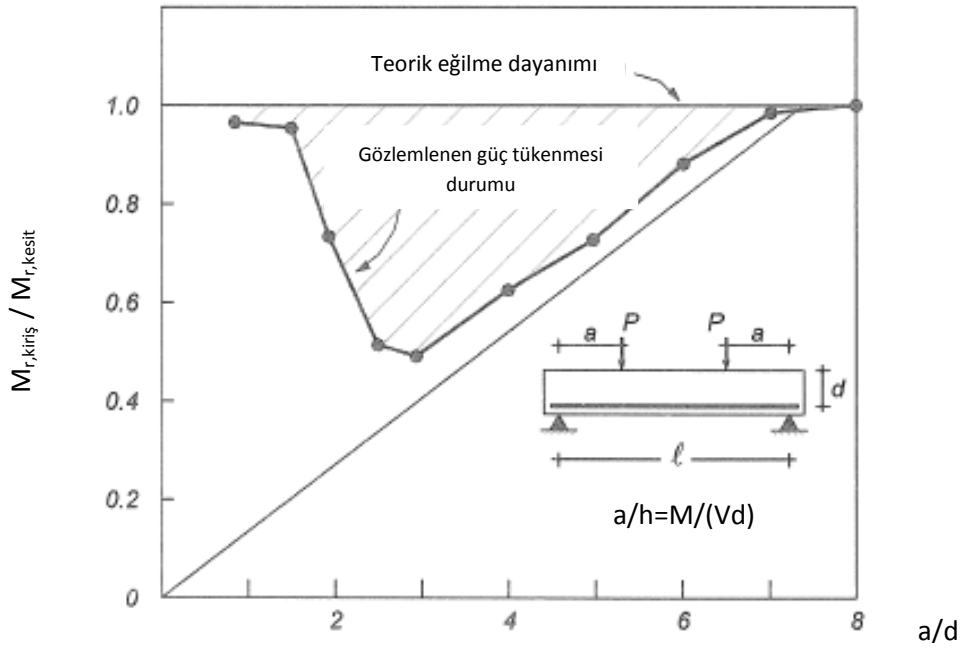


Şekil 2.8. Güç tükenmesi durumunda kirişte çatlama biçimleri

a/d oranı 7 den küçük fakat 3 den büyük olduğu durumlarda, önce eğilme çatlakları oluşacak (kiriş eksenine dik), yük arttıkça kesme açıklığında oluşan eğilme çatlakları tarafsız eksene doğru uzamaya başlayacaktır. Bu uzama sırasında sözü edilen çatlaklardan biri veya birkaçı asal çekme gerilmelerine dik yönde eğikleşmeye başlayacaktır.

Yine $3 < a/d < 7$ ise, kesme açıklığı azaldığından, kesitin güç tükenmesi momentine erişebilmesi için, eğilme momenti artarken, kesme kuvveti de büyüyecektir. Yükün artmasıyla eğilme çatlakları oluşurken, eğik çekme gerilmeleri kiriş gövdesinde önemli değerlere erişerek, çatlamaya sebep olur. Eğik çatlağın eğimi düşük olduğu için kemerleme etkisinin yükün taşınmasında önemli bir katkısı olmaz. Güç tükenmesine betondaki eğik çatlaklar ekili olduğu için ve eğilme momenti sebebiyle önemli düşey yer değiştirmeler oluşmadığı için güç tükenmesi gevrek nitelikte olup, habersiz olarak isimlendirilebilir. Şekli 2.9’da görüldüğü gibi kiriş, kesitin eğilme dayanımına erişmeden geçer. a/d oranının küçülmesiyle kesme kuvvetinin etkisi eğilmeye göre önem kazandığı için, eğik çekme gerilmelerine göre donatılmış kirişin dayanımı kesitin

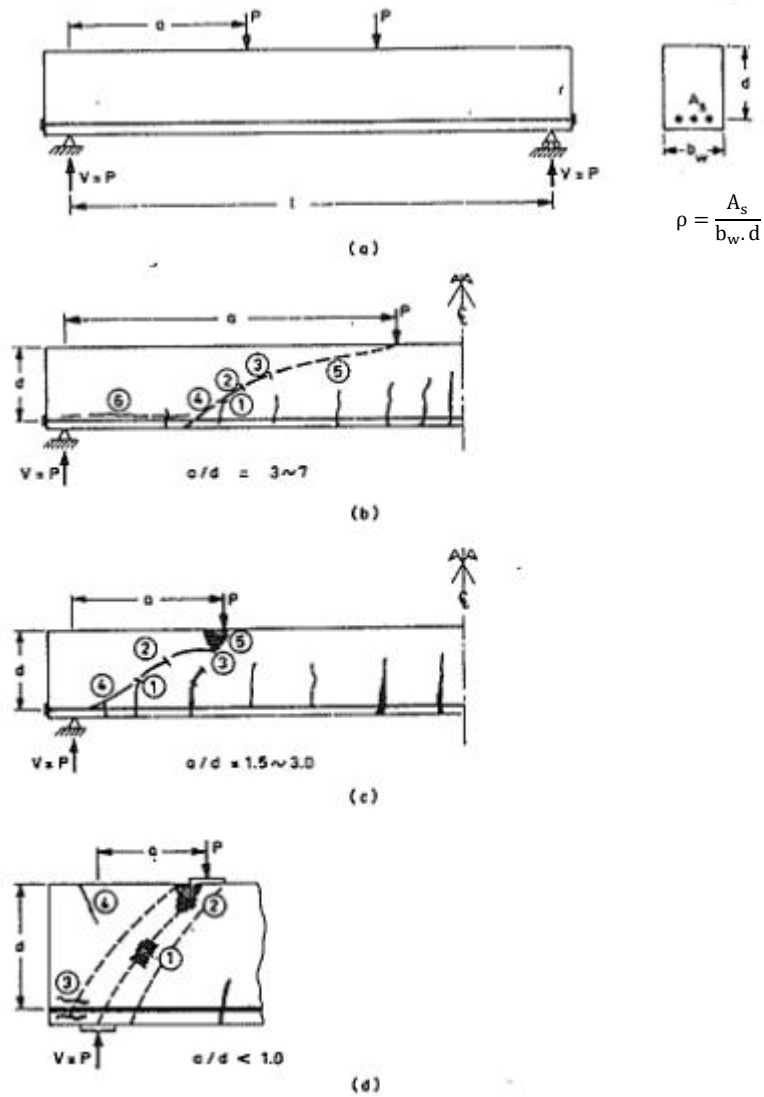
eğilme dayanımına oranla sürekli azalır. a/d oranı daha küçük kirişlerde ($1,5 < a/d < 3$), kesme açıklığının daha da küçülmesiyle, eğilmeye ek olarak eğik çatlaklar arasında oluşan beton basınç bölgelerinin dikleşmesine ve kemerlenme etkisinin belirgin bir şekilde ortaya çıkmasına sebep olur. Eğik çatlağın varlığına rağmen beton basınç bölgesinde oluşan yük mesnede basınç çubuklarıyla iletilir. Yükün arttırılmasıyla beton basınç çubuklarında en büyük gerilmenin meydana geldiği bölge olan yükün uygulandığı noktada ortaya çıkarak kiriş güç tükenmesine erişir. Ezilme nedeniyle güç tükenmesi ani olarak ortaya çıkmaz. Bu durumda kirişin taşıma gücü kesitin eğilme kapasitesine yaklaşır (Celep 2011).



Şekil 2.9. Kesme açıklığının kirişin taşıma gücüne etkisi (Celep 2011)

Kesme açıklığının çok küçük olduğu durumlarda ($a/d \leq 1$) eğik çatlak oluştuğundan sonra eğilme önemini kaybeder ve kiriş artık tamamen bir gergili kemer gibi davranır. Çekme donatısı bir gergi gibi davranırken, Şekil 2.10.d'de kesik çizgilerle işaretlenen beton, kemer gövdesi görevini yüklenir. Artık yükün mesnede aktarılması eğilme ile değil, doğrudan bu basınç çubuğu aracılığıyla sağlanır. Deneyler sırasında yapılan ölçümler, gergili kemer hipotezinin doğruluğunu kanıtlar niteliktedir. Donatıda kesme açıklığı

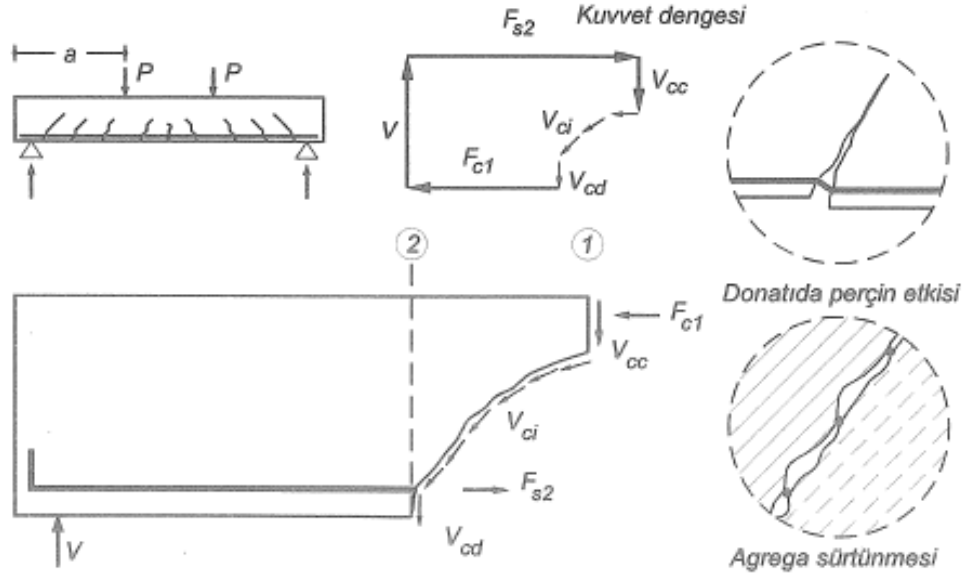
boyunca gerilme hemen hemen sabit kalırken, yük ve mesnedi birleştiren çizgi boyunca oluşan basınç gerilmeleri, tüm yükün bu yönde aktarıldığını göstermektedir. Donatıda gerilme sabit kaldığından, artık kenetlenme (aderans) ve eğilme davranışı söz konusu değildir. Kesme açıklığının çok küçük olduğu durumlarda ($a/d \leq 1$) kiriş kırılma konumuna ulaşmadan donatı akar, yani kiriş eğilme kapasitesine erişir. Kırılma iki ayrı biçimde oluşabilir. Birincisi, gövdenin basınç gerilmeleri nedeni ile ezilmesi (Şekil 2.10'da 1 ve 2 olarak işaretlenmiş); ikincisi ise basıncın aktarılması sırasında donatıda oluşan yüksek gerilmeler nedeni ile kenetlenmenin yok olması (Şekil 2.10'da 3 olarak işaretlenmiş). Tipik eğilme davranışından çok değişik olarak, mesnet bölgesinde donatıdaki gerilmeler çok yüksek olduğundan bu tür kirişlerde kenetlenme büyük sorun yaratır. Gergili kemer davranışının doğal bir sonucu olarak, kiriş üst yüzeyinde çekme çatlakları da oluşabilir. Bu tür bir çatlak şekilde 5 olarak işaretlenmiştir. Leonhardt, deneylerde yaptığı ölçümlerle kiriş üst yüzeyinde büyük çekme gerilmeleri oluşabileceğini kanıtlamıştır (Ersoy 1975).



Şekil 2.10. Betonarme kiriş elemanda burulma (Ersoy 1975)

Şekil 2.11’de yeterli eğilme donatısı bulunan fakat kesme kuvveti donatısız bir kirişte yükün arttırılması sonucu ortaya çıkan çatlaklar ve kirişin dış ve iç kuvvetlerle dengede olan bir bölümü gösterilmiştir. Şekilde görülen dış ve iç kuvvetlerle kirişin bu bölümü dengede bulunmaktadır. Görüldüğü gibi, V etkiyen kesit kesme kuvveti, V_{cc} basınç bölgesinde taşınan kesme kuvveti yanında, çatlama sonucu oluşan yüzeylerdeki agreganın birbirine değerek relatif harekete zorlanması sonucu ortaya çıkan sürtünme kuvveti V_{ci} ile donatı çubuğundaki kaldıraç etkisi olarak bilinen olay sonucu ortaya çıkan V_{cd} kuvvetleri ile dengelenir (Celep 2011).

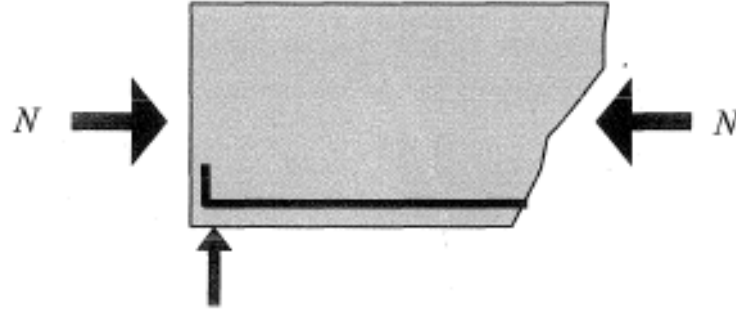
$$V = V_{cc} + V_{ci} + V_{cd} \quad (2.14)$$



Şekil 2.11. Kesme kuvveti donatısız kirişte eğik çatlama ve kesme kuvvetinin (Celep 2011)

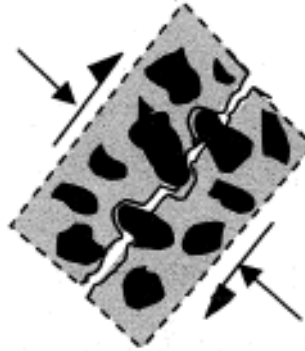
Yukarıdaki bağıntıdan görüldüğü gibi kesme donatısı bulunmayan kiriş kesitindeki V kesme kuvveti, üç iç kuvvet tarafından karşılanmaktadır. Bu üç kuvvet aşağıdaki açıklanmaktadır.

1) V_{cc} : Çatlamamış basınç bölgesindeki beton tarafından taşınan kesme kuvvetidir. Betonun bu kısmı, kesme kuvvetini karşılamaya %20-%40 civarında bir katkıda bulunmaktadır. Kesitte etkiyen basınç kuvvetlerinin büyüklüğü arttıkça, basınç etkisinde kalan beton kesiti de artmaktadır (Şekil 2.12). Dolayısıyla da daha büyük kesit, daha büyük kesme kuvveti karşılayabilecektir. Fakat yükün büyüklüğünün aşırı artması durumunda, basınç kuvvetinin olumlu etkisi tersi bir durum alıp, kesme dayanımı için olumsuz olamaya başlamaktadır (Doğangün 2008).



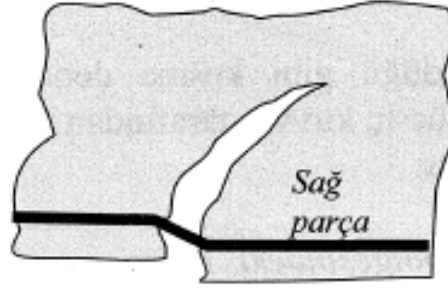
Şekil 2.12. Basınç kuvvetinin kesmeye etkisi (Doğangün 2008)

2) V_{ci} : Çatlak yüzeyindeki sürtünme nedeniyle karşılanan kesme kuvveti. Çatlak yüzeyinin etkisi, kesme kuvvetini karşılamaya %33-%50 civarında katkıda bulunmaktadır (Doğangün 2008).



Şekil 2.13. Oluşacak çatlak yüzeyinin kesmeye etkisi (Doğangün 2008)

3) V_{cd} : Çekme donatısınca taşınan kesme kuvvetidir. Bu kesme kuvvetini karşılamaya %15-%25 civarında bir katkıda bulunmaktadır. Eğik çatlak oluşuktan sonra çatlağın sağında kalan kiriş parçası, aşağı doğru yer değiştirmeye, donatı ise bunu engellemeye çalışmaktadır (Şekil 2.14). Bu etki kaldıraç etkisi olarak adlandırılmaktadır (Doğangün 2008).



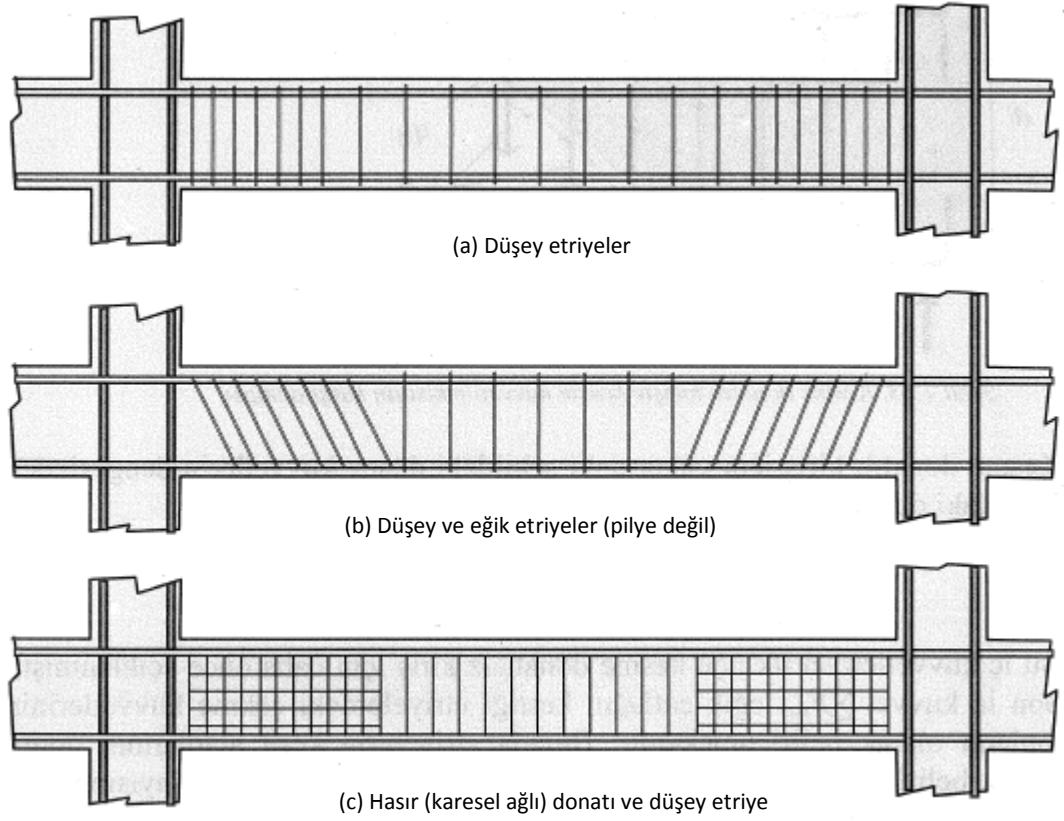
Şekil 2.14. Çekme donatısının kaldıraç etkisi (Doğangün 2008)

Agrega yüzeyleri arasında ortaya çıkan kuvvet, çatlak yüzeylerinin açılmasıyla ve donatıdaki kaldıraç etkisiyle meydana gelen kuvvet de beton örtüsünün dökülmesiyle azalır ($V_{ci} \rightarrow 0$, $V_{cd} \rightarrow 0$) (Celep 2011).

$$F_{s2} = F_{c2} = \frac{M_1}{z} > \frac{M_1}{z} \quad (2.15)$$

2.2.2. Kesme donatılı kirişler

Kesme donatıları etriyeler, pilyeler ve hasır donatı olarak sınıflandırılabilir. Ancak, bunlardan pilyelerin kesme dayanımına katkıları yönetmelikler gereği ihmal edildiğinden, artık kesme donatısı olarak kabul edilmemektedir. Pilyeler, genellikle bir kesitte kıvrıldıklarından, özellikle deprem gibi yön değiştiren etkiler altında asal çekme gerilmelerine karşı etkisiz kalmaktadır. Diğer taraftan etriyeler, pilyelere göre daha olumlu bir davranış göstermektedir. Örneğin, pilye kullanıldığında oluşan çatlak genişliği etriyeli duruma göre daha büyük olmakta ve mesnet yakınına uygulanan yüklerin mesnede aktarılmasında etriyeler kemeri sargılayarak pilyelerden daha etkili olmaktadır. Bu durumda kesme donatısı olarak geriye etriyeler ve hasır donatı kalmaktadır (Şekil 2.15). Etriyeler genellikle düşey yerleştirilmekle birlikte, bazen eğik olarak da düzenlenmektedir.



Şekil 2.15. Kirişlerde uygulanan kesme donatılan (Doğangün 2008)

Hasır donatı karesel bir ağ oluşturduğundan, asal çekme gerilmelerinin yönü ne olursa olsun etkili olabilecektir. Önceleri asal çekme gerileri ile aynı yönde yerleştirilen (45°) pilyelerin, asal çekme gerilmelerine yaklaşık 45° 'lik bir açı yapan düşey etriyelerden daha etkili olduğuna inanılıyordu. Ancak, ABD ve Avrupa'da yapılan deneysel araştırmalar, pilyelerin etriyeler kadar etkili olmadığını kanıtlamıştır. Mesnet yakınında uygulanan yüklerin, oluşan bir basınç çubuğu ile mesnede aktarıldığı ve bu çubuğun bir kemer gövdesi gibi çalışmaktadır. Bütün bunlara ek olarak, deprem etkisi altında bir tersinme söz konusu olduğu durumlarda asal çekme gerilmeleri pilyeye dik yönde oluşacağından pilye tamamen etkisiz kalacaktır. Yapılan deneylerde tablalı kirişlerde oluşan eğik çatlakların, tabla düzeyine ulaştıklarında yatay bir yön izleyerek tablayı gövdeden ayırdıkları gözlenmiştir. Bu gibi durumlarda etriye adeta bir dikiş donatısı gibi davranarak, tablanın gövdenin ayrılmasını engellemektedir. Pilyeler bu konuda etriyeler kadar etkili olamamaktadır (Ersoy 1975).

Kesme kuvveti donatısı olarak etriyelerin kullanılmasının faydaları ise aşağıdaki gibi sıralanabilir:

Eğik çekme gerilmelerinin kiriş eksenini boyunca yayılı olması nedeniyle, belirli aralıklarla düzgün yerleştirilen etriyeler, etkinin karşılanması bakımından uygundur.

Eğik çekme gerilmeleri ile belirli açı yapan etriyeler kesme kuvvetinin işaretinin değiştiği durumda da uygundur.

Etriyeler kiriş boyuna donatısını betona bağlayarak bunların kesme kuvvetinin karşılanmasındaki perçin etkisini arttıırırlar.

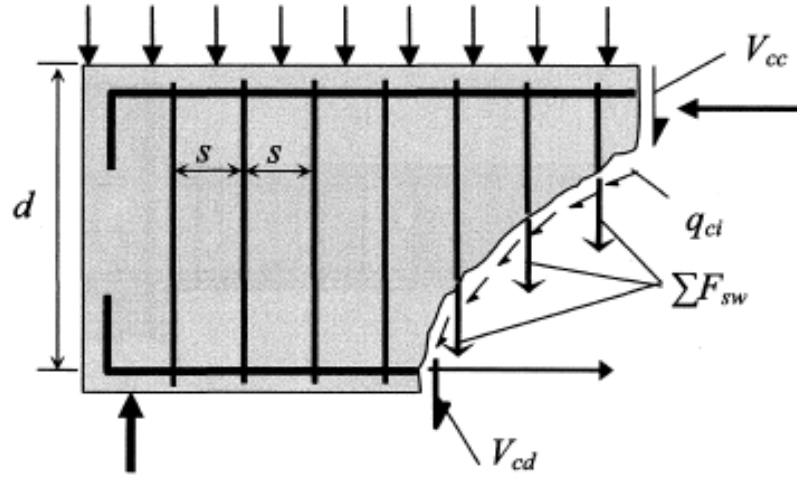
Kesme kuvvetinin karşılanmasında ortaya çıkan beton basınç kuvvetleriyle beraber kafes sistem etkisi oluştururlar.

Eğik çekme gerilmelerinden ortaya çıkan çatlakları sınırlayarak kesme kuvvetinin bir kısmının agrega sürtünmesi ile taşınmasını sağlarlar.

Özellikle sık kullanılan etriyeler durumunda betonun yanal şekil değiştirmesini sınırlandırarak betonun hem dayanımını ve hem de sünekliğini arttıırırlar.

2.2.2.a. Kesme donatılı kirişlerin davranışı

Kirişlerin kesme etkisinde ani ve gevrek kırılmalarını önlemek amacıyla TS500-2000 ve Deprem Yönetmeliğinde kiriş uzunluğu boyunca belirli aralıklarla enine donatı bulundurulması zorunlu tutulmaktadır. Kesme donatıları eğik çatlakların oluşmasını engelleyemez. Ancak tekniğine uygun olarak yerleştirilen kesme donatıları çatlakların kılcal düzeylerde kalmasını sağlayacaktır. Kesme donatısının temel işlevi, eğik çatlakların kılcal düzeyde kalmasını sağlayarak, elemanın kesmeden dolayı gevrek bir şekilde kırılmasını önlemektir. Kesme donatısı bulunan bir kirişte kesme kuvveti Şekil 2.16’da gösterildiği gibi dört iç kuvvet (V_{cc} , V_{ci} , V_{cd} ve $\sum F_{sw}$) tarafından karşılanmaktadır (Doğangün 2008).



Şekil 2.16. Kesme donatılı kirişte kesme kuvveti etkisinin karşılanması (Doğangün 2008)

Yapılan deneyler, kayma donatılı bir kirişin eğik çatlama oluşuncaya kadar kayma donatısız kiriş gibi davrandığını göstermiştir. Bu aşamada etriyeler üzerinde yapılan ölçümler bu çubukların gerilme almadığını göstermektedir. Eğik çatlağın oluşması ile çatlakla kesişen etriyelerde aniden büyük gerilmeler oluşmaktadır. Yeterli etriye bulundurulmadığı veya etriyenin çok seyrek yerleştirildiği durumlarda, eğik çatlamanın oluşması ile eleman gevrek bir biçimde kırılacaktır. Bu tür kırılmayı önlemek için, yönetmeliklerde minimum etriye ve maksimum aralık koşulu vardır. Etriyei artırarak kiriş kapasitesini sınırsız büyütmek de mümkün değildir.

Avrupa'daki görüşler son yirmi yılda büyük çapta değişmiştir. Bugün kayma güvenliği için daha kesin hesap yapılmak istendiğinde, Mörsch klasik kafes kiriş analojisi yerine daha gelişmiş modeller kullanılmaktadır (Leonhardt veya Thürliman modelleri gibi). Daha kesin hesap yapılmak istenmeyen durumlarda ise, Leonhardt'ın önerileri paralelinde kafes kiriş analojisinde elde edilen sonuçlar bir düzeltme terimi ile değiştirilmektedir. Leonhardt kayma donatısı tarafından karşılanan kesme kuvveti için aşağıdaki bağıntıyı önermiştir (Ersoy 1975).

$$V_w = V_d - V_c \quad (2.16)$$

Denklemdaki V_c düzeltme terimidir ve yaklaşık olarak eğik çatlama dayanımına eşittir.

$$V_c \cong V_{cr} \quad (2.17)$$

Klasik kafes kiriş analojisinden gerekli kayma donatısı alanı A_{sw} nun hesaplanması öngörülmektedir.

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_w}{f_{ywd}(z)} = \frac{(V_d - V_c)}{f_{ywd}0,9d} \quad (2.18)$$

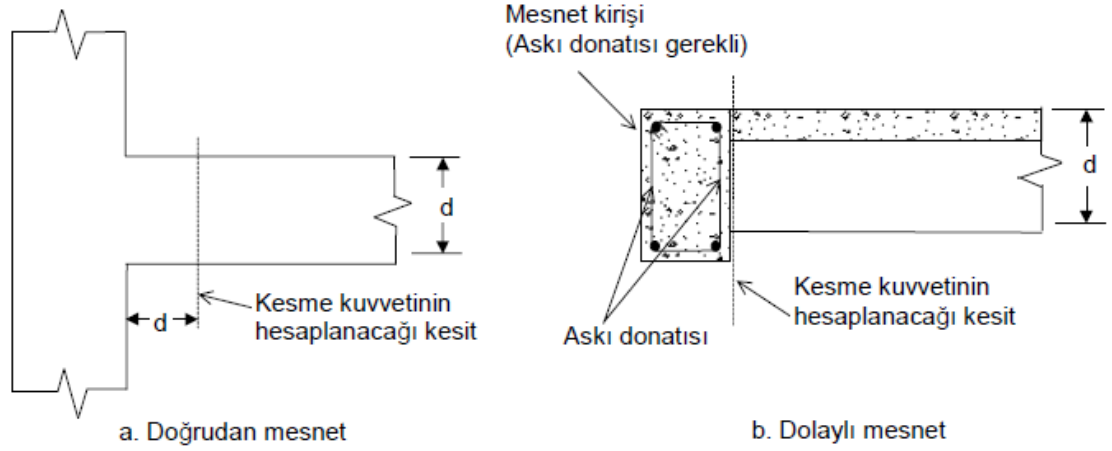
2.2.3. TS 500’de kesme ve burulma

2.2.3.a. Kesme kuvveti etkisi

Betonarme yapı elemanlarında eğilme momenti ile birlikte etkiyen kesme kuvvetlerinin oluşturduğu asal çekme gerilmeleri, beton ve uygun kesme donatısı ile karşılanacak, asal basınç gerilmelerinin de gövdede ezilme oluşturmayacak bir düzeyde tutulması sağlanacaktır.

1. Kesme kuvveti hesabı

Tasarım kesme kuvveti V_d , mesnet yüzünden kiriş faydalı yüksekliği (d) kadar uzaklığında hesaplanmalıdır. Ancak, mesnet olarak başka bir eğilme elemanına oturan kirişlerde mesnet yüzündeki kesme kuvveti esas alınmalıdır.



Şekil 2.17. Değişik mesnetlenme türleri (Doğangün 2008)

Tekil bir yükün mesnet yüzünden d veya daha az uzaklıkta etkiye olasılığı bulunan durumlarda da, mesnet yüzünde hesaplanan kesme kuvveti temel alınmalıdır.

2. Eğik çatlama dayanımı

Betonarme bir kesitin kesmede çatlama dayanımı, daha kesin hesaba gerek duyulmadığı durumlarda, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir. Bu denklemde N_d çekmede negatif, basınçta pozitif alınacaktır.

$$V_{cr} = 0,65f_{ctd}b_w(1 + \gamma \frac{N_d}{A_c}) \quad (2.19)$$

Denklemde eksenel basınç durumunda $\gamma=0,007$, eksenel çekme durumunda ise $\gamma=-0,3$ alınacaktır. Güvenilir bir yöntem kullanılarak ve gövde beton kesit alanı temel alınarak hesaplanan eksenel çekme gerilmesi, 0,5 MPa dan küçükse, $\gamma=0$ alınabilir.

3. Kesme dayanımı

Kesme güvenliği için aşağıdaki koşul sağlanmalıdır.

$$V_r \geq V_d \quad (2.20)$$

V_r : kesitin kesme dayanımı

V_d : tasarım kesme kuvveti

Kesitin kesme dayanımı, beton katkısı (V_c) ve kesme donatısı katkısının (V_w) toplanması ile elde edilir.

$$V_r = V_c + V_w \quad (2.21)$$

$$V_c = 0,8V_{cr} \quad (2.22)$$

Deprem durumunda, eleman uçlarında (sargı bölgelerinde) Afet Bölgesinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik de verilen V_c değerleri kullanılmalıdır.

Etriye katkısı:

$$V_w = \frac{A_{sw}}{s} f_{ywd} d \quad (2.23)$$

Tasarım kesme kuvveti eğik çatlama dayanımına eşit veya ondan az ise ($V_d \leq V_{cr}$) kesme donatısı hesabına gerek yoktur. Ancak, bu durumda minimum etriyenin bulundurulması zorunludur.

4. Kesme donatısı hesabı

Kesme dayanımını sağlamak için bireysel çubuklar (düşey ve yatay etriye, firkete, çiroz vb.) ve hasır donatı kullanılır. Kesme dayanımına pilye katkısı ihmal edilecektir. Etriye aralığı giriş faydalı yüksekliğinin yarısından fazla olamaz ($s \leq d/2$). Ayrıca, $V_d > 3V_{cr}$ olan durumlarda, etriye aralığı yukarıda verilen değerlerin yarsını aşamaz ($s \leq d/4$). Çerçeve

kirişlerin uçlarında, kiriş derinliğinin iki katı kadar olan bölgede, etriye aralığı aşağıdaki koşulları sağlamalıdır:

$$s \leq \begin{cases} d/4 \\ 8\phi_1 \\ 150 \text{ mm} \end{cases}$$

5. Sürtünme kesmesi

İki ayrı malzemenin birleştiği düzlemlerde veya ayrı zamanlarda dökülmüş iki beton yüzeyinin birleştiği düzlemlerde, kesme hesabı ve donatı detaylandırması belli koşullara göre yapılır. Sürtünme kesmesi için hesap yapılan düzlemde, önce bir çatlak oluştuğu varsayılır. Sürtünme kesmesi için de $V_r \leq V_d$ koşulu sağlanmalıdır. Bu denklemdeki V_r aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$V_r = A_{wf} f_{yd} \mu \quad (2.24)$$

Denklemde, kesme sürtünme donatısı kesit alanı olarak (A_{wf}) yalnızca birleşme düzlemine dik doğrultuda düzenlenmiş donatı çubuklarının toplam alanı kullanılmalıdır. μ ile gösterilen kesme sürtünme katsayısının değerleri, çeşitli durumlar için Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Değişik durumlar için kesme-sürtünme katsayısı

Birdöküm beton (monolitik)	$\mu=1,4$
Sertleşmiş beton ile yeni betonun birleştiği yüzeylerde	$\mu =1,0$
pürüzlendirilmiş yüzey (pürüz ≥ 5 mm)	$\mu =0,6$
Pürüzlendirilmemiş yüzey	$\mu =0,7$
Çelik profil ve betonun birleştiği yüzeylerde	$\mu =0,7$

Kesme sürtünme donatısının kesme düzlemine eğik olduğu durumlarda, kesme kuvveti donatıda çekme oluşturuyorsa, V_r aşağıdaki denklemden hesaplanacaktır.

$$V_r = A_{wf} f_{yd} (\mu \sin \alpha_f + \cos \alpha_f) \quad (2.25)$$

Kesme kuvvetinin donatıda basınç oluşturduğu durumlarda bu donatı etkili değildir. Deprem durumunda, donatı çatlak düzlemine dik olarak düzenlenmelidir. α_f açısı, kesme-sürtünme donatısının kesme düzlemi ile yaptığı dar açıdır. Sürtünme kesmesinin aşağıdaki sınırı geçmesine izin verilmez ve bu sınır hesaplanırken beton tasarım basınç dayanımı f_{cd} , 25 MPa'dan büyük alınamaz.

2.2.3.b. Kesme kuvveti ve burulma

Burulma, kesme ve eğilme altında zorlanan yapı elemanlarında oluşacak asal çekme gerilmeleri, yeterli donatı ile karşılanmalı, asal basınç gerilmesi ise, gövdede ezilme oluşturmayacak bir düzeyde tutulmalıdır.

Yapı sistemlerinde burulma, denge burulması ve uygunluk burulması olarak iki sınıfa ayrılır.

1. Eğik çatlama sınırı

Kesme kuvveti yanı sıra burulma momentinin de bulunduğu durumlarda eğik çatlama sınırı aşağıdaki bağlantı ile belirlenmelidir.

$$\left(\frac{V_d}{V_{cr}} \right)^2 + \left(\frac{T_d}{T_{cr}} \right)^2 \leq 1 \quad (2.26)$$

$$T_{cr} = 1,35 f_{ctd} S \quad (2.27)$$

$$V_{cr} = 0,65f_{ctd}b_w \left(1 + \gamma \frac{N_d}{A_c}\right) \quad (2.28)$$

S, burulma dayanım momenti olup, daha kesin hesap yapılmayan durumlarda bu değer Çizelge 2.2'den alınabilir.

Çizelge 2.2. Değişik kesitler için yaklaşık burulma dayanım momentleri

Dikdörtgen kesti	$S = b_w^2 h/3$
Tablalı kesit	$S = \sum yx^2/3$
Dairesel veya dış bükey çok kenarlı kesit	$S = \pi\phi^3/12$
İnce çeperli ($t_e < 1/x$ ise), kutu kesitler	$S = 2A_e t_e$

Çizelgede x ve y tablalı kesiti oluşturan dikdörtgenlerin kısa ve uzun kenarlarıdır. Bu hesaplarda, gövde dışına taşan tabla genişliği, tabla kalınlığının üç katından fazla alınmamalıdır.

2. Tasarım kuvvetlerinin saptanması

Tasarım burulma momenti, denge burulması olan durumlarda, elastik yapısal çözümlemeden elde edilen değerdir. Kesit hesabında bu moment azaltılmadan kullanılmalıdır. Uygunluk burulmasında ise, burulma momentinin hesabına gerek yoktur, bu değer çatlama momentine eşit kabul edilir.

$$T_d = T_{cr} \quad (2.29)$$

$$\frac{A_0}{s} = \frac{A_{0v}}{s} + \frac{A_{0t}}{s} \quad (2.30)$$

$$\frac{A_0}{s} = \frac{b_w(V_d - V_c)}{d.n.f_{ywd}} \quad (2.31)$$

$$A_{0t} = \frac{T_d}{2A_e f_{ywd}} \quad (2.32)$$

$T_d \leq 0,65.f_{ctd}.S$ olan durumlarda burulma ihmal edilebilir. Bu durumlarda, minimum etriye koşulu sağlanmalıdır.

3. Dayanım

Tasarım kesme kuvveti ve tasarım burulma momenti $(V_d/V_{cr})^2 + (T_d/T_{cr})^2 \leq 1$ sağlıyorsa, etriye hesabına gerek yoktur. Eğer bu şart sağlanmıyorsa, etriye hesabı aşağıdaki gibi yapılır.

Çok kollu etriye düzenlendiğinde, iç kollar burulma donatısı olarak göz önüne alınamaz. Burulmanın bulunduğu durumlarda, A_e alanını çevreleyen etriyenin kesit alanı A_{0t} den az olamaz ve burulma için gerekli etriye eşit hacimde boyuna donatı bulundurulması zorunludur. Gerekli boyuna donatı aşağıdaki gibi hesaplanmalıdır.

$$A_{sl} = \frac{A_{0t}}{s} u_e \frac{f_{ywd}}{f_{yd}} \quad (2.33)$$

Eğilme ve eksenel kuvvet için gerekli boyuna donatılar ayrıca hesaplanarak, yukarıdaki donatıya eklenir.

4. Gevrek kırılmanın önlenmesi

Gevrek kırılmanın önlenmesi minimum donatı, üst sınır ve donatı detayları olmak üzere üç şekilde olur.

Minimum donatı olarak gevrek kırılmanın önlenmesi aşağıdaki gibidir.

Asal çekme gerilmeleri nedeni ile oluşacak kırılmanın önlenmesi için, aşağıdaki minimum etriye ve boyuna donatı zorunludur.

$$\frac{A_0}{s} \geq 0,15 \frac{f_{ctd}}{f_{yw}} \left(1 + 1,3 \frac{T_d}{V_d b_w} \right) b_w \quad (2.34)$$

Bu bağlantıda $T_d/V_d b_w \leq 1$ alınmalıdır. Uygunluk burulmasında $T_d = T_{cr}$ alınır. Ayrıca, A_e alanını çevreleyen etriye, bu denklemdeki ikinci terimden (burulma minimum etriyesi) az olmamalıdır.

$$A_{sl} = \frac{T_d u_e}{2 f_{yd} A_e} \quad (2.35)$$

Üst sınır olarak gevrek kırılmanın önlenmesi aşağıdaki gibidir.

Yüksek asal basınç gerilmeleri nedeni ile gövde betonunun ezilmesini önlemek amacıyla, zorlamalar aşağıdaki biçimde sınırlanmıştır. Bu koşul sağlanamazsa, giriş kesit boyutları büyütülecektir.

$$\frac{T_d}{S} + \frac{V_d}{b_w d} \leq 0,22 f_{cd} \quad (2.36)$$

Donatı Detayları olarak gevrek kırılmanın önlenmesi aşağıdaki gibidir.

Kesme kuvveti ile burulma momenti birlikte etkidikleri durumlarda, etriye ve boyuna donatı için aşağıdaki koşullara uyulmalıdır.

Burulmanın ihmal edilemeyeceği durumlarda etriye uçlarının 90° kancalı ve bindirmeli yapılmasına izin verilmez. 135° kancalı yapalı etriyeler kullanılır ve etriye uçları çekirdek içinde kenetlenir. Etriye aralığı da aşağıdaki sınırları aşmayacaktır.

$$s \leq \begin{cases} d/2 \\ u_e/8 \\ 300\text{mm} \end{cases}$$

Burulma için hesaplanan boyuna donatı, kesit çevresine dağıtılarak, her köşede çapı 12 mm den küçük olmayan çubuklar kullanılır. Boyuna çubuklar arasındaki uzaklık 300 mm'yi geçemez.

2.3. Kendiliğinden Yerleşen Beton

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), özel bir karışım hesabı ve dizaynı bulunan, slump kavramı yerine yayılma kavramı ile değerlendirilen ve yerine kendiliğinden yerleşen, bu amaçla vibratör kullanılmasına kesinlikle gerek olmayan, kolay pompalanan, su/çimento oranı düşük, yüksek dayanımlı, segrege olmayan, kendiliğinden sıkışan ve seviyelenen, kolaylıkla döküldüğü kalıbın şeklini alan, mükemmel yüzey bitişi sağlayan yüksek dayanımlı bir betondur (Kaymak 2010).

Kendiliğinden yerleşen beton günümüzde farklı isimlerle anılmaktadır. Özellikle döşeme tipi, geniş boyutlu yüzeysel alanlarda kullanılması halinde Kendiliğinden Yüzeylenen Beton (Self Levelling Concrete-SLC) adını almaktadır. Kuzey Amerika'da, Kendiliğinden Konsolide Olan, Çöken Beton (Self Consolidating Concrete-SCC) adı kullanılmaktadır. Kullanım alanı ve bölgeye göre değişen bu isimler birbiri yerine de kullanılmaktadır. Türkiye'de çoğunlukla Kendiliğinden Yerleşen Beton terimi

kullanılmakta olup Kendiliğinden Sıkışan Beton veya Kendiliğinden Sıkışarak Yerleşen Beton isimleri de alternatif olarak kullanılmaktadır (Orhan 2012).

Taze beton yerine yerleşirken iri agregaların beton içinde çarpışması ve sürtünmesi iç gerilmeleri artırmakta bu da betonun akış enerjisini önemli şekilde düşürmektedir. Özellikle yoğun donatılı bölgelerde ve dar kesitlerde iri agregaların sürtünme ve çarpışması artmakta ve bloklanma tehlikesi meydana gelmektedir. KYB üretiminde önemli etkenlerden bir tanesi de betondaki mikrofiller kullanımıdır. Mikrofiller malzemelerin kullanılması ile birlikte iri agregalar arasındaki mesafe artmaktadır. Silis unu, silis dumanı, çucu kül gibi mikrofiller malzemeler iri taneler arası sürtünmeyi azaltarak akıcılığı arttırmakta, vizkoziteyi belli değerlerde tutarak ayrışma tehlikesini düşürmekte aynı zamanda boşluk dolduruculuk etkileri ile yoğunluğu ve geçirimsizliği artırırken mukavemete de önemli katkı sağlamaktadır. Bu malzemeler betonun hem reolojik özelliklerini hem de dayanımlarını olumlu yönde etkilemektedir (Dinç 2007).

KYB, yüksek akıcılık özelliğinin yanında ayrışmaya karşı dirençli olarak da tasarlanmalıdır. KYB'nin yüksek akıcılık ve stabilitesinin (ayrışmaya karşı direncinin) sağlanması için geleneksel sıkıştırma işlemi gören normal betonlardan farklı bazı tasarım ilkeleri vardır. KYB'de akıcılık özelliği yeni nesil süperakışkanlaştırıcılar ile sağlanmaktadır. Yüksek akıcılığın yanında stabilitesinin de sağlanabilmesi için parçacık boyutu genellikle 0,125 mm'den küçük toz malzemeler yüksek oranda kullanılmaktadır. KYB'nin yüksek akıcılık ve ayrışmaya karşı yüksek direnç (stabilite) özelliğinin yanında dar engeller arasında geçiş yeteneği de yüksek olmalıdır. Bunun sağlanabilmesi için betonun şekil alabilme yeteneğinin geliştirilmesi gerekmektedir. KYB'nin şekil alabilme ve dolayısıyla dar engeller arasında geçiş yeteneğinin geliştirilmesi için hamur hacminin geleneksel sıkıştırma işlemi gören beton karışımlarda olduğundan daha yüksek, toplam agrega miktarı daha düşük ve en büyük agrega çapının ise sınırlı olması gerekmektedir. KYB'nin alınan özellikleri sağlayabilmesi için düşük eşik kayma gerilmesine ve optimum viskoziteye sahip olması gerekmektedir. KYB'nin akıcılık, viskozite ve geçiş yeteneğinin değerlendirilmesine yönelik tek bir deney yöntemi geliştirilmemiş olmasına karşın, bu temel özelliklerinin dolaylı olarak değerlendirildiği

bazı test yöntemleri (henüz tam olarak standartlaşmamış olmasına rağmen) geliştirilmiştir (Yardımcı 2007).

2.3.1. Tarihsel gelişimi

KYB'nin ilk örneklerini oluşturan, yerleştirmek veya sıkıştırmak için çok az vibrasyon isteyen geleneksel betonlar Avrupa'da 1970'lerin başından beri kullanılmaktaydı. Japonya'da azalan iş gücü nedeniyle Tokyo Üniversitesi tarafından 1986 yılında araştırılmaya başlanmasıyla KYB oluşmaya başladı. KYB ile ilgili ilk araştırma sonuçları 1989 yılında yayınlanmaya başlanmıştır. Prof. Dr. Hajime Okumura tarafından başlatılan çalışmalar Ozawa, Ouchi ve Maekawa tarafından devam ettirilmiştir. Yaptıkları çalışmaların en geniş özetini 1992 yılında İstanbul'da gerçekleştirilen uluslararası beton kongresinde yayınlanmışlardır.

KYB Avrupa'da ilk olarak İsveç tarafından 1990'ların ortalarında kullanılmıştır. İsveç KYB betonunu karayolunda kullanmıştır. İlerleyen yıllarda Avrupa Birliği KYB'nin Avrupa ülkelerinde kullanımını arttırmayı hedeflemiştir.

Avrupa Birliği, çerçeve programları dahilinde KYB ile ilgili önemli bir proje gerçekleştirilmiştir. Brite EuRam BE96-3801 nolu, KYB ile ilgili tüm alanları kapsayan bu proje 1997 yılının başında başlamıştır. İsveç, Fransa, İskoçya, İspanya ve Belçika'nın katıldığı bu çok uluslu proje 2000 yılının sonlarına doğru tamamlanmıştır. Projenin sonuçları EFNARC'ın KYB ile ilgili temel prensiplerini oluşturmaktadır. Bu çalışma ve daha sonra Avrupa da yapılan çalışmalardan sonra KYB konusunda EFNARC 2002, ve EFNARC 2005 standartları geliştirilmiştir. Yine Avrupa'da "EN" standartlarını geliştirme çalışmaları devam etmektedir (Alyamaç 2008).

KYB hakkında ilk makale, 1989 yılında Ozawa tarafından yazılmıştır. KYB hakkında ilk kitap ise 1993 yılında Okamura tarafından yazılmıştır.

Her ne kadar KYB'nin ilk uygulamalarının Japonya'da su altı beton dökümleriyle başladığı Japon araştırmacılar tarafından savunulsa da bu konuda farklı görüşler mevcuttur. 1974'de o dönemin gelişmiş akışkanlaştırıcıları kullanılarak "Reoplastik Beton" (çökme değeri 20 cm'nin üzerinde) adı verilen kohezif kıvamlı beton üretilmiştir. Amerikan Beton Enstitüsünün (ACI) o yıllar için verdiği 175 mm çökme değeri sınırlaması nedeniyle bu betonun yaygınlaşması mümkün olamamıştır. Akışkanlaştırıcıların performansının yetersizliği ve kullanımının düşük seviyelerde olması bu betonun gelişmesini engellemiştir. Gelişen kimyasal katkıların yaygınlaşmasıyla bu sınırlama ortadan kalkmıştır. Ülkemizde ise KYB ile alakalı akademik çalışmalar hızla sürmektedir. KYB ile ilgili TSE tarafından standart oluşturulmamıştır. KYB'nin maliyetinin normal betona göre yüksek olması ve hazır beton tesislerinde üretiminin normal betona kıyasla zor olması ve sürekli denetim maliyetleri getirmesi, bu betonun kısa vadede kullanım oranını düşürmektedir. Ancak, THBB'nin bu konuda çalışmaları sürmektedir. 2007 yılında "Kendiliğinden Yerleşen Beton Kılavuzu" adı ile bu konuda bir kitap yayınlanmıştır (Kaymak 2010).

2.3.2. Kendiliğinden yerleşen betonun avantaj ve dezavantajları

Avantajları

KYB akıcı bir kıvama sahiptir. Bu nedenle vibratör kullanımına gerek yoktur. Dolayısıyla vibratör kullanmak için fazladan işçiye ihtiyaç yoktur. Vibratör kullanılmadığı için beton döküm sırasında kalıpların zarar görmesi ihtimali daha az olur.

Betonun iyi sıkıştırılmamasından kaynaklanan boşluklu yapı daha az görülür. Bu boşluksuz yapı nedeniyle pürüzsüz bir yüzey sağlar ve sıva ihtiyacına gerek yoktur.

Perdahlanma geleneksel betona göre daha rahattır.

Su/çimento oranının düşük olması nedeniyle dayanımı yüksektir.

Onarım işlerinde akışkan özelliği nedeniyle iyi performans gösterir.

Dezavantajları

En önemli dezavantajlarından birisi geleneksel betona göre daha maliyetlidir.

KYB'nin performansı kendini oluşturan malzemelere hassastır. Bu nedenle KYB üretilirken geleneksel betona göre daha hassas davranılmalıdır.

Ülkemizde KYB ile ilgili herhangi bir standart yoktur.

Kür işlemi geleneksel betona göre daha zahmetlidir.

Kalıplar arasında boşluk olmamalıdır.

Eğimli yerlere KYB ile döküm yapılamaz.

2.3.3. Kendiliğinden yerleşen betonun kullanım alanları

Günümüzde KYB'nin maliyetinin yüksek olmasından dolayı kullanım alanı oldukça azdır. Ülkemizde KYB daha çok bakım ve onarım işlerinde kullanılmaktadır. Ülkemizde özellikle ucuz işçilik nedeniyle geleneksel betonun maliyeti, KYB'nin maliyetinden daha az olduğu için KYB ülkemizde geleneksel betona oranla daha az tercih edilmektedir. Ülkemizde KYB bakım ve onarımın yanı sıra en çok karayolu mühendisliğinde tercih edilmektedir. Bunun yanı sıra KYB ülkemizde sık donatılı köprülerin yapımında kullanılmaktadır. Dolayısıyla KYB'nin kullanım alanı ülkemizde her geçen gün artmaktadır.

KYB özel betonlar sınıfında sayılır. Genellikle büyük boyutlu inşaatlarda, sık donatılı dar kesit özelliklerinin bir arada olduğu perde tipi elemanlarda, tamir, bakım ve yenilenme işlerinde, tünel gibi özel kalıp gerektiren işlerde kullanılır. KYB henüz normal beton kadar geniş kullanım sahasına sahip değildir. Bunun en önemli nedeni maliyetiyle birlikte, dizayn ve uygulama alanlarında yeni yöntemlere ihtiyaç duyulmasıdır (Kaymak 2010).

2.3.4. Kendiliğinden yerleşen betonun mekanik özellikleri

Bütün özel betonları geleneksel betonun bir türevi olarak düşünmek gerekir. Bu nedenle özel bir beton türünün özellikleri belirlenirken, geleneksel beton referans kabul edilmektedir. KYB içinde aynı durum söz konusudur. Örneğin, sertleşmiş betonun özelliklerinin tespiti ve durabilite özellikleri için geleneksel beton ve KYB aynı standartlara tabidir. KYB tasarlanırken, betondan beklenen özellikler belirlenmelidir. Baskın olması istenen özellikler doğrultusunda mühendis, karışım oranları, döküm ve bakım şartları gibi özellikleri belirleyecektir. KYB konusunda yapılan sempozyumlarda sunulan bildirilerde, projelerde ve makalelerde, bu betonun sadece yüksek dayanımlı beton olarak düşünülmemesinin doğru olacağı kanaatine varılmıştır. KYB karışım oranları belirlenirken istenen özellikleri (taze veya sertleşmiş halde) doğrultusunda yüksek performans gösteren betondur (Alyamaç 2008).

KYB'den beklenen mekanik performansı vermesi için aşağıdaki şartları sağlaması gerekmektedir:

KYB'den beklenen performansa uygun olarak malzemelerin seçilmesi gerekir.

Ortam koşullarının KYB'nin üzerindeki etkisi göz önüne alınmalıdır.

KYB'nin üretin aşamasında deneylerle sürekli kontrol altında tutulması gerekir.

Bu kriterlere uyulması halinde KYB'den yüksek performans alınabilir. Uyulmayacak her bir kriter mekanik özelliklerde düşüşe sebep olacaktır.

2.3.4.a. Basınç dayanımı

Basınç dayanımı, geleneksel betonda olduğu gibi KYB'de de tanımlayıcı en önemli özelliktir. Tespiti geleneksel betonda olduğu gibidir. Dayanımı yüksek olan betonların, performanslarının da yüksek olacağı bilinmektedir. Ancak belirli bir beton özelliğini iyileştirmek için sürekli beton dayanımını çok yüksek tutmaya çalışmak ekonomik kayıplara yol açacaktır. Bu nedenle inşa edilecek yapı için yeterli dayanım sınıfı ve

istenene diğere özellikler belirlenmeli, bu beklentileri karşılayacak şekilde beton karışım oranları düzenlenmeli ve uygulanmalıdır (Alyamaç 2008).

KYB’de kullanılan toz madde tipi dayanım sınıfının değişmesine sebep olmaktadır. Toz tipi metoduyla üretilmiş KYB için geleneksel beton gibi dayanım sınıfı su/çimento ilişkisi kurulması ancak sabit bir toz malzeme kullanılması halinde mümkündür. KYB üretiminde kullanılan toz tip ve miktarı çok değişken olduğundan (taş tozu, uçucu kül, doğal ve yapay cüruflar, silis dumanı vb.) dayanım sınıfı su/çimento ilişkisinin genellenmesi pratik değildir (Kandemir 2005).

Domone (2007) tarafından yapılan çalışmada, kendiliğinden yerleşen betonun özelliklerinin incelenmesi üzerine 70’den fazla çalışmanın analizi yapılmıştır. Kendiliğinden yerleşen betonun basınç dayanımı 20 MPa iken elastisite modülünün, normal vibrasyonlu betondan daha düşük olduğunu ve 90-100 MPa ise hemen hemen aynı olduğunu ifade etmiştir.

2.3.4.b. Çekme dayanımı

KYB büyük çoğunlukla basınç dayanımı kullanılarak sınıflandırılır. Bu durumda da geleneksel betonda olduğu gibi çekme dayanımının önemi yoktur ve ihmal edilir. Zaten KYB’nin çekme dayanımı, geleneksel betonda olduğu gibi oldukça küçüktür. Betonarme elemanların çatlak genişliklerini kontrol altında tutmak, erken yaştaki termal etkilerden betonu korumak ve başka diğer sebeplerle betonun çekme dayanımının artırılması gerektiği durumlarda, bu özellik KYB’de lif kullanılarak betona kazandırılır (Alyamaç 2008).

2.3.4.c. Dayanım kazanma hızı

KYB’de, süperakışkanlaştırıcıların yüksek dozajlarda kullanımının erken dayanımı arttırdığı veya azalttığı durumlar rapor edilmiştir. Çelişen sonuçların en önemli nedeni süperakışkanlaştırıcıların kimyasal katkılarının farklı olmasıdır. Her akışkanlaştırıcıya

kimyasal modifikasyonlarla, farklı özellikler kazandırılabilceğinden, farklı performans göstermeleri doğaldır. Bu sebep dolayısıyla doğru yöntem, ön denemeler yaparak katkı performansını deneysel yolla tespit etmektir (Kaymak 2010).

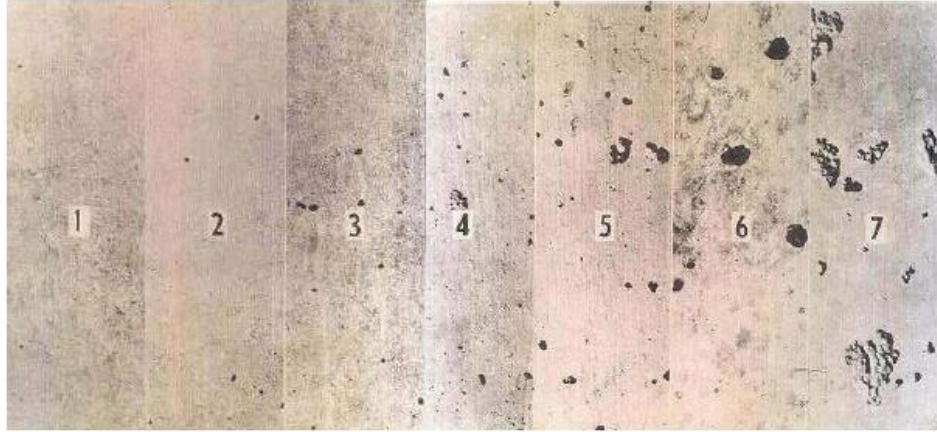
Ayrıca hiperakışkanlaştırıcılar, kendiliğinden yerleşebilirliği sağlamanın yanı sıra, su kesme işlevi de gördükleri için, ortamdaki su miktarını azaltarak erken dayanımı arttıırırlar. Toz tipi metodu ile üretilen KYB’lerde taş tozu kullanılması halinde, eken dayanım bir miktar yükselmektedir. Silis dumanı ve polikarboksilat bazlı akışkanlaştırıcı katkıların birlikte kullanımı erken dayanımı arttırmaktadır. Vizkozite arttırıcı kimyasal katkıların (VAK) kullanılması halinde, KYB’nin dayanım kazanma hızı yavaşlar (Kandemir 2005).

2.3.4.d. Boşluk yapısı

KYB’nin boşluklu yapısı beton üretiminde kullanılan kimyasal katkılara, döküm şekline, donatı miktarına ve kalıp şekline bağlı olarak değişir.

KYB’nin boşluk yapısı standart beton ile karşılaştırıldığın da, KYB’de boşluk çapının daha büyük olduğu fakat bağlantısız olduğu belirtilmektedir. Kapiler su emme deneylerinde aynı dayanım sınıfındaki KYB’de 24 saat 2,9 cm, geleneksel betonda ise 4,4 cm kapiler yükselme meydana gelmektedir. KYB’nin içyapısında su boşluklar arasında geçiş yapamadığı için standart betondaki kadar yükselememektedir.

Boşluk yapısının deneysel olarak tespiti pratik değildir. Yüzey görünümünden boşluk yapısı hakkında fikir elde edilebilir. Fransız Standardı P18-503’de yüzey boşluk yapısı, Şekil 2.17’de görülen 7 sınıfa ayrılmıştır. Bu şablon kullanılarak yüzey görünümü sınıflandırılması yapılmaktadır. İlk 4 sınıf kaliteli yüzey görünümü olarak kabul edilmektedir. Bal peteği görünümlü boşlukların bulunduğu 5, 6 ve 7. sınıflar KYB olarak kabul edilemez (Kandemir 2005).



Şekil 2.18. Fransız Standartı P18-503'e göre yüzey boşluk yapısı

Assie ve arkadaşları tarafından yapılan, kendiliğinden yerleşen beton dayanım özelliklerinin normal vibrasyonlu betonlarla karşılaştırılmasına yönelik yapılan çalışmada, yüksek su/çimento oranlarında aynı basınç dayanımına sahip oldukları ancak kendiliğinden yerleşen betonun normal vibrasyonlu betonlara göre gaz girişine karşı daha dirençli olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca kendiliğinden yerleşen beton ve vibrasyonlu betonların karbondioksit ve amonyum nitrat gibi agresif şartlara karşı benzer dayanım sergiledikleri belirtilmiştir (Kaymak 2010).

2.3.4.e. Geçirimsizlik

Raghavan, hızlı klor iyonu penetrasyon deneyi ile aynı dayanım sınıfında geleneksel betonda 4000 coulomb, KYB'de 1500 coulomb sonuçlarını elde etmiştir. Buna göre geleneksel betona kıyasla çok daha geçirimsiz bir yapıya sahiptir.

2.3.4.f. Elastisite modülü

Yapı elemanlarının sehimlerinin hesaplanmasında, levha elemanlarda kontrol parametresi olarak ve öngerilmeli elemanlarda elastisite modülünün bilinmesi gerekir. Agregas elastisite modülü, tipi ve miktarı, betonun elastisite modülü üzerinde direkt etkilidir. Artan toz miktarı nedeniyle, KYB'nin elastisite modülünde geleneksel betona

oranla değişiklikler olacaktır. Bu durum tasarım ve uygulamalarda göz önünde bulundurulmalıdır (Alyamaç 2008).

2.3.4.g. Sünme

Zamanla oluşan deformasyonun hesabı, beton için bilinmesi gereken önemli bir özelliktir. Sünme dayanımı azaltan ve yük transferini olumsuz etkileyen bir durumdur. Sünme, betonun çimento harcında meydana gelir ve poroziteden W/C oranına birçok parametre ile çok yakın ilişkilidir. Özellikle betonarme taşıyıcı elemanlarda sünme, davranış ve miktar olarak bilinmesi gereken önemli bir özelliktir. KYB, bu konuda normal betondan daha olumlu davranışlar göstermektedir (Pope and Schutter 2005).

2.3.4.h. Rötire

KYB’de rötire olayı genellikle kuruma rötresi şeklinde meydana gelir. Çimento tipi, agrega granülometrisi, çimento miktarı KYB nin rötresi üzerinde etkilidir.

2.3.4.i. Sıcaklık genleşme katsayısı

KYB’nin termal genleşme katsayısı geleneksel betonunki ile hemen hemen aynıdır. Bunun nedeni termal genleşme katsayısı beton ve çelik arasında oluşmaktadır. Betonun ve çeliğin termal katsayıları da bir birine yakın olduğu için KYB’nin ve geleneksel betonun termal genleşme katsayıları bir birine yakındır.

2.3.4.i. Yangın dayanımı

KYB ile geleneksel betonun yangın dayanımları bir birine benzemektedir. Geleneksel betonda yanıcı olmadığı için KYB’nin de yangın dayanımı oldukça iyidir.

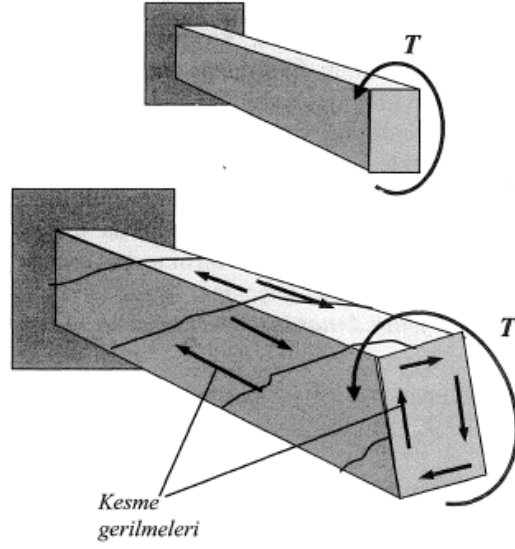
2.3.4.j. Durabilite

Günümüzde beton dayanımı kadar beton dayanıklılığın da önemli olduğu araştırmacılar tarafından kabul görülmüştür. Karbondioksit, klor, sülfat, su, oksijen, alkali ve asit özelliklerine betonun dayanıklı olması gerekmektedir. Bu özelliklerin olumlu olmasındaki en önemli faktör geçirimsizliktir. Özellikler toz malzeme kullanımı KYB geçirimsizlik özelliğini olumlu yönde etkilemektedir. Bu nedenle KYB'deki durabilite özellikleri olumlu olmakta fakat değişkenlik göstermektedir. Durabilite test metotları standartlarda ve araştırma makalelerinde detaylı bir şekilde yer almaktadır (Alyamaç 2008).

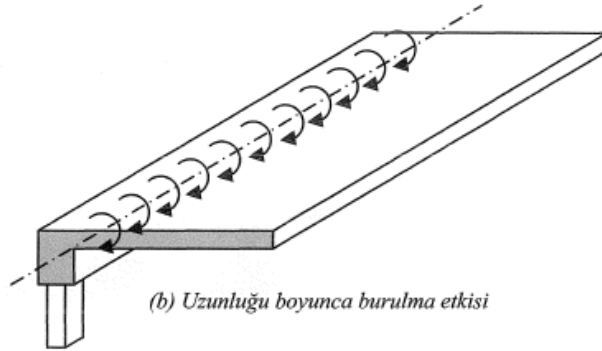
2.4. Burulma Momentinin Tanımı ve Burulma Hakkında Genel Bilgiler

Betonarme elemanlarda burulma momenti, eğilme momenti ve kesme kuvveti ile birlikte etki eder. Yalnızca burulmaya maruz kalan betonarme elemana kolay kolay rastlanılmaz.

Burulma momenti kirişe Şekil 2.19.a'da görüldüğü gibi, sadece bir kesitten (tekil olarak) etkiyebileceği gibi, Şekil 2.19.b'de görüldüğü gibi birim uzunluğu boyunca da etkiyebilir.



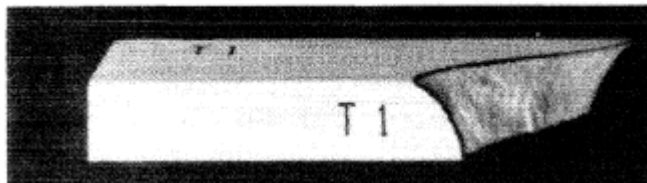
(a) Kirişe bir kesitinden etkiyen burulma momenti



(b) Uzunluğu boyunca burulma etkisi

Şekil 2.19. Burulma etkisinde kalan kirişler (Doğangün 2008)

Burulma momenti etkisinde burulma donatısı olmayan dikdörtgen kesitli elemanda görülecek kırılma Şekil 2.20’de görülmektedir.



Şekil 2.20. Burulma donatısız elemanın kırılması

Burulma momentine maruz kalan betonarme kirişlerin gevrek kırılmalarını önlemek için burulma donatısı yerleştirmek gerekir. Gevrek kırılmayı önlemek için burulma donatısı görevini etriye ve boyuna donatılar üstlenir. Yalnız burada bu iki grup donatıdan birinin bulunmaması halinde diğerinin burulma dayanımı açısından hiçbir işe yaramayacağını belirtmekte yarar vardır (Doğangün 2008).

2.4.1. Uygunluk burulması

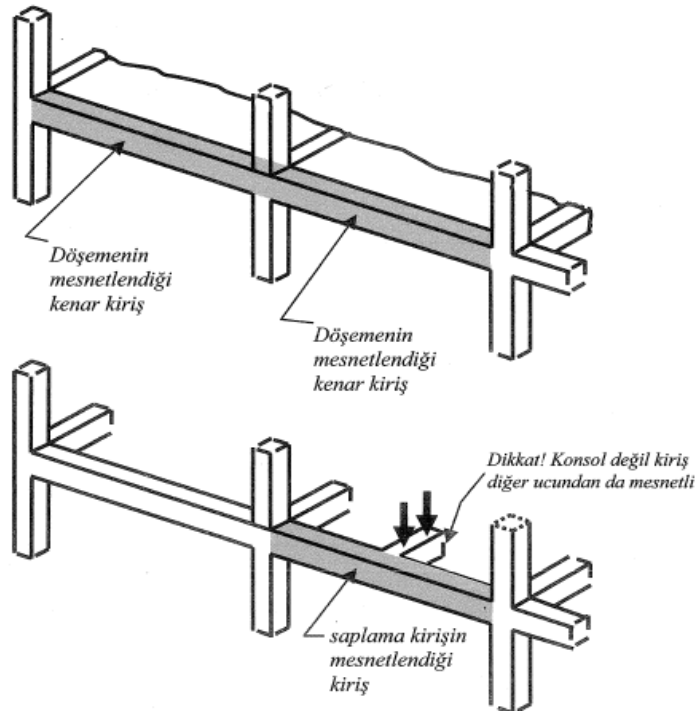
Hiperstatik sistemlerde şekil değişimlerin sürekliliği sonucu ortaya çıkar. Taşıyıcı sistemde bu tür burulma momenti göz önüne alınmaksızın denge oluşturabilir.

Uygunluk burulmasının hesabında elemanların eğilme rijitlikleri yanında burulma rijitliklerine de ihtiyaç vardır. Bu rijitliklerdeki değişik etkilerin değerlerinde farklılığa neden olur. Betonarme elemanlarda meydana gelen çatlamlar, hem eğilme hem de burulma rijitliklerinin azalmasına sebep olur. Ancak, burulma rijitliğinde bu azalma eğilmedekine göre çok daha fazladır. Kesit parametrelerine bağlı olmakla beraber, çatlama ile burulma rijitliği $1/10 \sim 1/30$ mertebesinde azalır. Bu nedenle statik bakımdan belirsiz sistemlerde çözüm yapılırken rijitliklerdeki ve özellikle burulma rijitliğindeki azalmanın göz önüne alınması önemli olur. Betonarme elemanların davranışı nedeniyle, sünek davranış sağlandıktan sonra statik bakımdan uygun moment değişimlerinin belirlenmesinde belirli bir serbestlik vardır. Kullanma yükleri altında çatlak genişlikleri ve yer değiştirmeler kontrol edilmek kaydıyla, statik çözümlemelerde çatlamış kesitlerin rijitlikleri kullanılabilir.

Örneğin, ana bir kiriş tek taraflı olarak diğer kirişe mesnetlik yapıyorsa, ana kirişte burulma momenti ortaya çıkar. Kullanma yükleri altında bu kesitin dönmesinin yerleştirilen burulma donatısına bağlı olmadığı söylenebilir. Ancak burulma donatısının fazlalığı oranında bu kesit dönmesi daha büyük burulma momenti oluşturur. Bu gibi durumlarda bir minimum burulma donatısı öngörerek, çatlağı sınırlandırılması ve büyük burulma momentleri ortaya çıkması önlenabilir. Taşıyıcı sistem çözümlemesinde de burulma rijitliğinin sıfır alınması kolaylık sağlar. Ancak, bu durumda çözümlemede

elde edilmese de, burulma momenti oluşması beklenen elemanlarda, kullanma yükleri altında büyük çatlakların oluşmasını önlemek için uygun yerleştirilmiş burulma donatısının bulunması önerilir.

Taşıma gücü sınır durumunda taşıyıcı sistemdeki dengenin sağlanması için hesaba katılması zorunlu olmayan burulma uygunluk burulması olarak adlandırılır. Uygunluk burulmasının hesaplarda dikkate alınmaması durumunda, taşıyıcı sistem taşıyıcılığını yitirmeyip, çatlaklar oluşmakta ve etkilerin yeniden dağılımından sonra denge oluşmaktadır. TS500-2000'e göre uygunluk burulmasında burulma momentinin hesabına gerek olmayıp, bu moment daha sonra açıklanacak olan çatlama momentine eşit alınmaktadır. Yapı sistemlerinde uygunluk burulmasıyla daha fazla karşılaşılmakta olup, bu burulmanın ortaya çıktığı birkaç durum Şekil 2.21'de görülmektedir. TS500-2000 gereği uygunluk burulması durumunda etriye ve boyuna donatı hesabı yapılmayabilir. Bu durumda daha sonra açıklanacak olan minimum donatının bulundurulması yeterlidir. Ancak bu donatı basit kesme için gerekli donatıdan az olmamalıdır.



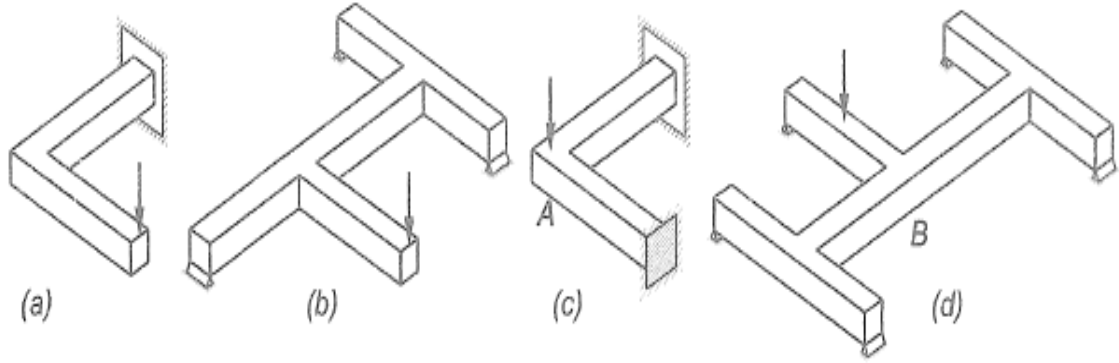
Şekil 2.21. Uygunluk burulmasına ilişkin bazı örnekler (Doğangün 2008)

2.4.2. Denge burulması

Taşıma gücü ve kullanılabilirlik sınır durumlarında taşıyıcı sistemdeki dengenin sağlanması için hesaba katılması zorunlu olan burulma, denge burulması olarak tanımlanmaktadır. İzostatik ya da hiperstatik sistemlerdeki elemanlarda oluşabilir. Eleman bu çeşit burulma etkisindeyse, bu husus elemanla ilgili taşıma gücü sınır durumunda mutlaka dikkate alınmalıdır. İhmal edilmesi taşıyıcı sistemin dengesini yitirmesine neden olabilir. Yapı sistemlerinde dengeli burulmanın ortaya çıktığı birkaç durum Şekil 2.24’de görülmektedir.

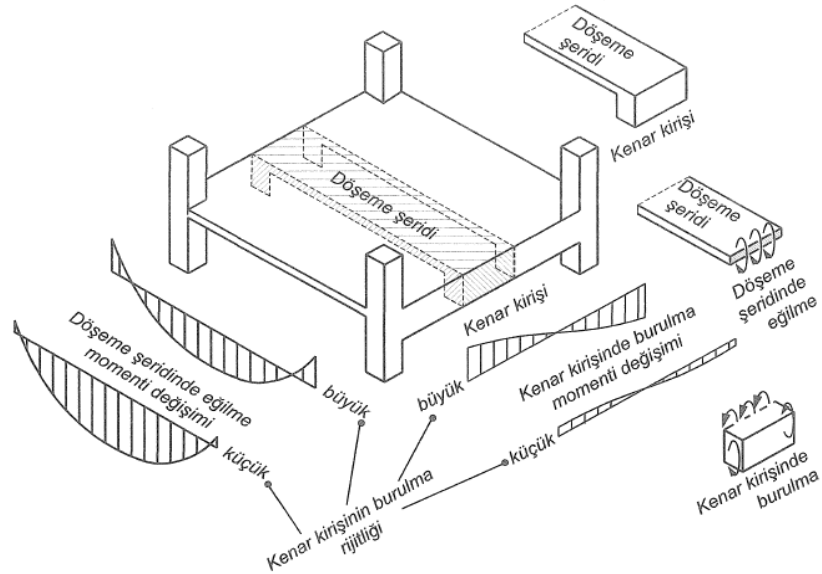
Şekil 2.22.a ve b’de verilen elemanlarda karşılanacak burulma momenti elemanların rijitliklerinden bağımsız olarak denge denklemlerinden bulunabilir. Oluşan bu tür burulma momenti taşınamaması durumunda taşıyıcı sistemde denge oluşmaz. Buna karşılık Şekil 2.22.c ve d’de gösterilen elemanlarda burulma rijitliği ihmal edildiğinde burulma momentinin oluşmadan dengenin sağlandığı görülebilir. Uygunluk burulmasının ortaya çıkmasında elemanların burulma ve eğilme rijitliklerinin oranı etkili olur. Örneğin, Şekil 2.22.c ve d’deki taşıyıcı sistem hesaplarında A ve B noktalarında sadece kesme kuvvetinin iletimini sağlayacak bir bağın bulunduğu kabul edilmesi burulma momentinin meydana gelmesini engeller. Uygunluk burulma momentinin karşılanmaması durumunda taşıyıcı sistemde, kesit tesirlerinin seviyesine bağlı olarak, şekil değiştirmeler ve çatlaklar oluşur, ancak taşıyıcı sistem burulma momentinin karşılanmamasıyla taşıyıcılığını yitirmez. Şekil 2.23’de döşeme şeridi ile kenar kiriş birleşiminde kenar kirişte ortaya çıkan burulma momenti gösterilmiştir. Burulma momenti döşemedeki eğilme dönmesi ile kenar kirişindeki burulma dönmesinin uygunluğundan (eşitliğinden) ortaya çıkar. Döşeme şeridindeki eğilme momenti kenar kirişteki burulma momenti ile dengelenir. Kenar kirişin burulma rijitliğinin çatlama ile azalması ile burulma şekil değiştirmelerini artırır ve burulma momenti küçülürken, döşemede de mesnette eğilme momenti azalır, buna karşılık döşeme açıklık momenti artar. Güç tükenmesine yaklaşıldığında meydana gelen çatlamlar sonucunda kiriş burulma rijitliği önemli derecede azaldığı için oluşan burulma momenti de ihmal edilecek seviyede küçülür. Bu tür burulma momentinin

ihmal edilmesi taşıyıcı sistemde bazı çatlamalara ve etkilerin yeniden dağılarak yeni bir denge düzeninin oluşmasına sebep olur.

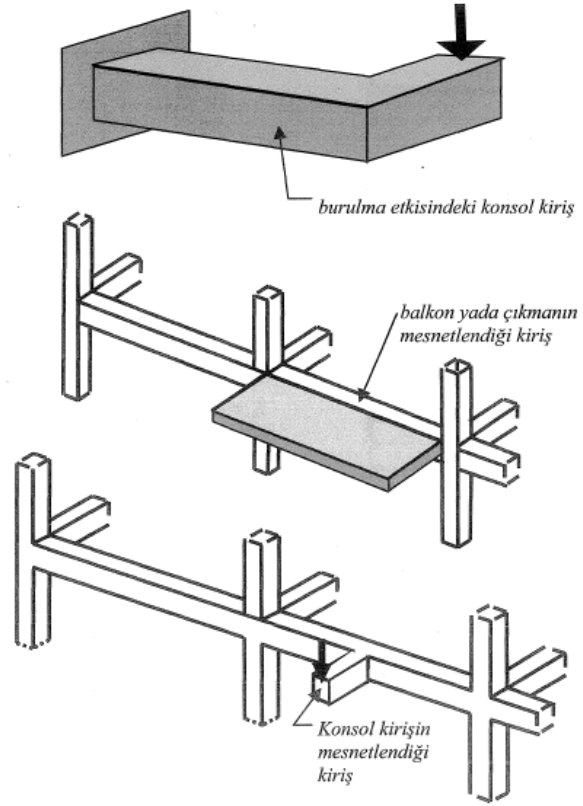


Şekil 2.22. Denge (a,b) ve uygunluk (c,d) burulmaları

Tasarım burulma momenti, denge burulmasının meydana geldiği durumlarda elastik yapısal çözümlemeden belirlenebilir. Dengeli burulma bazı mesnet ve yükleme durumları için elemanlarda oluşacak burulma momentleri değişimleri Şekil 2.25’de görülmektedir.



Şekil 2.23. Kenar kiriş burulma rijitliğine bağlı olarak döşeme şeridinde eğilme momenti ve kenar kirişinde burulma momenti değişimi



Şekil 2.24. Denge burulmasına ilişkin bazı örnekler (Dikkat! Konsol durumu söz konusu) (Doğangün 2008)

	Mesnette $T_d = T$
	Mesnette m_γ üniform burulma $T_d = m_\gamma \cdot l$
	$T_d = T/2$
	$a > b$ $T_d = T_a/l$
	$T_1 = \frac{T_A(b-c) + T_B \cdot c}{l}$ $T_2 = \frac{T_B \cdot c - T_A \cdot a}{l}$ $T_3 = \frac{T_A \cdot a - T_B \cdot (a+b)}{l}$ T_d : büyük olanı alınabilir
	$T_d = m_\gamma \cdot l/2$

Şekil 2.25. Bazı denge burulması durumlarında burulma momentinin değeri (Ersoy 1975)

2.4.3. Burulma momenti hesaplarında dikkate alınan yaklaşımlar

2.4.3.a. Elastik burulma

Elastik burulma yaklaşımında kesitte burulma oluşması için elemanda sadece en kesit düzlemlerinde bulunan kuvvet çiftlerinin etki etmesi gerekir. Uygulamada karşılaşılan durumlarda ise burulma momenti, kesme kuvveti, eğime momenti ve normal kuvvet ile birlikte etki eder. Burulmanın tek başına etki ettiği durumlar oldukça azdır.

Aslında statikçe belirsiz bir problem olan gerilme yayılımı problemi, çubuğun yük altındaki şekil değiştirme biçimi hesaba katılmadan çözülemez. Ancak kesin çözüm yolları elastisite teorisinde belirtilen, eksenel kuvvet halinde olduğu gibi, çubuğun şekil değiştirme biçimi hakkında deneysel ve gözlemsel verilere dayanarak yapılan varsayımlar kullanarak yaklaşık olarak çözülebilir. Bu yolla kesin veya yaklaşık çözüm, ancak daire, daire halkası ve ince kenarlı kapalı tüp en kesitli prizmatik çubuklar için belirlenebilir. Bunların dışında olan çubuklarda analitik yolla, yaklaşık olarak dahi, bir çözüm bulma olanağı mevcut değildir (Kayan 1992).

2.4.3.b. Plastik burulma

Plastik teorisi ile burulma hesabında, bütün kesitlerin plastik olduğu ve kayma gerilmelerinin kesitin her noktasında aynı olduğu kabul edilir. Hesapları kolaylaştırmak amacıyla genellikle “kum tümseği analojisi” kullanılır. Bu analoji Prandtl’in membran analojisine çok benzer. Yatay vaziyette tutulan kesit üzerin dökülen kohezyonsuz kumun aldığı şeklin, plastik teorideki gerilme fonksiyonuna benzetilmesine dayanan bu analogide, kum tümseğinin eğimi, kayma gerilmelerine eşit kabul edilirse, tümseğin hacmi, kesitin taşıyabileceği burulma momentinin yarısına eşittir.

2.4.3.c. Coulomb burulması

Daire ve daire halkası en kesitli prizmatik çubukların burulma problemi ilk defa Fransız araştırmacı Coulomb tarafından çözülmüştür. Bu nedenle bu tür burulmaya çoğu kere Coulomb burulması adı verilmektedir. Coulomb, burulma momenti ile yüklü daire ve daire halkalı çubukların şekil değiştirmesi üzerinde yaptığı gözlemlere dayanarak bu tür çubukların şekil değiştirmesi üzerinde aşağıda belirtilen varsayımları yapmıştır.

Burulmadan evvel düzlem olan çubuk en kesitleri burulmadan sonra da düzlem kalırlar. En kesitlerin yaptıkları şekil değiştirmesi hareketi çubuk eksenini etrafındaki bir katı cismin dönme hareketidir.

En kesitlerin burulma esnasında çubuk eksenini etrafında yaptıkları dönme açıları, çubuğun sabit burulma momenti ile yüklü olması halinde, bu en kesitlerin çubuk eksenini üzerindeki herhangi bir noktadan olan uzaklıkları ile orantılıdır (Öztekin 2007).

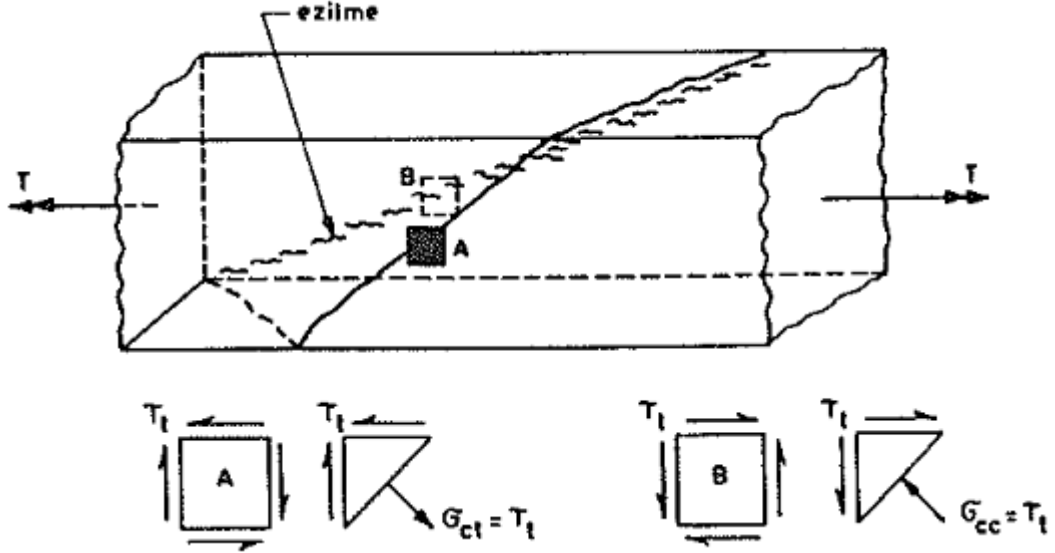
2.4.3.d. Elastisitede dairesel kesitler olmayan çubukların burulması

Burulma momentine bu yaklaşımda, çubuklarda kesitler burulmaya maruz kaldıktan sonra burulmadan önceki gibi düz kalamazlar. Burulmaya maruz kalan bu çubuklar çaprazlaşırlar. Dolayısıyla kesitler burulma şekil değiştirmesinde dönme hareketi yapamazlar (Öztekin 2007).

2.4.3.e. Basit burulma

Basit burulmaya pratikte pek rastlanmaz, burulma genellikle eğilme ve kesme ile birlikte etkir. Bu nedenle, basit burulmanın ayrıntılı olarak irdelenmesi gereksiz görülebilir. Ancak, basit burulma tıpkı kolonlardaki eksenel yük durumu gibi bir sınır durum oluşturduğundan, basit burulma altındaki davranışın ve dayanımının bilinmesi zorunludur. Dikdörtgen kesitli, donatısız bir beton kiriş, basit burulma altında deneye tabi tutulduğunda, ilk çatılmanın oluşması ile son derece ani ve gevrek bir biçimde

kırılır. ODTÜ’de denenen bu tür bir kirişin kırılma biçimi Şekil 2.26’da gösterilmiştir. Çizilen skeçten görüleceği gibi çatlaklar kirişin üç yüzünde ezilme gözlenmektedir.



Şekil 2.26. ODTÜ’de denenen bir kirişin kırılma biçimi (Ersoy 1975)

Burulmaya maruz bir kirişte, eğik çekme çatlaklarının oluşması önemli bir olaydır. Çünkü çatlama davranış ve burulma rijitliğini büyük çapta etkilemektedir. Çatlama kadar önemli bir diğer sorun, boyuna ve enine donatısı olan bir kesitin taşıma gücüdür. Yapılan deneyler, kayma donatısız, dikdörtgen kesitli bir kirişin taşıma gücünün, kayma donatılı bir kirişin çatlama momentine eşit olduğunu göstermiştir (Ersoy 1975).

Kesit çatlama mukavemetinin saptanması için bugüne dek önerilen bütün denklemleri aşağıdaki şekilde genelleştirmek mümkündür (Ersoy 1975).

$$M_{iç} = \tau s \quad (2.37)$$

s: şekil katsayısı. Çeşitli teorilerde değişik biçimlerde ifade edilmektedir.

τ : kayma gerilmesi

$M_{iç}$: çatlama momenti

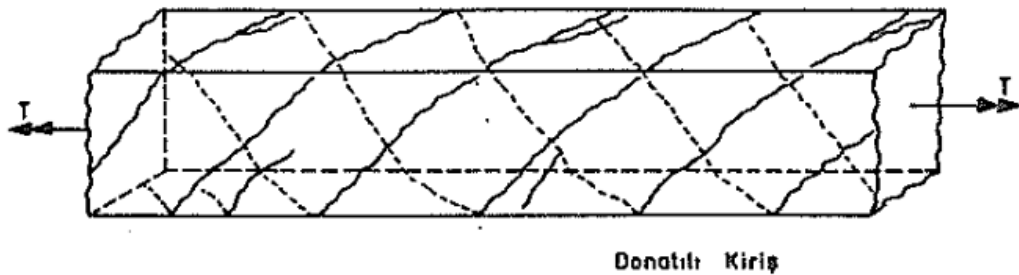
Ancak, hemen işaret etmek gerekir ki, burulmaya maruz bir kirişte asal çekme gerilmelerine eşit asal basınç gerilmeleri vardır. Bilindiği gibi, bir yönde çekme diğer yönde basınca maruz beton elemanların çekme dayanımı, basit çekme mukavemetinden azdır. ODTÜ’de yapılan deneyler sonucu, çekme dayanımının yaklaşık olarak $\sigma_{bç}=1,23\sqrt{\sigma_b}$ olduğu saptanmıştır.

$$M_{tç} = \tau.s \quad (2.38)$$

$$\sigma_{bç}=1,23\sqrt{\sigma_b} \quad (2.39)$$

Denklemdaki şekil katsayısı için çeşitli kabuller yapılabilir. Yapılan incelemeler sonucu, plastik teorinin, özellikler tablalı kesitler için, çok daha uygun olduğu kanısına varılmıştır.

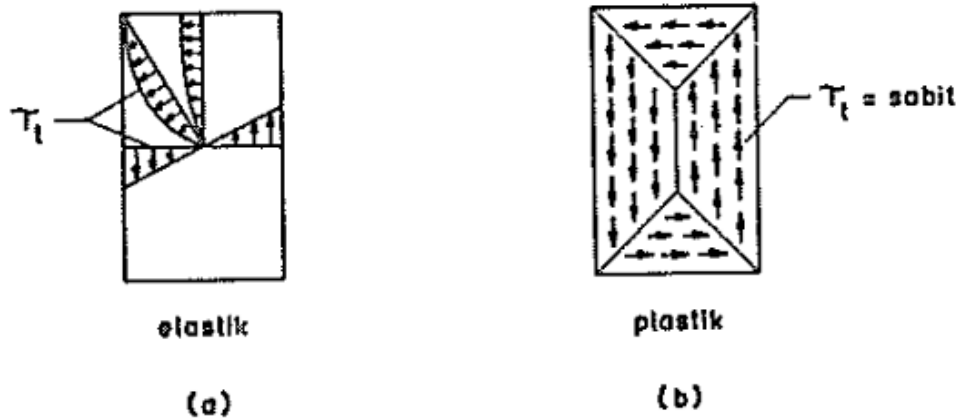
Yapılan deneyler, kirişe yerleştirilen boyuna donatının yukarıda sözü edilen davranışı değiştirmedini göstermiştir. Ancak, etriye ve boyuna donatı birlikte kullanıldığında, davranış değişmekte ve kiriş ilk çatlakların oluşması ile kırılmaktadır. Bu durumda Şekil 2.27’de gösterildiği gibi kırılma konumuna ulaşılmadan asal çekme gerilmelerine dik yönde çok sayıda çatlak oluşmaktadır. Etriye ve boyuna donatının varlığı burulmadaki taşıma gücünü de büyük ölçüde artırmaktadır.



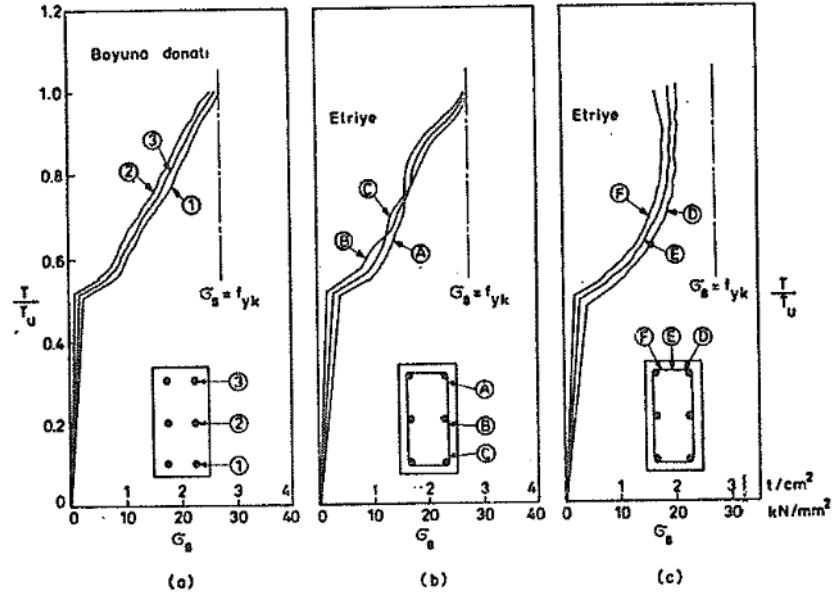
Şekil 2.27. Kırılma konumuna ulaşan kirişte asal çekme gerilmelerine dik yönde oluşan çatlaklar (Ersay 1975).

Boyuna donatı kullanılmadan, salt etriye ile donatılmış kirişler de tıpkı donatısız kirişler gibi davranmaktadır. Bu bulgu, etriyenin tek başına etkili olmadığını, burulma için mutlaka boyuna donatıya gereksinme olduğu göstermektedir. Boyuna donatıya duyulan gereksinme, betonarmeyi doğrusal elastik bir malzeme varsayanlara ters düşebilir. Bu gereksinmenin nedeni, betonarmede çatlama sonrası oluşan, kendine özgü deformasyonlardır.

Yirmi yıl öncesine kadar burulma etkisindeki betonarme elemanlarda oluşan kayma gerilmeleri elastisite teorisine göre hesaplanıyordu. Dikdörtgen bir kesti için elastisite teorisinden elde edilen burulma dağılımı Şekil 2.28.a'da gösterilmiştir. PCA da Dr. Hsu tarafından gerçekleştirilen deneylerde yapılan ölçümler, bu gerilme dağılımının gerçekte bağdaşmadığını göstermektedir. Şekil 2.29'da etriye ve boyuna donatı üzerinde ölçülen birim deformasyonlar temel alınarak hesaplanan gerilmeler gösterilmiştir. Şekilden görüleceği gibi, gerilmeler elastisite teorisinden elde edilen dağılıma uymamakta, uzun ve kısa kenarlar boyunca sabit kalmaktadır. Kesitteki kayma gerilmelerinin sabit kalması, burulma etkisindeki betonarme elemanlar için elastisite teorisi yerine plastisite teorisinin daha iyi sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Plastisite teorisine göre burulma altında oluşan gerilme dağılımı Şekil 2.28.b'de gösterilmiştir.



Şekil 2.28. (a) Dikdörtgen bir kesti için elastisite teorisinden elde edilen burulma dağılımı (b) plastisite teorisine göre burulma altında oluşan gerilme dağılımı (Ersoy 1975).

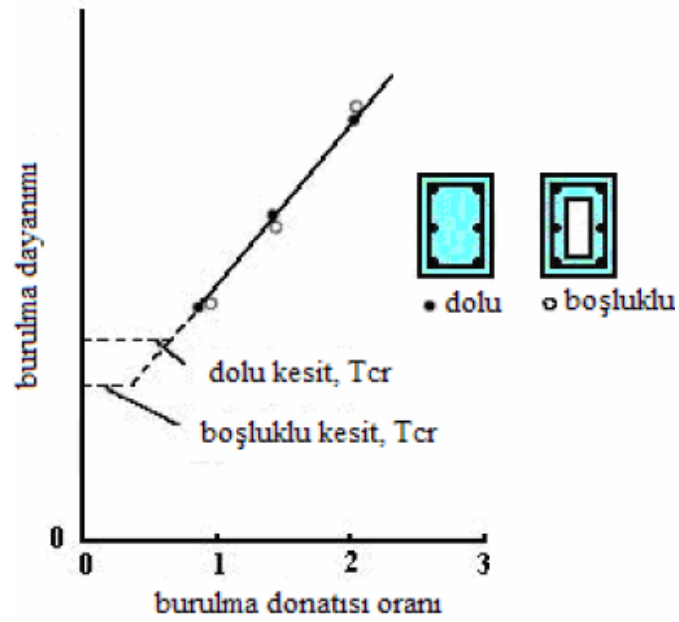


Şekil 2.29. Etriye ve boyuna donatı üzerinde ölçülen birim deformasyonlar temel alınarak hesaplanan gerilmeler (Ersoy 1975).

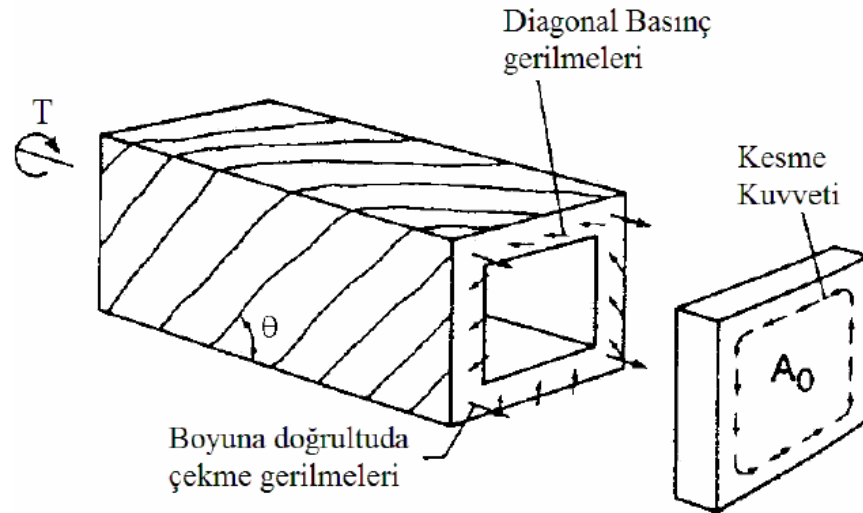
2.4.4. Burulma teorileri

2.4.4.a. Uzak kafes analojisi

Burulma momenti ile ilgili ilk teori 1929 yılında Rausch tarafından ortaya konulmuştur. Bu ilk teoride kesit içi boşluklu olarak tercih edilmiştir. Bu tercihin sebebi, kesitin orta bölgesindeki gerilmeler çeperlerdeki gerilmelere göre daha az değerler almaktadır. Bu yaklaşımdan yola çıkarak içi boş ve dolu kesitlerin maksimum burulma kapasitelerinin aynı olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 2.30'da içi boş ve dolu kesitin burulma momenti-burulma momenti donatısı grafiği görülmektedir. Grafiğe baktığımız zaman her iki kesitin kritik burulma momenti değerlerinin farklı olmasına rağmen burulma momenti taşıma kapasitelerinin aynı olduğu görülmektedir. Şekil 2.31'de ise uzak kafes analojisinin temellerini oluşturan boşluklu kesit modeli gösterilmiştir.



Şekil 2.30. Dolu ve boşluklu kesitlerde taşınan burulma momenti-donatı oranı grafiği (Öztürk 2007)



Şekil 2.31. Boşluklu kesit anolojisi modeli (MacGregor and Ghoneim 1995)

Zürich Teknik Üniversitesinde burulma konusunda teorik ve deneysel araştırmalar yapan Thürliman ve Lampert, kiriş davranışını inceleyerek bir model geliştirmişlerdir. Uzak Kafes Analojisi” olarak tanımlanan bu modelde iç kuvvetlerin denge denklemlerinden basit burulmadaki taşıma gücü hesaplanması mümkündür. Uzak kafes kiriş modelinin,

çatlaklar arsında kalan ve eğik asal basınç gerilmeleri yönünde uzanan beton diyagonaller, alt ve üst başlık gibi çalışan boyuna çubuklar ve başlık elemanlarını birbirine bağlayan etriyelerden oluştuğu kabul edilmektedir.

Avrupalı bazı araştırmacılar burulmaya maruz betonarme kirişlerde, beton katkısının ihmal edilecek kadar küçük olduğunu ileri sürerek, taşıma gücünün yalnız donatıyı dikkate alan (2.28) deki denklemden hesaplanacağını ileri sürmüşlerdir. Uzay kafes modelinde çatlak eğiminin 45° olduğu, çatlak arasında sürtünme bulunmadığı ve etriyenin uzun ve kısa kollarında gerilmenin aynı olduğu kabul edilirse, taşıma gücü için elde edilen denklemde beton katkısının bulunmadığı görülür. Bu durum Avrupa görüşünü kuvvetlendirmektedir. ABD’de ise, beton katkısının ihmal edilmemesi gerektiği inancı yaygın olup, beton katkısı olarak, atlama momentinin yarısının alınması önerilmektedir. Aslında betonun bir katkısı olduğu gerçektir. Araştırmacılar tarafından yapılan deneyler incelendiğinde, beton mukavemetinin kiriş taşıma gücünü %15 kadar etkileyebileceği görülür. Buna rağmen söylemek gerekir ki, bugün için ABD de beton katkısı için yapılan ampirik öneri, bir çok durumda emniyetli olmayan sonuçlar verebilir.

ACI 318-99’da, uzay kafes analogisi için; A_{oh} ; en kesitin enine donatı ile sarılı alanını, A_o ; kayma gerilmesinin meydana geldiği alanı, θ ; diyagonal eğimini göstermek üzere burulma momenti;

$$A_o = 0.85A_{oh} \quad (2.40)$$

$$T = \frac{2A_oA_kf_{yd}}{s} \cot\theta \quad (2.41)$$

denklemleri ile hesaplanabilir.

2.4.4.b. Elastik ve plastik teori

1. Elastik teori

Burulma momentine maruz kalan betonarme elemanlarda meydana gelen kayma gerilmeleri ilk başlarda elastisite teorisine göre hesaplanıyordu. Elastik teoriye göre kesitte meydana gelen kayma gerilmeleri Şekil 2.32’de verilmiştir. Şekil 2.32’den de anlaşılacağı gibi maksimum kayma gerilmeleri uzun kenarın ortasında meydana gelmektedir. $\tau_{\max}$ ve T sırasıyla maksimum kayma gerilmesi ile burulma momentini göstermek üzere; dikdörtgen en kesitlerdeki en büyük kayma gerilmesi ile rölatif burulma açısı, dikdörtgenin kenar uzunlukları oranlarına bağlı katsayılar cinsinden (2.42) ve (2.43) nolu bağıntılarda verilmiştir.

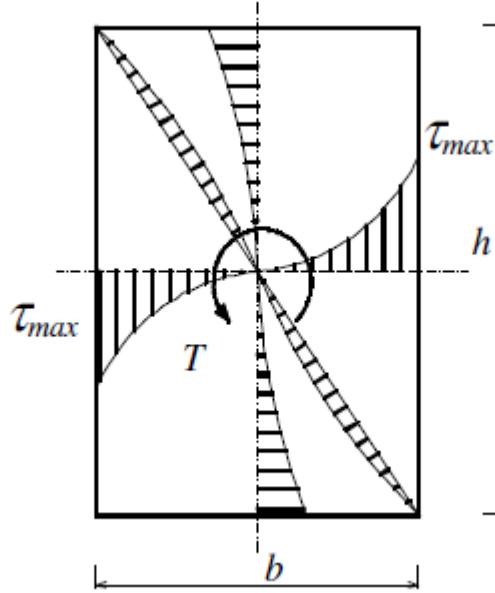
$$\tau_{\max} = \frac{T}{\alpha h b^2} \quad (2.42)$$

$$\theta = \frac{T}{\beta G_c h b^3} \quad (2.43)$$

Bu bağıntılarda α ve β katsayıları, h/b oranına bağlı olarak Çizelge 2.3’de verilen değerleri almaktadırlar.

Çizelge 2.3. h/b oranına bağlı olarak α ve β katsayıları

h/b	1,00	1,50	1,75	2,00	2,50	3,00	4,00	6,00	8,00	10,00	∞
α	0,208	0,231	0,239	0,246	0,258	0,267	0,282	0,299	0,307	0,313	0,33
β	0,141	0,196	0,214	0,229	0,249	0,263	0,281	0,299	0,307	0,313	0,33



Şekil 2.32. Elastik teoriye göre basit burulma etkisindeki dikdörtgen enkesitlerde kayma gerilmesi dağılımı (Öztürk 2007)

2. Plastik teori

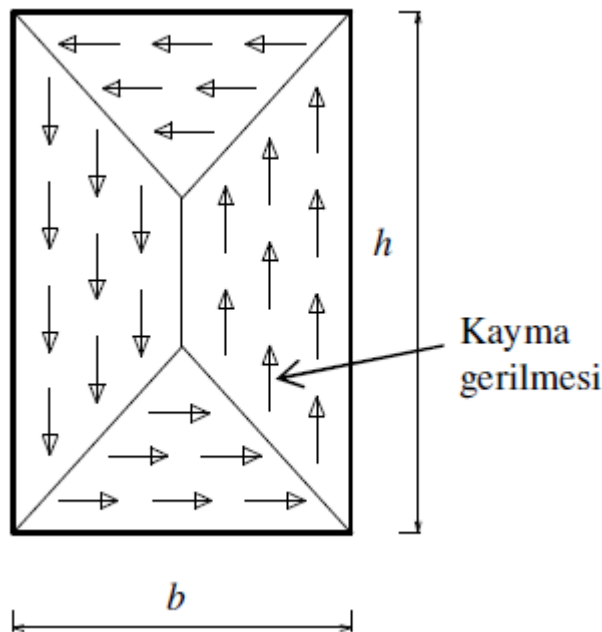
Elastik teoriye göre hesaplanan burulma momenti değerlerinin gerçek değerlerden daha düşük değerler verdiği rapor edilmiştir. Bu aradaki ilave burulma dayanımı betonun plastik davranışından kaynaklanabilir. Elastik teoride olduğu gibi plastik teoride de, göçmenin maksimum çekme gerilmelerinin betonun çekme dayanımına (f_{ctk}) ulaştığı anda oluştuğu kabul edilir. 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. Bu denklem;

$$T_p = \alpha_p x^2 y f_{ctk} \quad (2.44)$$

$$\alpha_p = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{6} \frac{x}{y} \right) \quad (2.45)$$

Plastik teori elastik teorinin bir adım ötesi olmasına rağmen betonarme bir kirişte burulma momenti sonucu gerçekleşen göçme tam anlamıyla plastik değildir (Öztürk 2007).

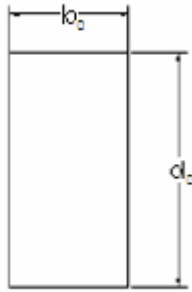
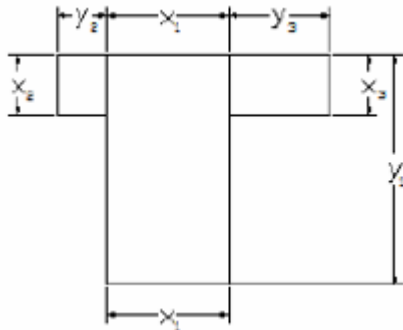
Plastisite teorisine göre burulma altında oluşan gerilme dağılımı Şekil 2.33’de verilmiştir.



Şekil 2.33. Plastik teoriye göre basit burulma etkisindeki dikdörtgen en kesitlerde kayma gerilmesi dağılımı (Öztürk 2007)

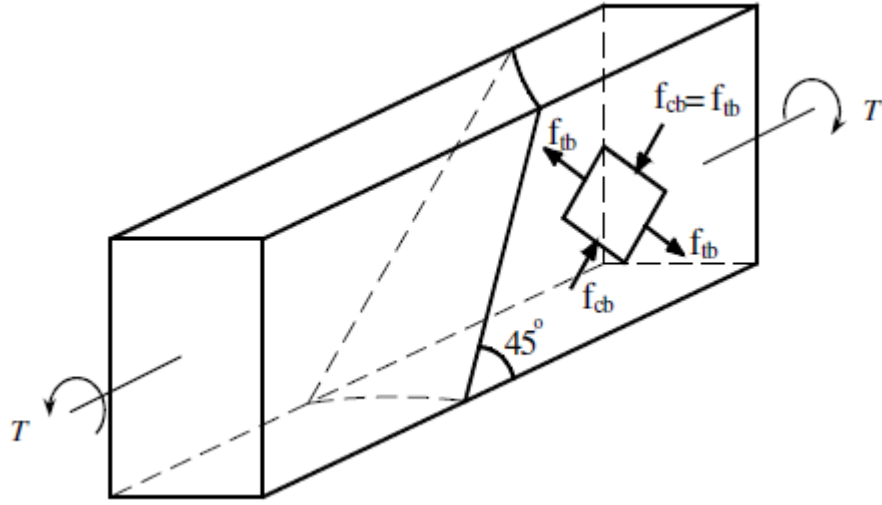
Tablalı kesitlerde ise durum biraz karmaşık hal almaktadır. Rausch ve Bach tablalı kesitlerdeki burulma momenti ile ilgili yaklaşık denklemler önermişlerdir. Bach tablalı kesitleri dikdörtgenlere bölmüştür. Bu uygulamaya benzer yaklaşım daha sonra Mattock tarafından da kullanılmıştır. Çizelge 2.4’de dikdörtgen ve tablalı kirişler için plastik ve elastik yöntemlere göre elde edilen denklemler verilmiştir. Ayrıca, her iki yöntem için önerilen yaklaşık denklemler de Çizelge 2.4 içerisinde verilmiştir. Çizelge 2.4’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.

Çizelge 2.4. Dikdörtgen ve tablalı kirişler için elastik ve plastik teori denklemleri

			Tablalı Kesitler için Yaklaşık Denklemler
Elastik Teori	$\tau_{\max} = \frac{T}{\alpha b_0^2 d_0}$ $\phi = \frac{T}{G_c \alpha b_0^3 d_0}$		$\tau = \frac{T b_0}{\sum \alpha x_i^2 y_i}$
Plastik Teori	$\tau = \frac{2T}{b_0^2 (d_0 - \frac{b_0}{3})}$	$\tau = \frac{2T}{b_0^2 \left(d_0 - \frac{b_0}{3} \right) + d^2 (b - b_0)}$	$\tau = \frac{2T}{\sum x_i^2 (y_i - \frac{x_i}{3})}$

2.4.4.c. Yanal eğilme teorisi

Betonun davranışı ne tam elastik ne de tam plastik olmadığından, elastik teori burulma kapasitesinin altında plastik teori ise burulma kapasitesinin üzerinde sonuçlar vermektedir. Bu nedenle burulma etkisindeki beton veya betonarme elemanlarda kırılma mekanizmasının yeniden gözden geçirilmesi gerekmektedir. Bazı araştırmacılar basit burulma etkisindeki beton kirişlerin kırılmasına eğilme momentinin neden olduğunu ileri sürmüşlerdir. Bu teoriye göre beton elemandaki ilk çatlama kirisin büyük yan yüzlerinden birinde kiriş eksenine 45 derecelik bir açı ile başlar. Sonra çatlak alt ve üst yüzlere diyagonal olarak uzanır. Sonra dördüncü yüzde mevcut çatlak uçlarını birleştiren doğru üzerinde betonun aniden kırılmasıyla Şekil 2.34’de gösterildiği gibi beton eleman kırılır (Zhang 2002).



Şekil 2.34. Yanal eğilme teorisine göre beton bir elemanın kırılma yüzeyi (Öztürk 2007)

Csikos and Hegedus (1998a) bu yöntemle elde edilen burulma dayanımı formülü;

$$T_{sb} = \frac{x^2 y}{3} f_{cts} \quad (2.46)$$

T_{sb} : yanal eğilme teorisine göre hesaplanan burulma momenti

f_{cts} : betonun yarmada çekme dayanımı

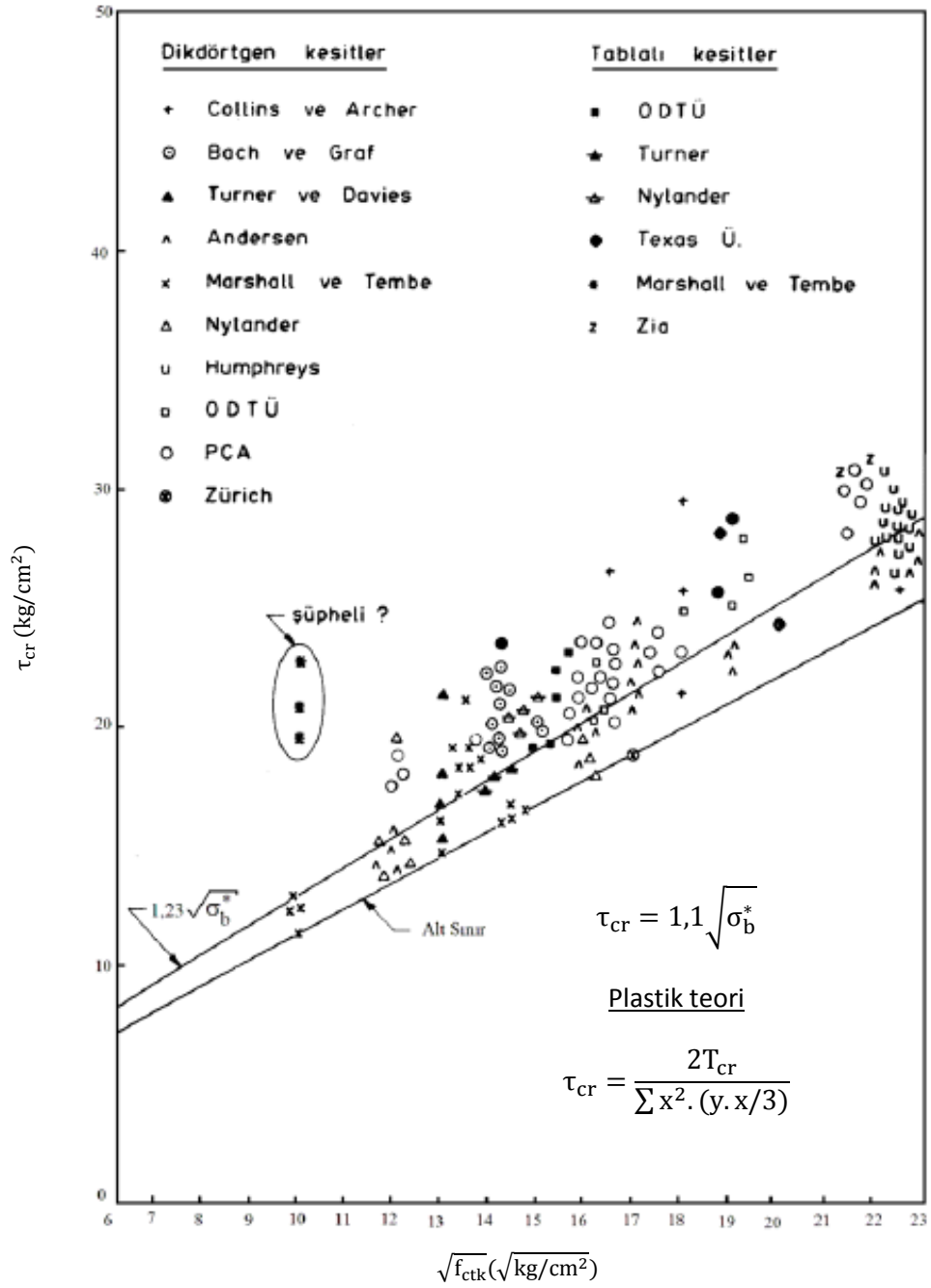
x, y : Kirişe ait boyutları temsil eder.

Şekil 2.35, 2.36 ve 2.37’de 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.

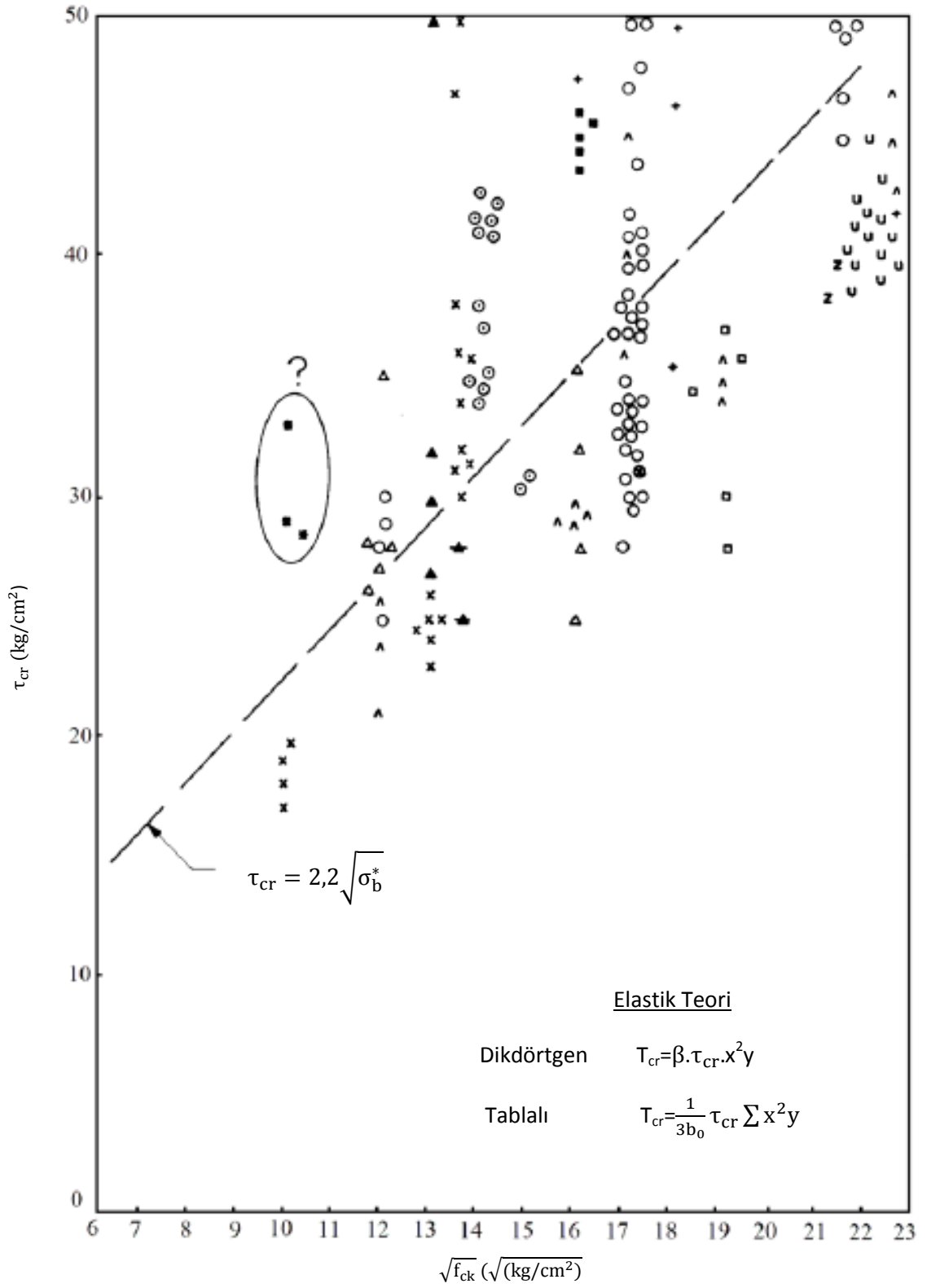
- En fazla dağılım elastisite teorisine göre hesaplanan kayma gerilmelerinde görülmektedir. En az dağılım ise plastik teoriye göre hesaplanan gerilmelerde olmaktadır.

- $\tau_{cr} = 1,23\sqrt{f_{ck}}$ değerine en yakın değerlerin plastik teoriden elde edildiği görülmektedir.

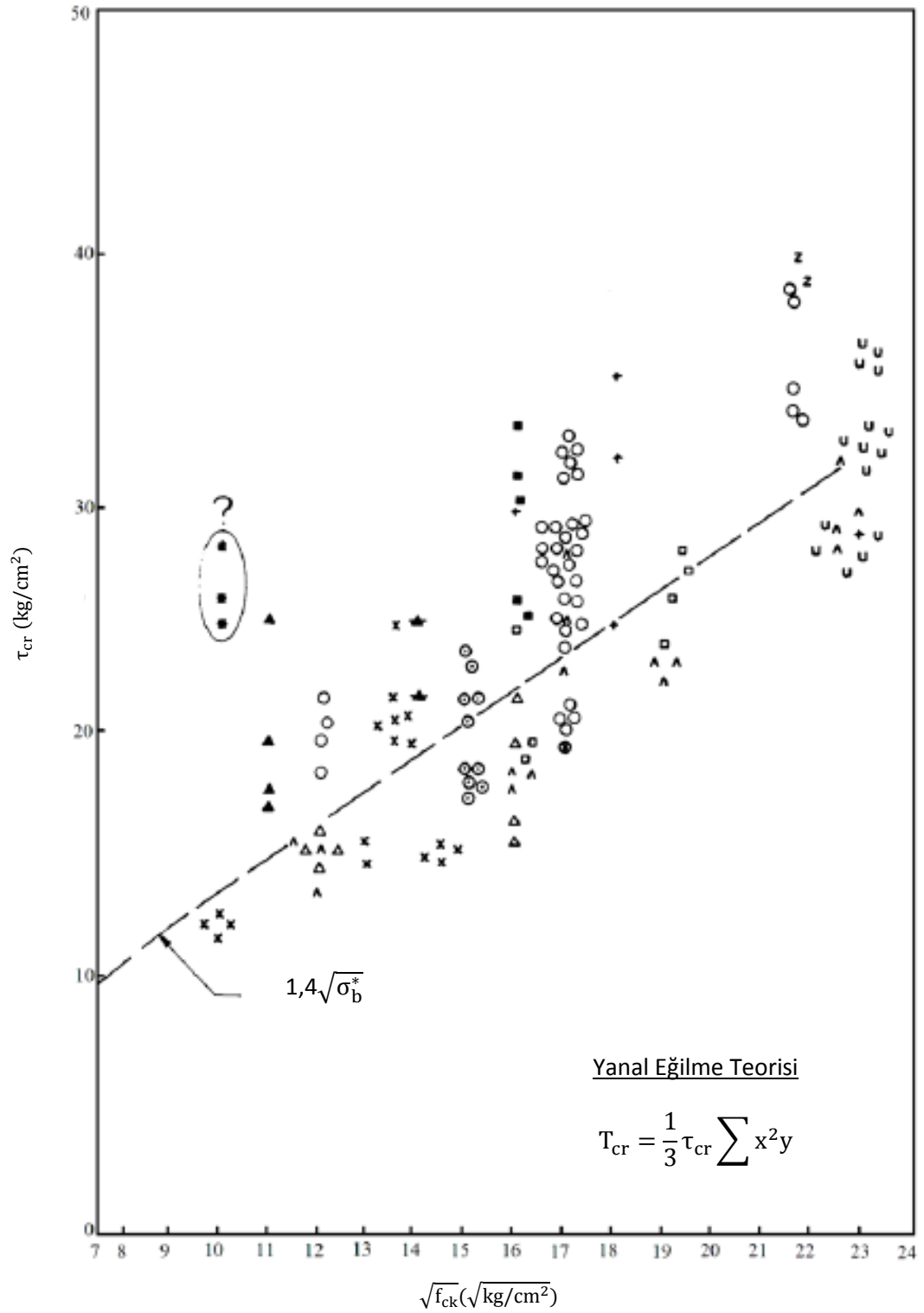
Özetlersek, en az dağılımın görüldüğü plastik teoriye göre hesaplanan kayma gerilmesi değerleri, deneylerden elde edilen sonuçlara yakın sonuçlar vermektedir. Dağılım arttıkça deneylerle analitik hesap sonucu elde edilen verilerde farklılıklar olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 2.35. Çeşitli deneylerden elde edilen çatlama momenti değerlerinden plastik teori kullanılarak elde edilen kayma gerilmeleri grafiği (Ersoy 1975)



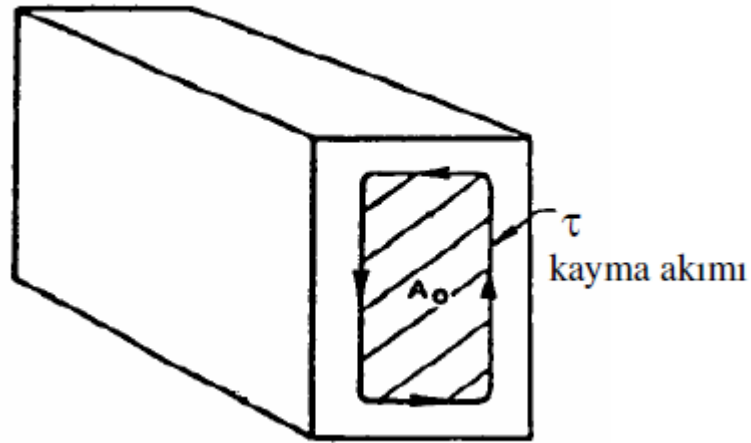
Şekil 2.36. Çeşitli deneylerden elde edilen çatlama momenti değerlerinden elastik teori kullanılarak elde edilen kayma gerilmeleri grafiği (Ersoy 1975)



Şekil 2.37. Çeşitli deneylerden elde edilen çatlama momenti değerlerinden yanal eğilme teorisi kullanılarak elde edilen kayma gerilmeleri grafiği (Ersoy 1975)

2.4.4.d. Diyagonal basınç alanı teorisi

Bu teoriye göre burulma momentinin, kirişi spiral gibi saran diyagonal beton basınç gerilmeleri ile taşındığı ve bu gerilmelerin tanjant bileşeninin en kesitte kayma akımı oluşturduğu kabul edilir (Şekil 2.38). Bu teoride burulma momentindeki denge şartlarının eğilmedeki denge şartlarıyla benzer olduğu belirtilmiştir. Bu teoride, boyuna ve enine donatılar ile betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi kullanılarak denge ve uygunluk şartlarının sağlanmasıyla çözümleme yapılmaktadır (Collins and Mitchell 1974; Onsongo 1978).



Şekil 2.38. Basınç alanı teorisine göre kayma akımı (MecGregor and Ghoneim 1995)

Bu teoride, A_0 ; kayma gerilmesi akımı içinde kalan alanı, τ ; kirisin çevresindeki her bir birim uzunluktaki kayma gerilmesini, göstermek üzere burulma momentini;

$$T = 2A_0\tau \quad (2.47)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Bu bağıntıdaki τ kayma gerilmesi, A_{sl} ; boyuna donatının alanını, f_{yld} ; boyuna donatının akma dayanımını, A_{sw} ; enine donatının alanını, f_{ywd} ; enine donatının akma dayanımını, s ; enine donatı aralığını, P_0 ; kayma gerilmesi akımının olduğu çevre uzunluğunu göstermek üzere,

$$\tau = \sqrt{\frac{A_{sl}f_{yld}}{P_0} \frac{A_{sw}f_{ywd}}{s}} \quad (2.48)$$

bağıntısı ile belirlenir.

2.4.5. Yönetmeliklere göre burulma

2.4.5.a. ACI şartnamesi

Basit burulma akademik bir konu olarak kabul edildiğinden, bu şartnamedeki bütün burulma denklemlerinde kesme, burulma ve eğilme zorlamalarının birlikte etkidikleri varsayımı vardır.

Burulma gerilmelerinin Plastik Teoriye göre hesaplanması, ilgili komisyonca önerilmiş olmasına rağmen, genel kurulda yapılan bir değişiklikle, yanal-eğilme teorisi esas alınmıştır (veya gerekçesinde söylendiği gibi elastik ve plastik teoriler arasında bir ara yol seçilmiştir).

$$\tau_t = 3M_t / \sum yx^2 \quad (2.49)$$

Bu denklemde hesaplanan kayma gerilmeleri $0,4\sqrt{\sigma_b}$ yi geçmediği takdirde, burulmanın ihmal edilebileceği belirlenmektedir. ACI şartnamesinde, burulma momentinin beton ve donatı tarafından birlikte taşındığı kabul edilmektedir.

Şartnamede, kiriş gövdesinin her bir yanındaki tabla çıkıntısının, tabla kalınlığının üç katından fazla olmasına izin verilmemektedir.

Maksimum etriye aralığı için ise aşağıda gösterilen sınırlamalar yapılmıştır.

$$s \leq y_1/2 \quad (2.50)$$

$$s \leq [(\tau_t + 3 \tau_k) / \tau_t] x \quad (2.51)$$

boyuna donatı olarak kullanılacak çubuk çapının en az 10 mm olması ve iki boyuna çubuk arasındaki uzaklığın $y_1/3$, $1,5x_1$ veya 45 cm yi geçmemesi öngörülmektedir.

2.4.5.b. TS500-2000

TS500-2000’de burulma gerilmelerinin elastisite teorisine dayanan aşağıdaki denklemden hesaplanması öngörülmektedir.

$$\tau_t = nT/Fd^l \quad (2.52)$$

d^l : dairesel kesitin çapı, çokgen kesitte ise çizilen dairenin çapı, dikdörtgen kesitte ise kısa kenardır.

n : dairesel ve çokgen kesitler için 4,00, dikdörtgen kesitler için 3,0 dür.

TS-500’e göre 1 m kiriş boyunda bulunması gereken kayma donatısı alanının $25b_0 \tau_{k1}/\sigma_e$ olması gerekmektedir. Öngörülen kayma donatısı aşağıdaki gibi de ifade edilebilir. f_{ett} etriye çubuğunun enkesit alanı olduğundan,

$$\min f_{ett} = (0,25/n)b_0(s)(0,5\sqrt{\sigma_b})/(\sigma_a/2) \quad (2.53)$$

veya

$$\min f_{ett} = (0,25/n)b_0(s)(\sqrt{\sigma_b})/(\sigma_a) \quad (2.54)$$

n : etriye kol sayısı

$0,5\sqrt{\sigma_b}$: burulmanın bulunmadığı durumlar için donatı hesabı gerektirmeyen kayma gerilmesi

$\sigma_a/2$: çelikteki emniyet gerilmesi

Basit burulma için ögütlenen maksimum kayma gerilmeleri Çizelge 2.5’de gösterilmiştir. Şartname her beton sınıfı için ayrı ayrı verilen bu gerilmeler tablonun son kolonunda genelleştirilerek $\sqrt{\sigma_b}$ in bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir.

Tabloda gösterilen τ_{t1} gerilmeleri aşıldığı takdirde, burulma momentinin tümünün etriye ve eşit hacimde boyuna donatı tarafından karşılanması gerekmektedir.

Burulmaya ek olarak kesme kuvvetinin de bulunduğu durumlarda, kayma gerilmelerinin ayrı ayrı hesaplanarak toplanması öngörülmektedir.

Çizelge 2.5. Basit burulma için maksimum kayma gerilmeleri

Zorlanma Şekli	Kayma Gerilmesi	C16 kg/cm ²	C25 kg/cm ²	C30 kg/cm ²	Genel kg/cm ²
Eğilme Kayması	1. Kayma donatısı hesabı gerektirmeyen durum (τ_{k1})	6	7	8	$0,50\sqrt{\sigma_b}$
	2. Maksimum kayma gerilmesi (τ_{ko})	16	18	20	$1,30\sqrt{\sigma_b}$
Basit Burulma	3. Kayma donatısı hesabı gerektirmeyen durum (τ_{t1})	5	6	7	$0,43\sqrt{\sigma_b}$
	4. Maksimum kayma gerilmesi (τ_{to})	16	18	20	$1,30\sqrt{\sigma_b}$
Burulma ve Eğilme	5. Kayma donatısı hesabı gerektirmeyen durum (τ_1)	8	9	10	$0,65\sqrt{\sigma_b}$
	6. Maksimum kayma gerilmesi (τ_o)	20	23	26	$1,65\sqrt{\sigma_b}$

2.4.5.c. Eurocode-2

Eurocode 2 şartnamesinde burulma etkisindeki enkesitler için ince cidarlı tüp benzeşimi yaklaşımıyla burulma hesaplamaları için öneriler sunulmuştur (Şekil 2.39). Buna göre dolu enkesitler yerine eşdeğer ince cidarlı tüp enkesitler ele alınarak hesaplamaların yapılması önerilmiştir. Tablalı enkesitlerin, dikdörtgen enkesitlere ayrılarak hesaplamaların yapılması yine Eurocode 2’de önerilmiştir.

Eurocode-2 basit burulma momentini hesaplamak için T_{eu} ; burulma momentini, $V_{sd,i}$; kesme kuvvetini, A_k ; enkesit köşelerine yerleştirilen boyuna donatı ile belirlenen orta çizginin meydana getirdiği alanı, $\tau_{t,i}$; burulmadan dolayı oluşan kayma gerilmesini, $t_{ef,i}$; etkili cidar kalınlığını, A ; enkesit toplam alanını, u ; enkesitin en dış çevresini, z_i ; cidar kenar uzunluğunu göstermek üzere,

$$t_{ef,i} = \frac{A}{u} \quad (2.55)$$

$$\tau_{t,i} = \frac{V_{sd,i}}{t_{ef,i}z_i} \quad (2.56)$$

$$T_{eu} = 2\tau_{t,i}t_{ef,i}A_k \quad (2.57)$$

bağıntılarını önermektedir.

Enkesitteki burulma momentinin güvenle taşınabilmesi için, $T_{eu} \leq T_{Rd1}$ ve $T_{eu} \leq T_{Rd2}$ olması gerekir. Burada T_{Rd1} burulma sırasında ortaya çıkan beton basınç çubukları tarafından taşınabilecek en büyük burulma momenti ve T_{Rd2} donatı tarafından karşılanabilecek en büyük burulma momentini göstermek üzere, $v = 0,7 - \frac{f_{ck}}{200} \geq 0,5$ olarak tanımlanmış ve

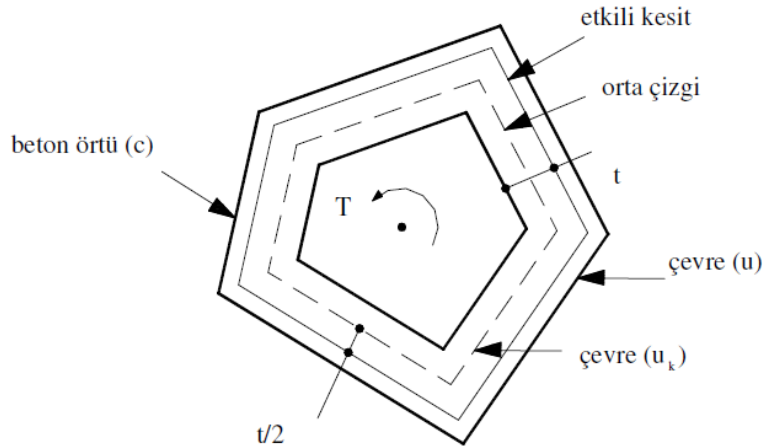
$$T_{Rd1} = 1,4vf_{cd}tA_k\sin\theta\cos \quad (2.58)$$

$$T_{Rd2} = \frac{2A_k f_{ywd} A_{sw} \cot \theta}{s} \quad (2.59)$$

bağıntısı önerilmiştir. Eğer donatısı belli bir enkesit söz konusu ise Eurocode-2;

$$T_{Rd2} = 2A_k \sqrt{\left(\frac{A_{sw} f_{ywd}}{s}\right) \left(\frac{A_{sl} f_{yld}}{u_k}\right)} \quad (2.60)$$

bağıntısı ile taşıyabileceği burulma momentinin hesaplanabileceği belirtilmiştir.



Şekil 2.39. Eurocode-2 de burulma momenti hesabı için önerilen ince cidarlı enkesit

2.5. Literatürde Burulma ile İlgili Yapılmış Olan Bazı Çalışmalar

2.5.1. Csikos ve Hegedus

Csikos and Hegedus tarafından (1998a) 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 değerleri Çizelge 2.6’da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Deneylerden ve hesaplardan elde edilen çatlama momenti değerleri (Csikos and Hegedus 1998a)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	DeneySEL Sonuçlar	Elastik Teori	(1)/(2)	Plastik Teori	(1)/(4)	Yanal Eğilme	(1)/(6)
A-1	1,61	1,13	1,42	1,81	0,89	1,54	1,05
A-2	1,6	1,32	1,28	2,11	0,80	1,79	0,84
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	2,30	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	2,40	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

*Kullanılan değerler kN.m cinsindendir

Çizelge 2.6'dan 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.

2.5.2. Atef H. Bakhsh ve diğerleri

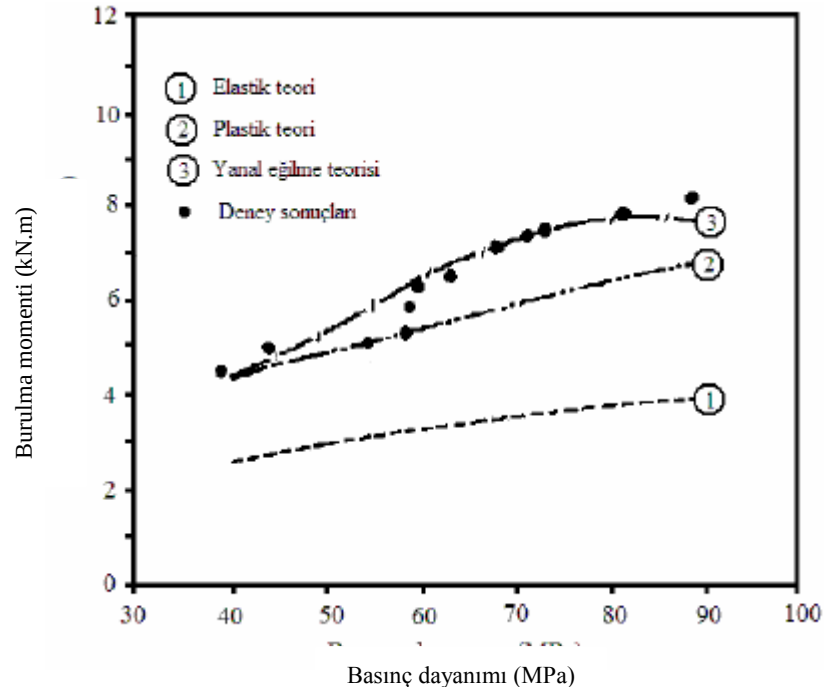
Bakhsh *et al.* (1990) 13 kiriş numunesi üzerinde basit burulma deneyleri yapmıştır. Bu çalışmanın amacı ACI yönetmeliğinde herhangi bir tasarım formülü yer almayan yüksek dayanımlı yapı elemanlarının basit burulma altında davranışlarını araştırmaktır. Çalışmada kullanılan beton basınç dayanımı 40 ile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

Çizelge 2.7'de Bakhsh *et al.* (1990) 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 Çizelge 2.7'de yer alan T_{den}/T_{teo} hesabında teorik değerler deneysel verilere en yakın sonucu veren yanal eğilme teorisinden elde edilen değerlerdir.

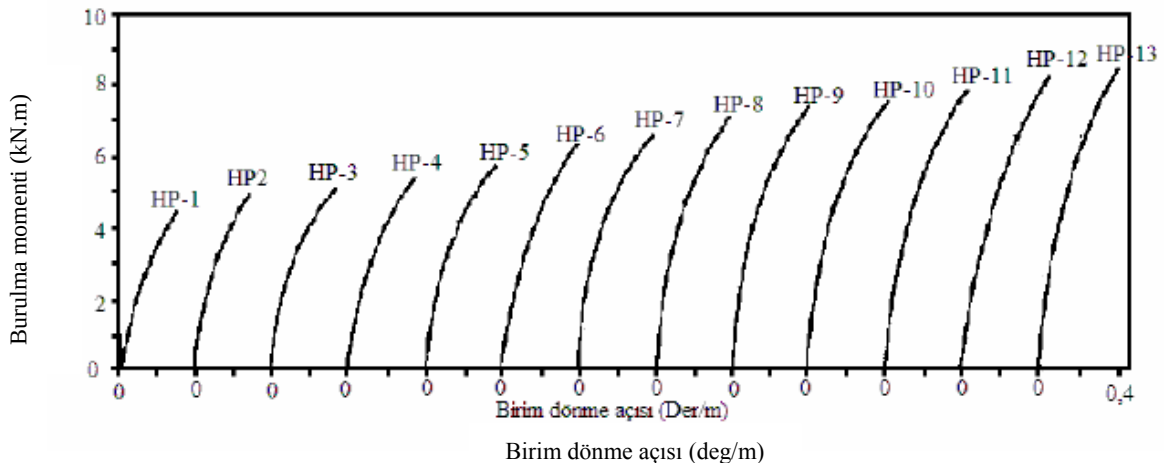
Çizelge 2.7. Deneysel ve teorik olarak elde edilen burulma dayanımları (Bakhsh *et al* 1990)

	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

Şekil 2.40’da Çizelge 2.7’de özetlenen değerler burulma momenti–basınç dayanımı grafiği elastik teori, plastik teori ve yanal eğilme teorileri için gösterilmiştir. Şekil 2.41’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 2.40. Burulma momenti beton basınç dayanımı ilişkisi (Bakhsh *et al* 1990)



Şekil 2.41. Burulma momenti birim dönme ilişkisi (Bakhsh *et al* 1990)

Bakhsh *et al.* (1990), yapmış oldukları çalışma sonucunda şu sonuçları çıkarmışlardır. Donatısız yüksek dayanımlı beton kirişler basit burulma momenti etkisi altında ani ve gevrek bir davranış göstererek göçmektedirler. Yanal eğilme teorisi, donatısız yüksek dayanımlı beton kirişlerin burulma dayanımı tahmini için kullanılabilecek en yakın sonuçları vermektedir. Burulma dayanımı hesabı için yarmada çekme dayanımı değerleri kullanılması yakın hesap için daha uygundur.

2.5.3. Rasmussen ve Baker

Rasmussen and Baker (1995) 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.

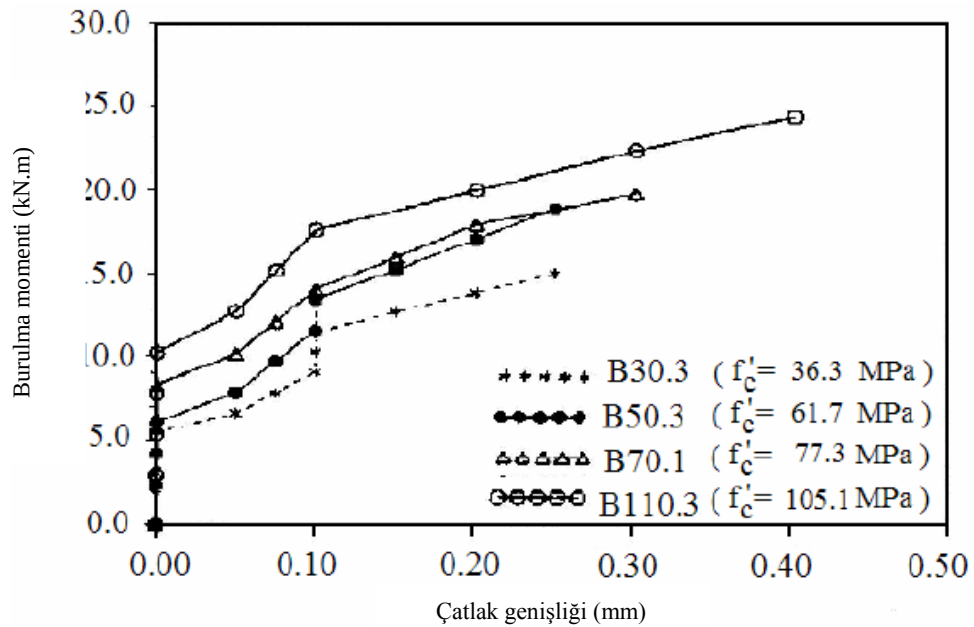
12 adet; yüksek dayanımlı beton (YDB) ve normal dayanımlı beton (NDB) kullanılarak hazırlanan betonarme kirişin deney sonuçları Çizelge 2.8’de verilmiştir.

Çizelge 2.8. Deney sonuçları (Rasmussen and Baker 1995)

Numune	Burulma Dayanımı (kN.m)	Birim Döme (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

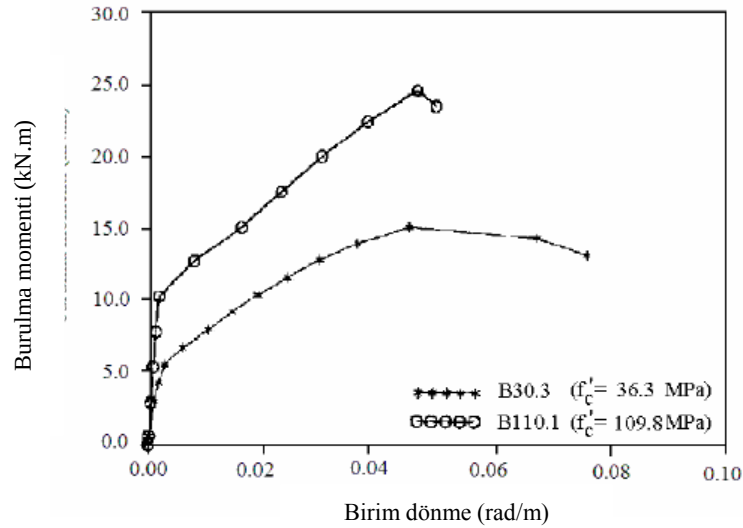
Deneyisel çalışma esnasında yapılan gözlemler sırasında NDB ve YDB kirişlerin çatlama şekillerinin birbirinden farklı olduğu saptanmıştır. YDB kirişler NDB kirişlere göre içerisinde sadece matris çatlakları olmaması bunun yanı sıra agrega çatlaması da gerçekleşmesi nedeniyle daha gevrek şekilde kırılırlar. 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 2.42’de farklı beton sınıflarına ait kirişlerin ortalama çatlak genişlikleri eğrileri verilmiştir. Şekil 2.42’den 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.



Şekil 2.42. Farklı dayanımlardaki numuneler için burulma momenti-çatlak genişliği ilişkisi (Rasmussen and Baker 1995)

Şekil 2.43’de normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonarme kirişler için burulma – birim dönme ilişkisi gösterilmiştir. Kiriş çatlama öncesi beklendiği gibi burulma birim dönme eğrisi lineer davranış göstermektedir. Şekil 2.43’den açıkça görülmektedir ki yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin çatlak öncesi burulma rijitliği daha yüksektir. Çatlak oluştuktan 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 2.43’de görülmektedir.



Şekil 2.43. Normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonarme kirişler için burulma momenti–birim dönme ilişkisi (Rasmussen and 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.

2.5.4. Nasr-Eddine Koutchoukali ve Abdeldjelil Belarbi

Koutchoukali and Belarbi (2001) betonarme kirişlerde yüksek dayanımlı betonların basit burulma üzerindeki etkilerini araştırmak için deneysel bir çalışma yapmıştır. 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 Çizelge 2.9'da verilmiştir.

Çizelge 2 9. Numune beton ve donatı özellikleri (Koutchoukali and 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	8,6
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	4Ø1,9	9,5	70	76,7

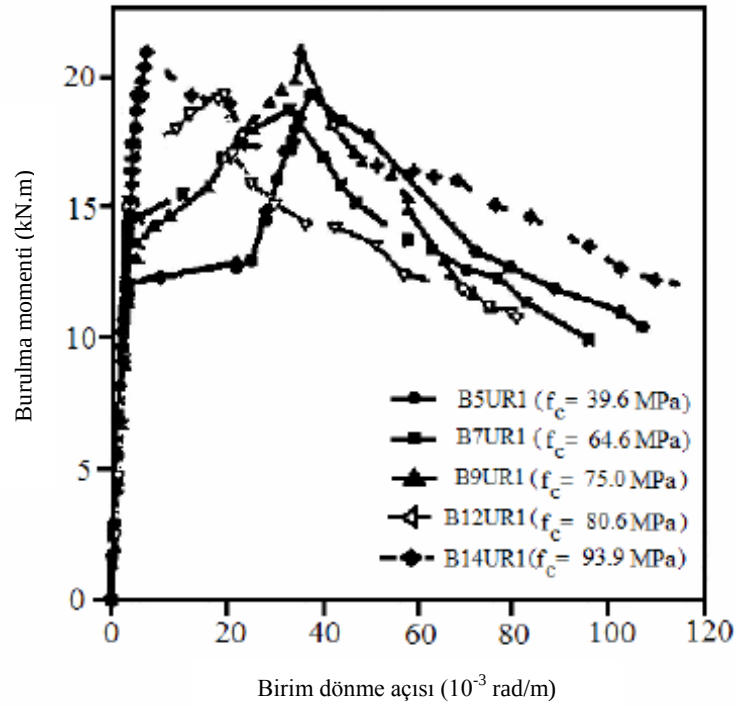
Deneyleri yapılmış olan; dokuz adet yüksek dayanımlı beton kullanılarak hazırlanmış olan betonarme kirişlerden elde edilen veriler Çizelge 2.10’da verilmiştir. Çatlama öncesi kirişin davranışı elastiktir. Burulmaya esas olarak beton direnir.

Çizelge 2.10. Deneylerden elde edilen sonuçlar (Koutchoukali and 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

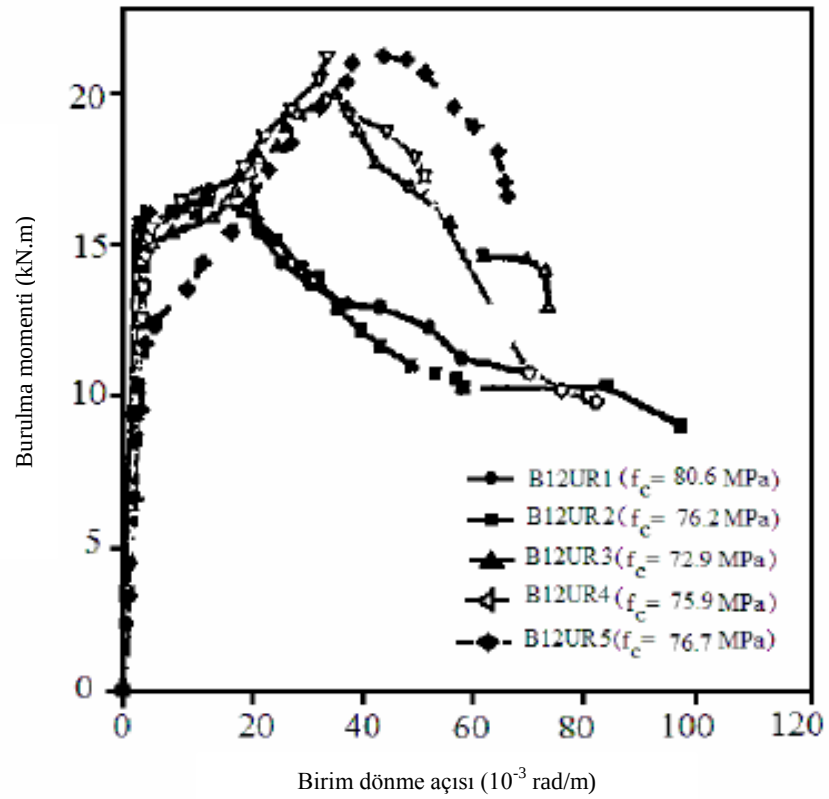
*Birim dönme açısı, burulma kapasitesine ulaşılan anda okunan değerlerdir

Tüm numuneler için burulma momenti–birim dönme açısı ilişkisi Şekil 2.44 ve Şekil 2.45’de 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 2.44. Birinci grup numuneler için burulma momenti–birim dönme açısı ilişkisi (Koutchoukali and Belarbi 2001)

Nasr-Eddine Koutchoukali and Abdeldjelil Belarbi (2001) yaptıkları deneyler sonucunda şu 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.



Şekil 2.45. İkinci grup numuneler için burulma momenti–birim dönme açısı ilişkisi (Koutchoukali and Belarbi 2001)

2.5.5. Saravanan Panchacharam ve Abdeldjelil Belarbi

Panchacharam and Belarbi (2002) FRP kompozit kullanılarak güçlendirilen betonarme kirişlerin burulma dayanımını araştırmak amacıyla deneysel bir çalışma yapmıştır. 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 Çizelge 2.11’de verilmiştir.

Çizelge 2.11. Numune beton ve donatı özellikleri (Panchacharam and Belarbi 2002)

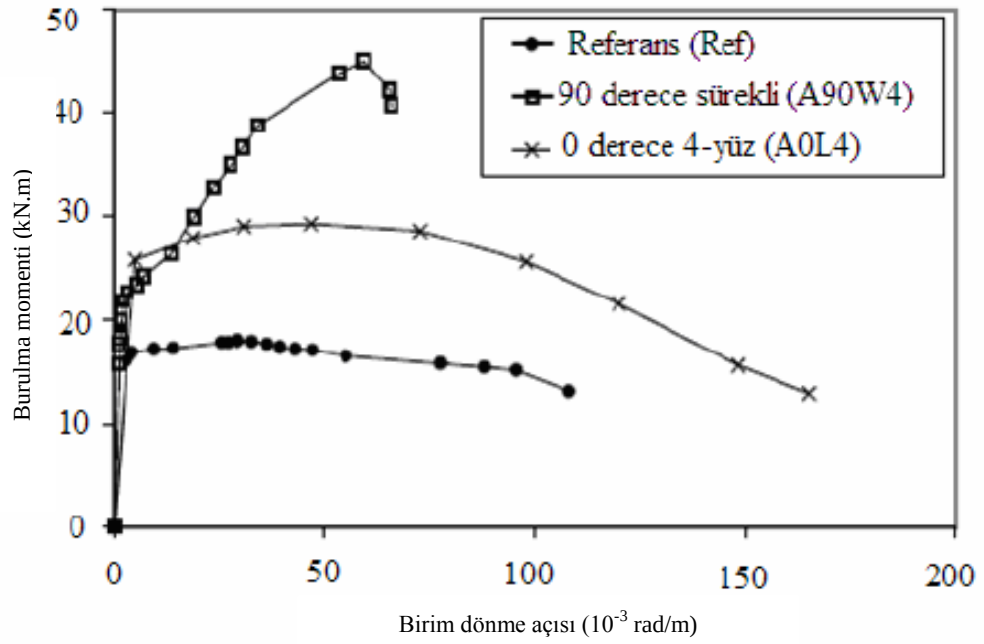
Numune	Boy Donatı Çapı (mm)	Etriye		Beton Basınç Dayanımı (MPa)
		Çap (mm)	Aralık (mm)	
A	4Ø12,7	9,53	152,4	34
	4Ø9,53			
B	4Ø12,7	9,53	152,4	26
	4Ø9,53			
C	4Ø12,7	9,53	152,4	31
	4Ø9,53			

GFRP (cam lifi takviyeli polimer) kullanılarak güçlendirilen 8 adet betonarme kirişin basit burulma momenti altında yapılan deneylerinin sonuçları Çizelge 2.12’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 yapıştırırmayı 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.

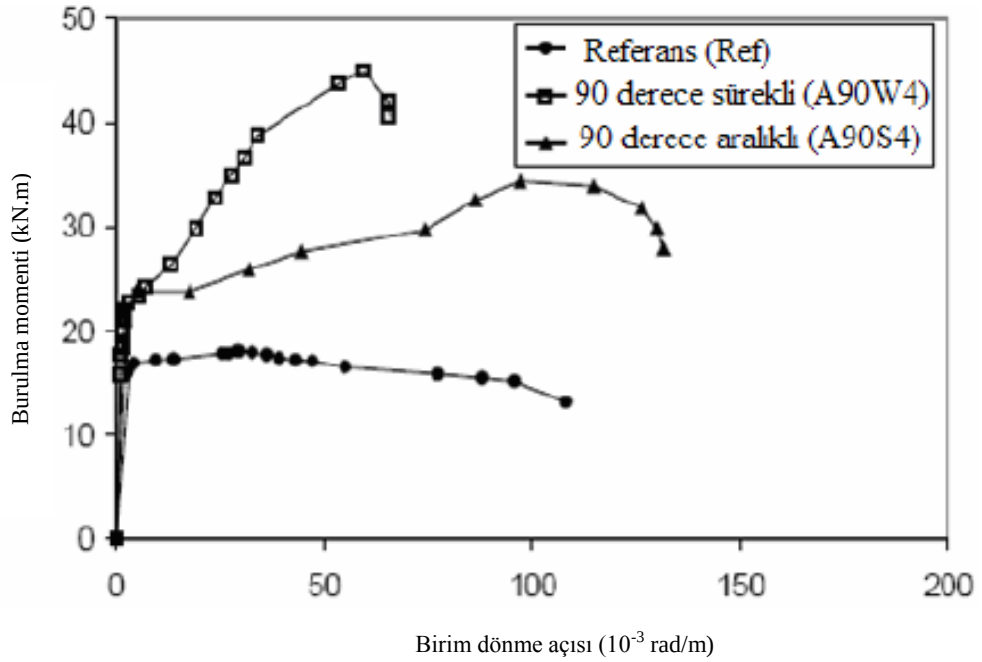
Çizelge 2.12. Panchacharam ve Belarbi deney sonuçları (Panchacharam and Belarbi 2002)

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	-

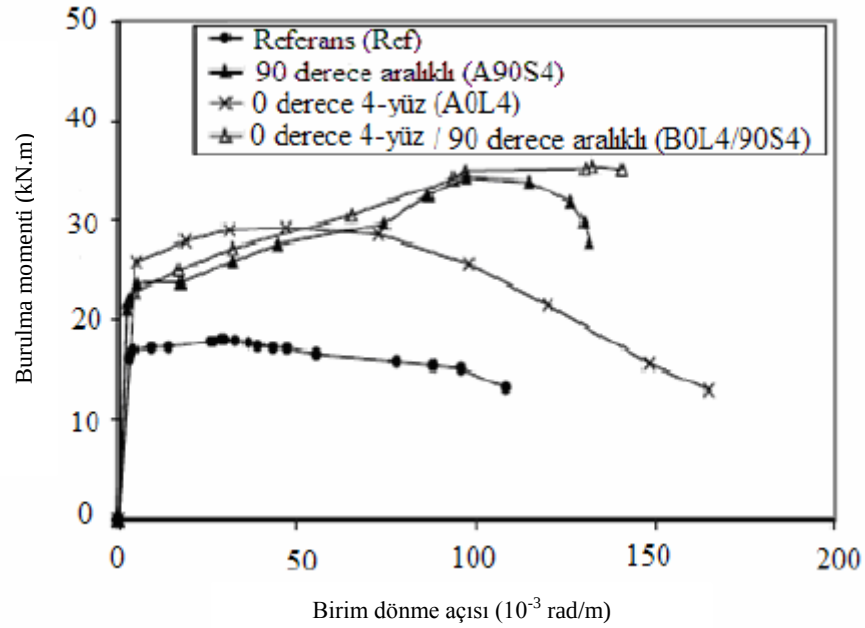
Şekil 2.46, Şekil 2.47 ve Şekil 2.48’de sırasıyla lif düzeninin etkisi, sürekli ve aralıklı sargılamanın etkisi ile her iki yönde beraber yapılan sargılamanın etkisini gözlemlemek amacıyla deney sonuçları referans numune sonucuyla beraber karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 2.46. Lif düzeni etkisine ait burulma momenti–birim dönme açısı grafiği (Panchacharam and Belarbi 2002)



Şekil 2.47. Sürekli ve aralıklı sargılamamanın etkisine ait burulma momenti–birim dönme açısı grafiği (Panchacharam and Belarbi 2002)



Şekil 2.48. Her iki yönde beraber yapılan sargılamının etkisine ait burulma momenti – birim dönme açısı grafiği (Panchacharam and Belarbi 2002)

Çizelge 2.13’de deneysel olarak elde edilen verilerle analitik modelden elde edilen çatlama momenti ve burulma momenti kapasitesi sonuçlarının karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 2.13. Deney sonuçları ve analitik modelden elde edilen sonuçların karşılaştırması (Panchacharam and Belarbi 2002)

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

Panchacharam and Belarbi (2002) yaptıkları deneyler sonucunda şu 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.

2.5.6. Constantin E. Chalioris

Chalioris (2008), karbon lif takviyeli polimer kullanımı ile dikdörtgen kesitli ve tablalı kirişlerin güçlendirilmesi ve bunların basit burulma davranışlarını gözlemlemek amacıyla deneysel bir çalışma yapmıştır. 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 Çizelge 2.14’de verilmiştir.

Çizelge 2.14. Numune donatı ve sargılama şekilleri (Chalioris 2008)

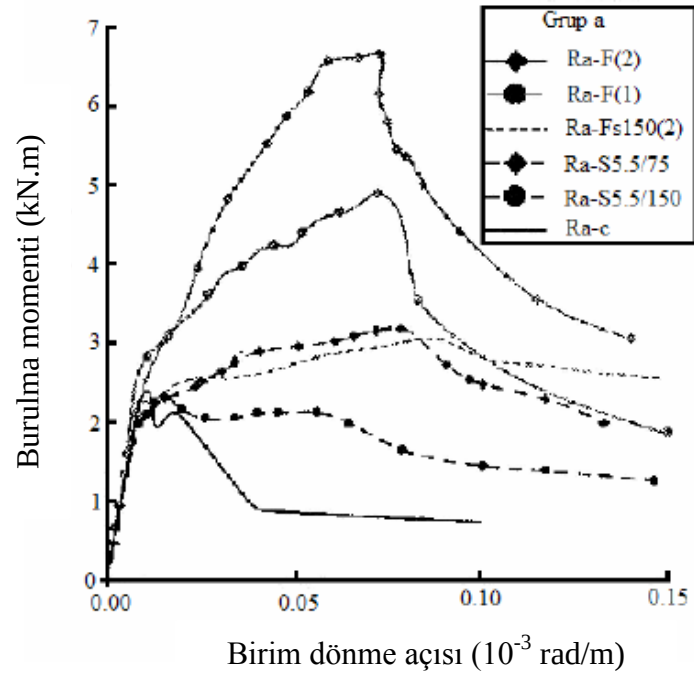
Numune	Boyuna Donatı Çapı (mm)	Etriye Çapı (mm)	Karbon Frp Kullanılarak Yapılan Güçlendirme Şekli
Ra-c	4Ø8	-	-
Ra-F(1)	4Ø8	-	Sürekli sargılı
Ra-F(2)	4Ø8	-	Sürekli sargılı
Ra-Fs150(2)	4Ø8	-	Aralıklı sargılı
Ra-S5.5/150	4Ø8	Ø5,5/150	-
Ra-S5.5/75	4Ø8	Ø5,5/75	-
Rb-c	4Ø8	-	-
Rb-F(1)	4Ø8	-	Sürekli sargılı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

Deneyler sonucunda çatlama anında ölçülen burulma momenti (T_{cr}), çatlama anında ölçülen birim dönme açısı (θ_{cr}), maksimum burulma kapasitesi (T_u) ve maksimum birim dönme açısı (θ_u) değerleri Çizelge 2.15’de verilmiştir. 6 adet kiriş ilk çatlama momentinden sonra bu moment değerini aşamamıştır.

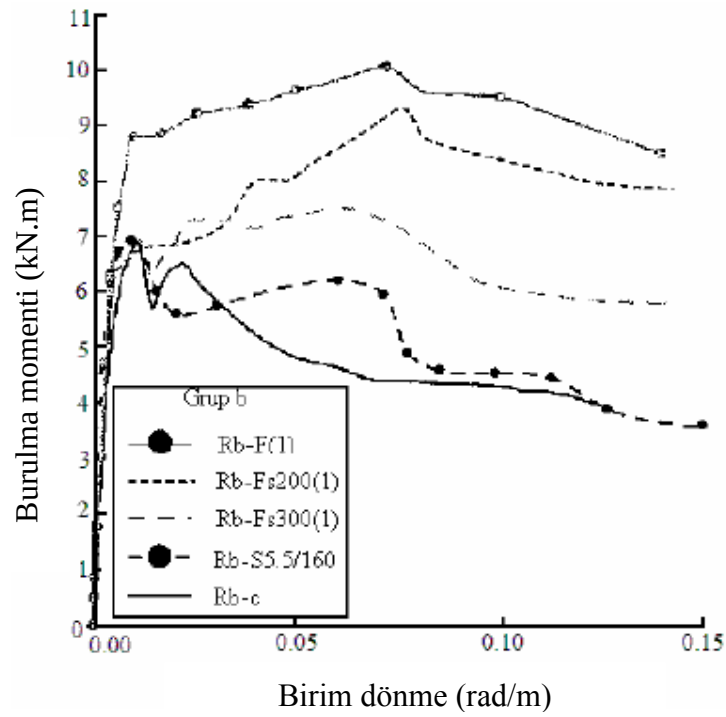
Çizelge 2.15. Chalioris deney sonuçları (Chalioris 2008)

Numune	T_{cr} (kN.m)	ϕ_{cr} (rad/m)	T_u (kN.m)	ϕ_u (rad/m)
Ra-c	2,389	0,0011	-	-
Ra-F(1)	2,800	0,0013	4,868	0,072
Ra-F(2)	2,830	0,0011	6,650	0,072
Ra-Fs150(2)	2,219	0,0009	3,018	0,088
Ra-S5.5/150	2,300	0,0015	-	-
Ra-S5.5/75	2,250	0,0013	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

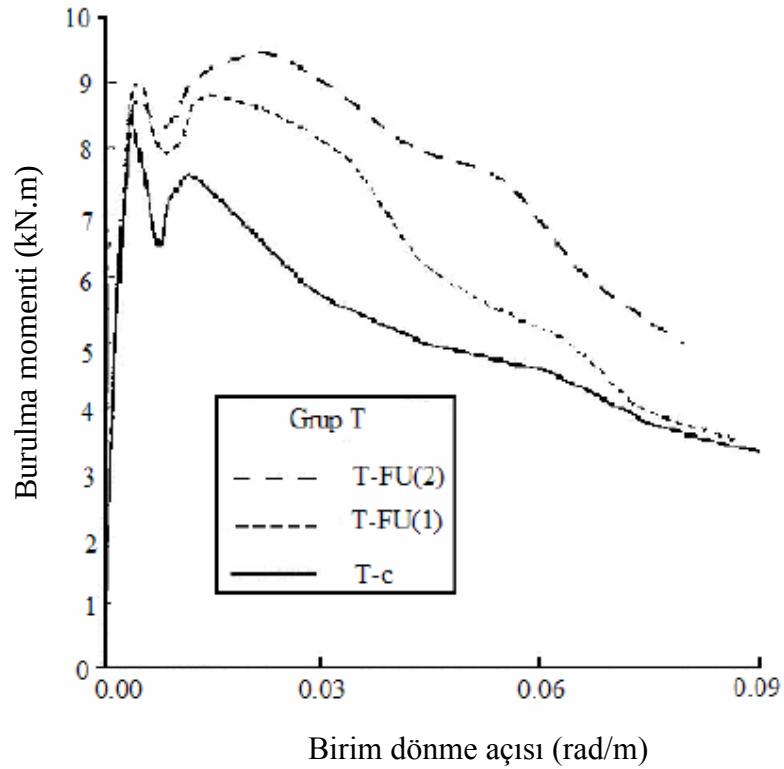
Şekil 2.49, 2.50 ve 2.51’de sırasıyla dikdörtgen kesitli “a” grubu kirişlerin, dikdörtgen kesitli “b” grubu kirişlerin ve tablalı kirişlerin burulma momenti–birim dönme açısı grafikleri verilmiştir.



Şekil 2.49. Dikdörtgen kesitli “a” grubu kirişlere ait burulma momenti – birim dönme açısı grafiği (Chalioris 2008)



Şekil 2.50. Dikdörtgen kesitli “b” grubu kirişlere ait burulma momenti – birim dönme açısı grafiği (Chalioris 2008)



Şekil 2.51. Tablalı kirişlere ait burulma momenti–birim dönme açısı grafiği (Chalioris 2008)

Chalioris (2008), yaptığı deneyler sonucunda şu 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.

2.5.7. W. Pawlak ve M. Kaminski

Polonyalı araştırmacılar Pawlak and Kamiński (2012) burulmaya maruz elemanlarda çatlakları açıklamak için çalışmalar yapmışlardır. 1980'lerin sonlarında Ciezak burulma etkisindeki elemanların limit servis ömürleri üzerinde araştırmalar yapmıştır. Araştırmalarını “Burulma Etkisindeki Betonarme Elemanlarda Çatlak Genişliği” başlığı altında toplamıştır. Pawlak ve Kaminski bu deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlara varmıştır:

Burulma çatlak genişliği genellikle ortalamadan sapmıştır.

$T/M > 0,27$ olduğu durumlarda çatlak genişliği için burulma etkisi alınmalıdır, $T/M \leq 0,27$ olduğu zaman ise çatlak genişliği için sadece eğilme momenti dikkate alınmalıdır.

Bu yöntem mühendislikte pratik olarak uygulandığı zaman en büyük değer alınmalıdır.

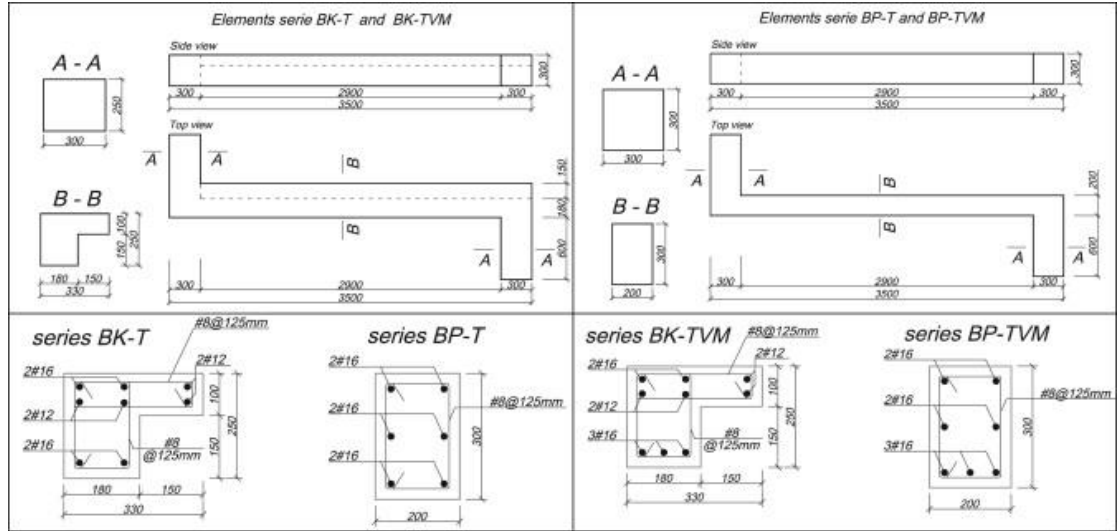
W. Budzynski normal kuvvet, kesme kuvveti ve moment değerlerini kullanarak elemanların çatlak genişliğini hesaplamak için kendi formülünü önermiştir. Budzynski hem teorik hem de deneysel olarak sorunu araştırmıştır.

s_{rm} : ortalama çatlak aralığı

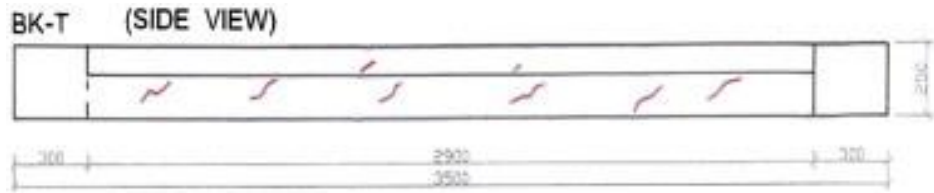
$$s_{rm} = \frac{1}{\frac{\cos\theta}{s_{rym}} + \frac{\sin\theta}{s_{rmx}}} \quad (2.64)$$

s_{rmy} , s_{rmx} : enine ve boyuna ortalama çatlak genişlikleri

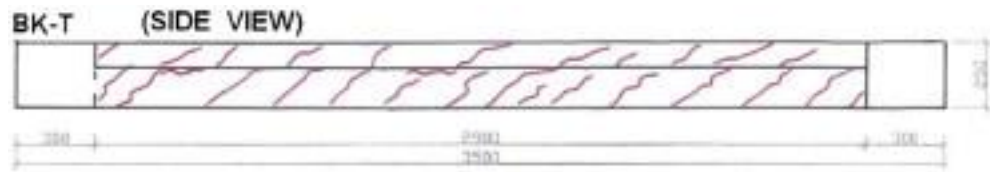
W. Pawlak and M. Kaminski (2012) 10 adet kiriş üzerinde deney yapmışlardır. Sadece burulmanın olduğu deney grubuna BP-T ve BK-T; burulma, moment ve kesmenin etki ettiği deney grubuna ise BK-TVM ve BP-TVM olarak adlandırmışlardır. Deney sırasında uygulanan kuvvet 8 kN değerindedir.



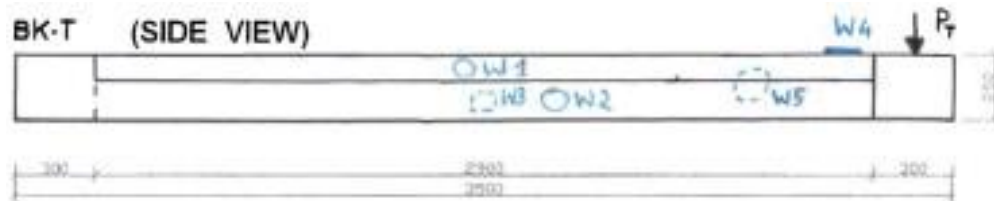
Şekil 2.52. Pawlak ve Kamiński test elemanları (Pawlak and Kamiński 2012)



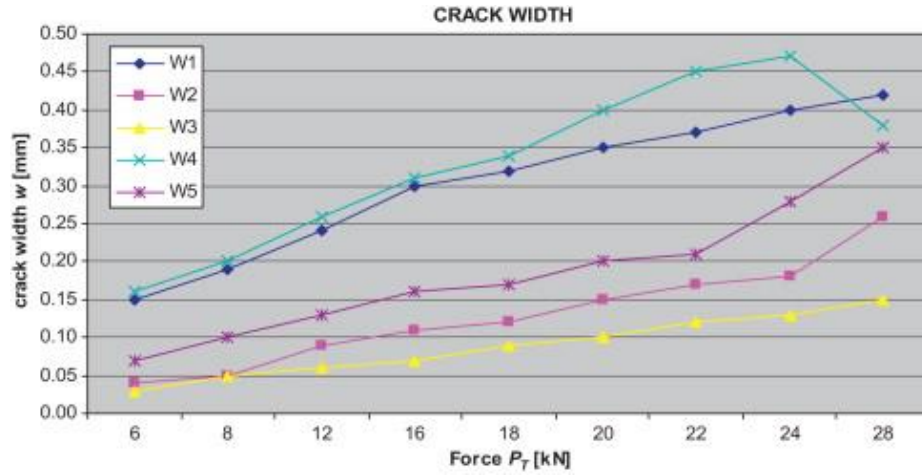
Şekil 2.53. BK-T numunesinde meydana gelen çatlaklar (Pawlak and Kamiński 2012).



Şekil 2.54. BK-T numunesinde kırılma anında meydana gelen çatlaklar (Pawlak and Kamiński 2012)



Şekil 2.55. İncelenen çatlakların yeri (Pawlak and Kamiński 2012)

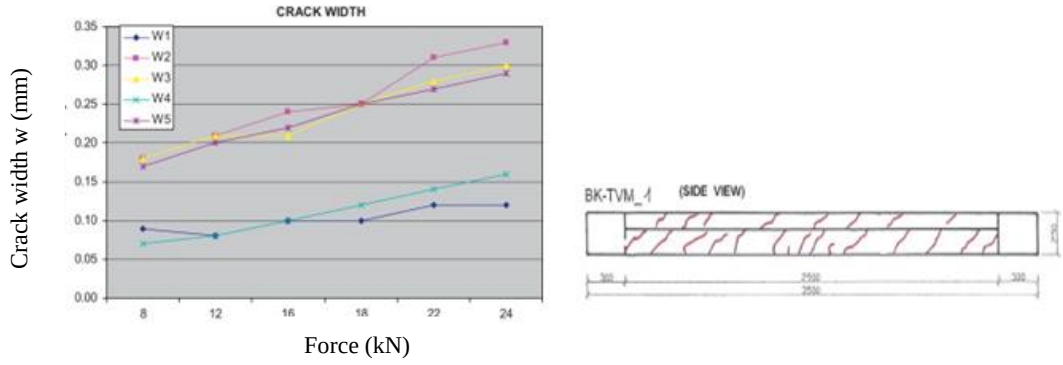


Şekil 2.56. Kırılma anında meydana gelen çatlak genişlikleri (BK-T) (Pawlak and Kamiński 2012)

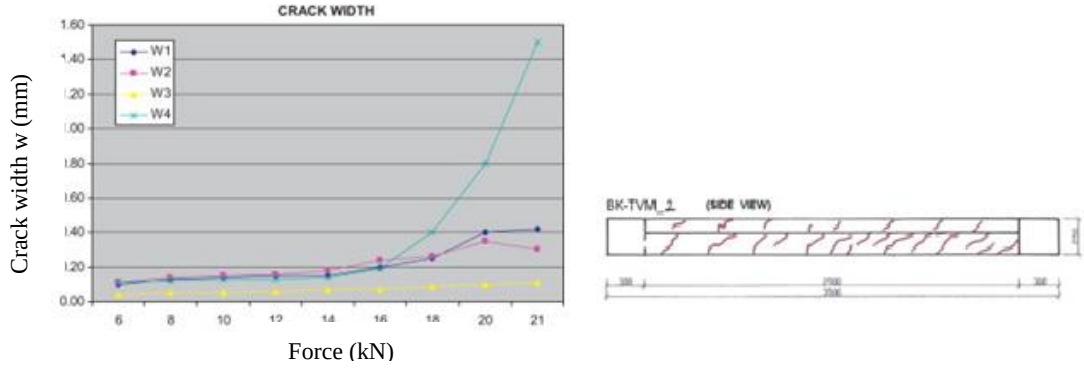
Pawlak ve Kaminski yapmış oldukları bu deneyler sonucunda ampirik ve deneysel sonuçların bir birlerine çok yakın çıktıklarını görmüşlerdir. %10 civarında bir sapmanın olduğunu gözlemlemişlerdir. Ampirik olarak hesaplanan çatlak genişliği değerlerinin, deneyler sonucunda ölçülen çatlak genişliklerinden daha büyük olduğunu söyleyebiliriz.

Çizelge 2.16. Eurocode-2 ye göre hesaplanmış çatlak genişlikleri (Pawlak and Kamiński 2012)

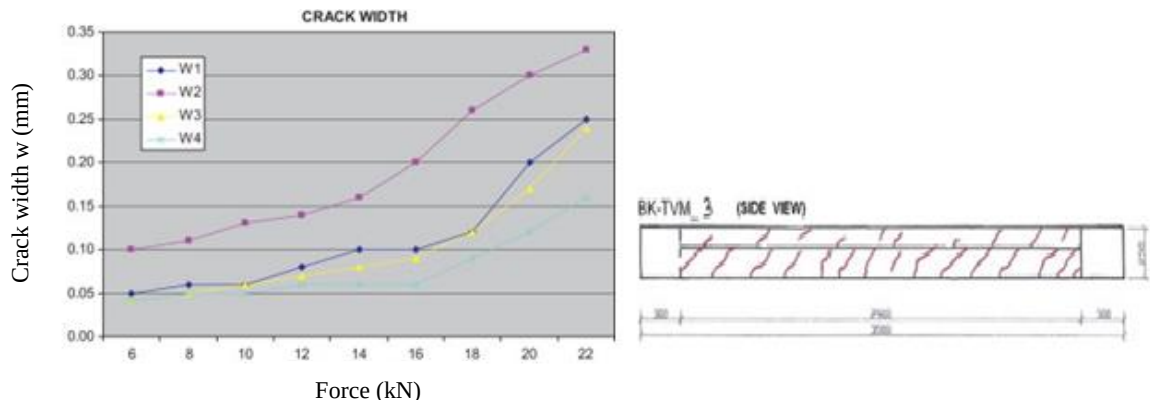
Eleman	Çatlak genişliği $w_k = s_{rmax}(\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm})$ (Eurocode-2'ye göre)					
	Deneysel			Teorik		
	T= 7,2 kNm (mm)	T= 12 kNm (mm)	T=15 kNm (mm)	T= 7,2 kNm (mm)	T= 12 kNm (mm)	T=15 kNm (mm)
BK-T	0,09	0,15	0,22	0,09	0,22	0,26
BK-T	0,11	0,15	0,29	0,08	0,22	0,26
BK-TVM_1	0,11	0,24	0,28	0,09	0,14	0,27
BK-TVM_1	0,09	0,18	0,25	0,08	0,12	0,22
BK-TVM_2	0,13	0,28	0,32	0,06	0,20	0,29
BK-TVM_2	0,08	0,14	0,22	0,06	0,16	0,24
BK-TVM_3	0,07	0,20	0,30	0,08	0,30	0,38
BK-TVM_3	0,08	0,14	0,19	0,07	0,29	0,40
BK-TVM_4	0,08	0,20	-	0,08	0,38	0,48
BK-TVM_4	0,09	0,14	0,27	0,08	0,32	0,43



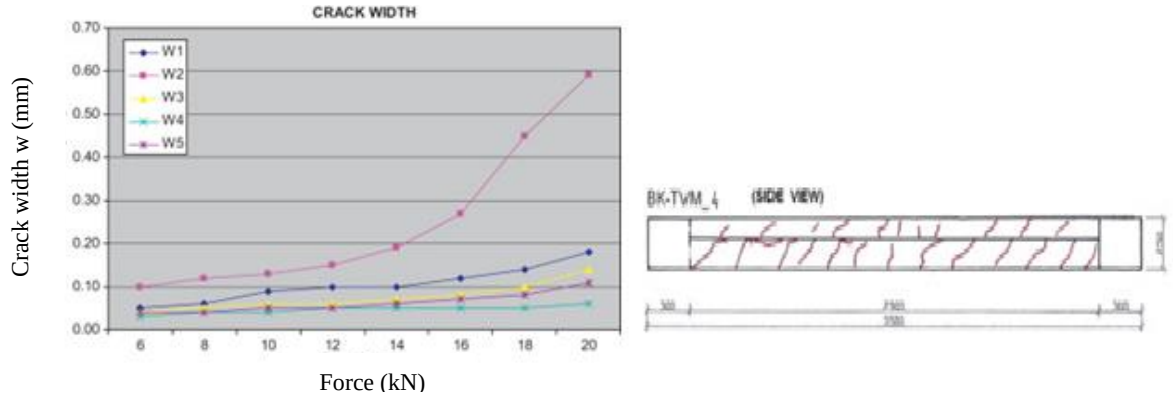
Şekil 2.57. BK-TVM_1 kirişinde yük-çatlak genişliği grafiği ve BK-TVM_1 kirişinde meydana gelen çatlaklar (Pawlak and Kamiński 2012)



Şekil 2.58. BK-TVM_2 kirişinde yük-çatlak genişliği grafiği ve BK-TVM_2 kirişinde meydana gelen çatlaklar (Pawlak and Kamiński 2012)



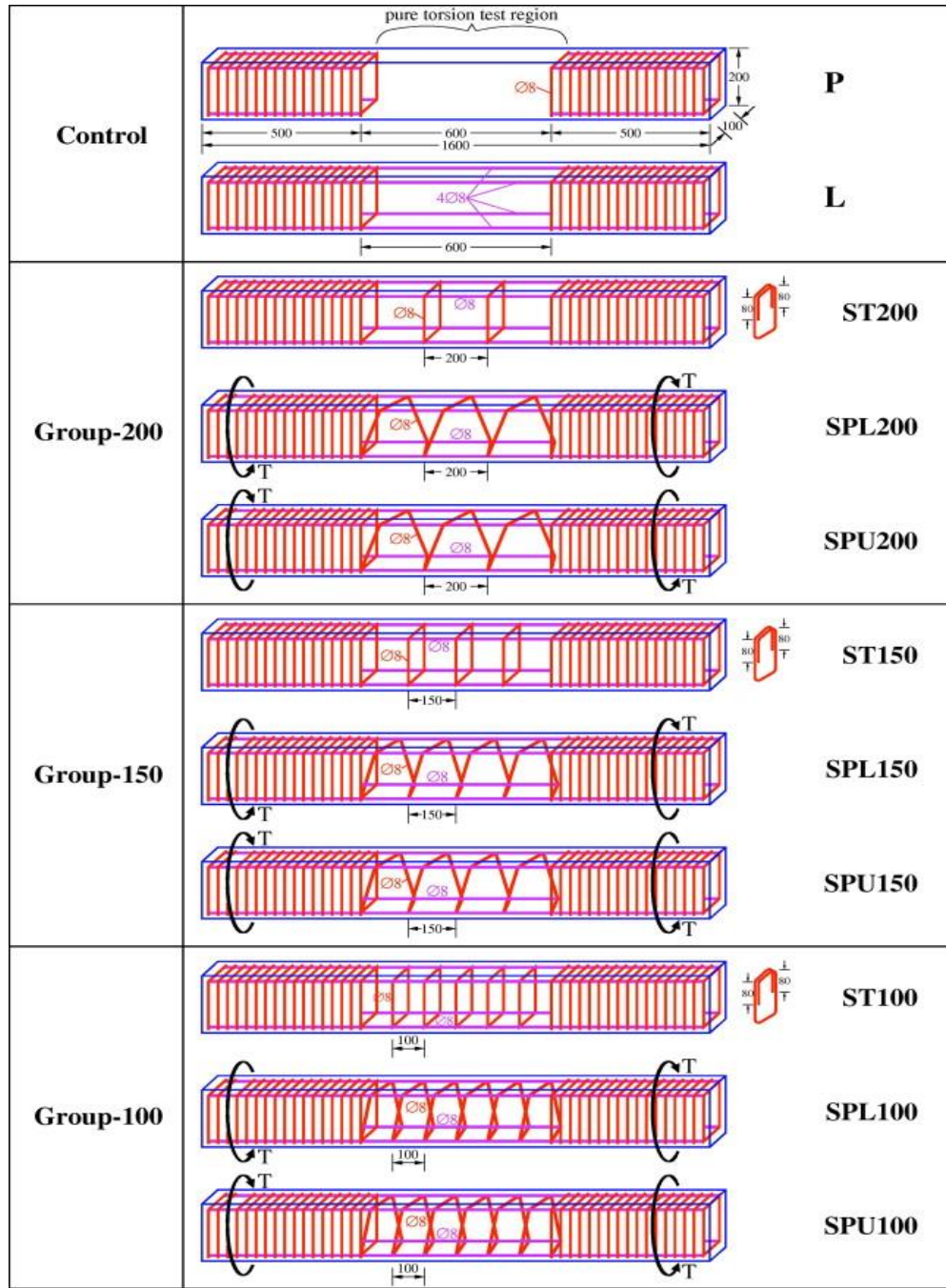
Şekil 2.59. BK-TVM_3 kirişinde yük-çatlak genişliği grafiği ve BK-TVM_3 kirişinde meydana gelen çatlaklar (Pawlak and Kamiński 2012)



Şekil 2.60. BK-TVM_4 kirişinde yük-çatlak genişliği grafiği ve BK-TVM_4 kirişinde meydana gelen çatlaklar (Pawlak and Kamiński 2012)

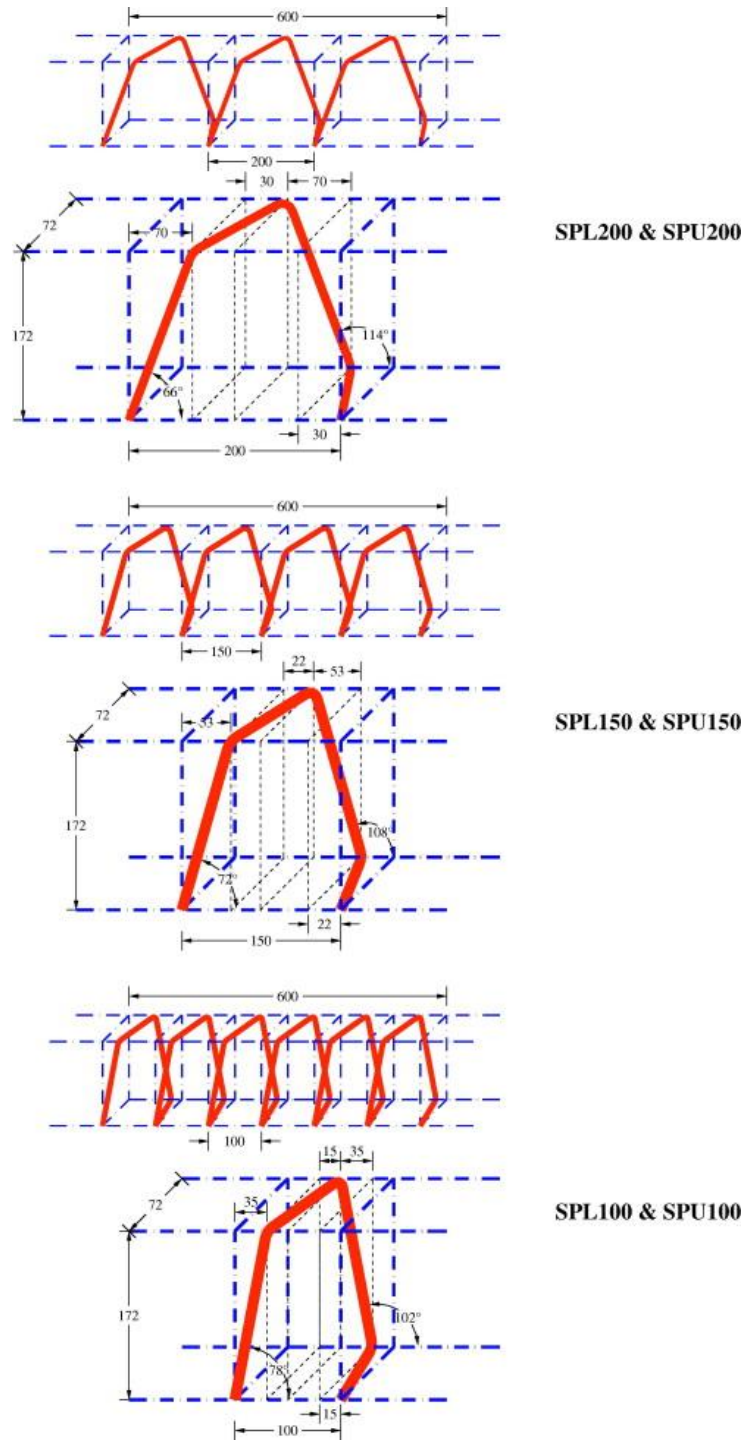
2.5.8. Constantin E. Chalioris - Chris G. Karayannis

Chalioris and Karayannis (2013) yapmış oldukları deneylerde dikdörtgen etriyelere kolon kiriş birleşim bölgelerinde spiral elemanları takviye ederek burulmaya maruz bırakmışlardır. Constantin E. Chalioris ve Chris G. Karayannis 2 adet kiriş numunesi olmak üzere 11 adet deney numunesi hazırlamışlardır. Deneyde kullanılan boyuna donatıların akma ve çekme gerilme değerleri sırasıyla 518 ve 656 MPa'dır.



Şekil 2.61. Costantin E. Chalioris ve Chris G. Karayannis deney numuneleri (Chalioris and Karayannis 2013)

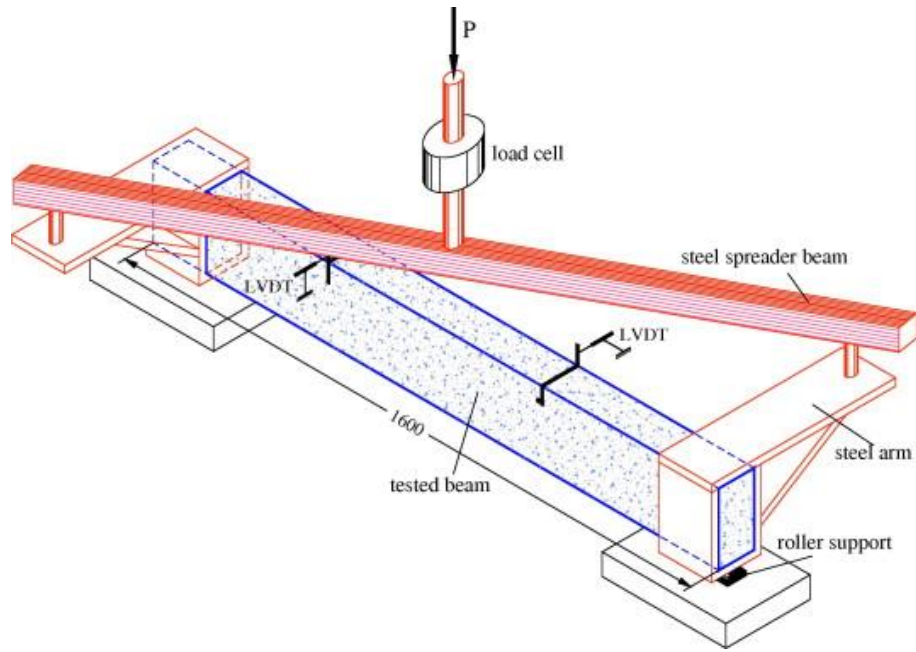
Costantin and Karayannis (2013) diğer 9 numuneyi ise kendi içinde 3'e ayırmışlardır. Numunelerin kolon kiriş birleşim bölgesindeki spiral detayları aşağıdaki gibidir. Ayrıca deneyde kullanılan betonun basınç dayanımı 23 MPa, çekme dayanımı 2,67 MPa'dır. Beton karışımında herhangi bir katkı maddesi kullanılmamıştır.



Şekil 2.62. Costantin ve Karayannis deney numune detayları (Chalioris and Karayannis 2013)

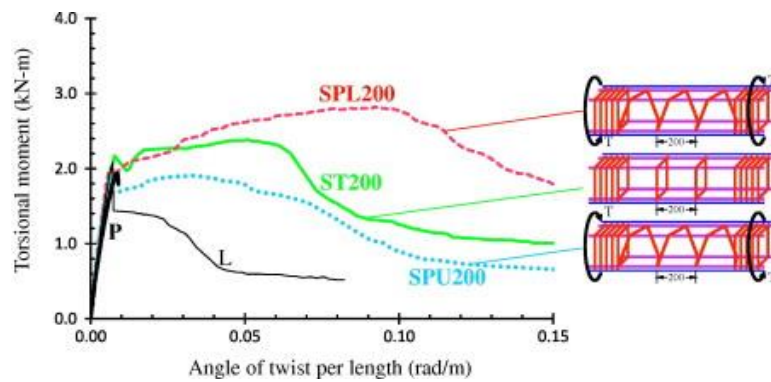
Aşağıdaki şekilde ise deney düzeneği gösterilmektedir. Costantin and Karayannis (2013) yaygın bir şekilde kullanılan burulma deney düzeneğini kullanmışlardır. Deney

düzeneginin toplam uzunluğu 1600 mm, burulmaya maruz bırakılan kirişlerin toplam uzunlukları ise 1300 mm'dir. Deney düzeneginde kiriş uçlarının üst kısmında çelik kollar yerleştirilmiştir ve bu kolların üzerinden çapraz çelik kiriş sabitlenmiştir. Yük düşük bir seviyeden uygulanmaya başlandı 0,001 rad/dak'dan 0,005 rad/dak'ya kadar çıkarılmıştır.

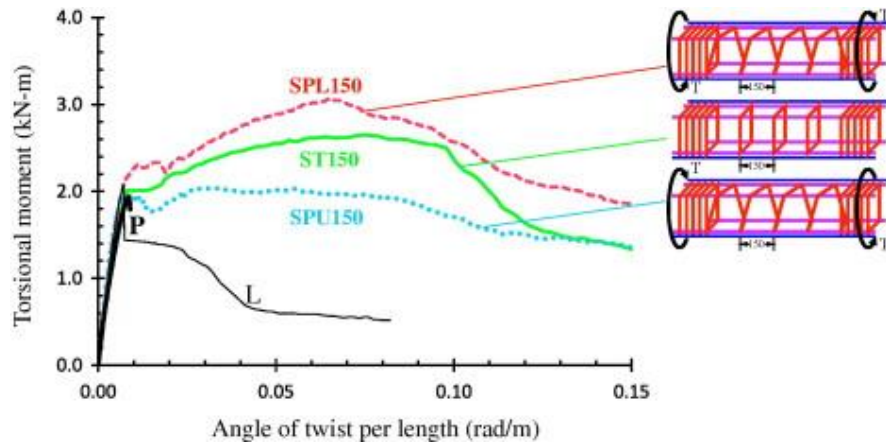


Şekil 2.63. Costantin ve Karayannis deney düzenegi (Chalioris and Karayannis 2013)

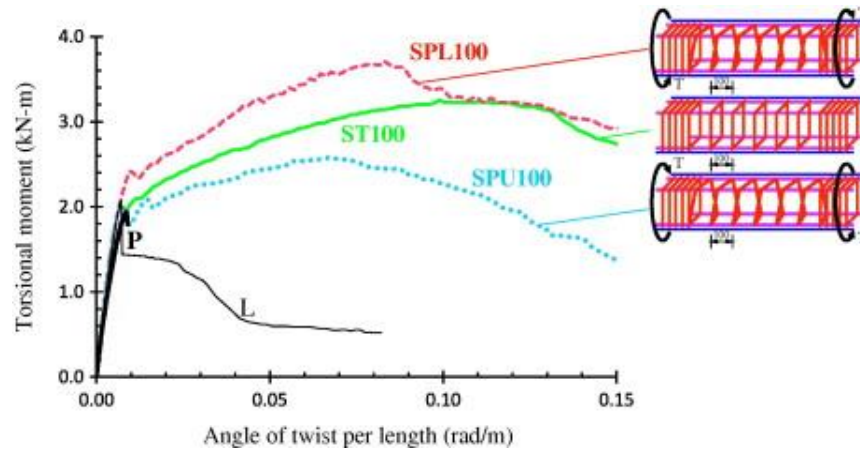
Deney sonunda elde edilen burulma momenti dönme açısı grafikleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 2.64. 200 kontrol grubu burulma-dönme açısı grafiği (Chalioris and Karayannis 2013)



Şekil 2.65. 150 kontrol grubu burulma-dönme açısı grafiği (Chalioris and Karayannis 2013)



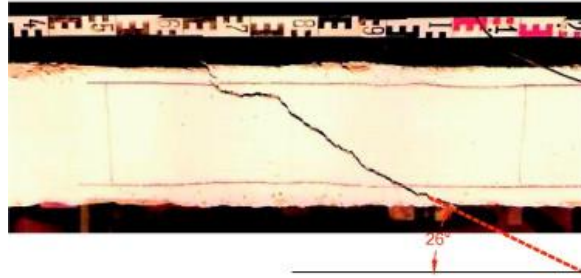
Şekil 2.66. 100 kontrol grubu burulma-dönme açısı grafiği (Chalioris and Karayannis 2013)

Kirişlerde meydana gelen çatlaklar aşağıdaki gibidir.

Deney sonuçları irdelendiği zaman burulma kirişin içine doğru olduğu zaman kolon kiriş birleşim bölgelerinde spiral elemanlar burulma momenti kapasitesini artırmıştır. Fakat burulma ters yönde uygulandığı zaman kirişin burulma momenti kapasitesi %19-23 arasında azalmaktadır.

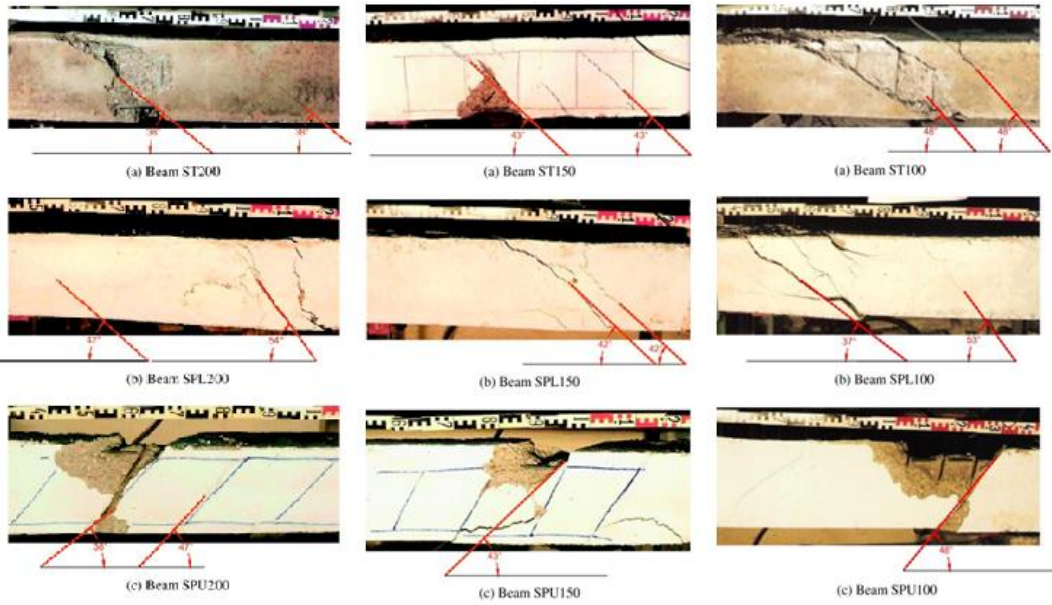


(a) Beam P



(b) Beam L

Şekil 2.67. Kontrol grubu kirişlerinde oluşan çatlaklar (Chalioris and Karayannis 2013)



Şekil 2.68. a) 200 grubu b) 150 grubu c) 100 grubu kirişlerinde oluşan çatlaklar (Chalioris and Karayannis 2013)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Betonarme kiriş elemanların burulma momenti etkisinde davranışlarının incelenmesini amaçlayan çalışmanın bu bölümünde deneylerde kullanılan malzemeler, kiriş numunelerin donatı detayı, deney elemanları, deney düzeneği, kiriş numuneleri tasarlanırken TS500-2000 ve Deprem Yönetmeliği 2007'ye uygunluğu ve kullanılan betonun sınıfı ve tipinin özellikleri verilmiştir.

3.1.1. Deneylerde kullanılan malzemeler

Betonarme kirişlerin burulma davranışını incelemek için betonarme kirişleri oluşturan donatı çeliğinin, normal betonu ve kendiliğinden yerleşen betonu oluşturan malzemelerin özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir. Bu nedenle kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

3.1.1.a. Çimento

Kalker, kil, demir cevheri, boksit vb. hammaddelerin uygun oranda karıştırılıp, öğütülerek pişirilmesi sonucu elde edilen klinkerin bir miktar priz düzenleyici ile birlikte öğütülmesi sonucu oluşan ve suyla karıştırıldığında belli bir süre sonra sertleşerek dayanım kazanan ürüne çimento denir.



Şekil 3.1. CEM I 42,5 R portland çimentosu

Beton karışımında kullanılan çimento Aşkale Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. tarafından üretilen CEM I 42,5 R portland çimentosudur. Kullanılan çimentoya ait mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikler aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Çizelge 3.1. CEM I 42,5 portland çimentosu kimyasal özellikleri

	Yüzde (%)	Standart
SO ₃	2,95	Mak. 3,5
SO ₂	18,11	--
Al ₂ O ₃	4,60	--
Fe ₂ O ₃	2,96	--
CaO	64,49	--
MgO	2,34	--
Na ₂ O	0,13	--
K ₂ O	0,66	--

Çizelge 3.2. CEM I 42.5 portland çimentosu fiziksel özellikleri

		Birim
Priz Başlangıcı	140	dk
Priz Sonu	208	dk
Özgül Ağırlığı	3,15	gr/cm ³
Hacim Genişlemesi	1,0	mm
Özgül Yüzey Alanı	3954	cm ² /gr
2 Günlük Dayanım	27,1	MPa
28 Günlük Dayanım	58,8	MPa

3.1.1.b. Agregalar

Betonun hacminin yaklaşık %60-70'ini oluşturan, mineral kökenli, taneli malzemelere agregalar denir. Agregalar doğal ve yapay olmak üzere iki gruba ayrılır. Betonun içerisinde yer alan agregalar; sert, dayanıklı, boşluksuz yapıda olmalı, donatının korozyona karşı korunmasını olumsuz yönde etkilememeli, çimentonun bileşenleri ile bir araya gelerek betonun dayanımını düşürecek zararlı bileşikler meydana getirmemeli. Ayrıca agregalar basınca karşı dayanıklı olmalı, yassı ve uzun taneler içermemeli, silt ve kilden oluşmamalı.

Agrega tane çapının (D_{max}) büyük olması betonda iri taneli malzemenin çok olduğu anlamına gelmektedir. Agregalar tane çapının büyük olmasının avantaj ve dezavantajları vardır. Agregalar tane çapının büyük olması su miktarının azalmasına sebep olur dolayısıyla da betonun mukavemetini artırır. Fakat tane çapının artması da betonun işlenebilirlik özelliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Dolayısıyla betonda kullanılacak agregalar tane çapının iyi seçilmesi gerekir.

Kendiliğinden yerleşen beton üretiminde ise kullanılan agregalar kübik veya küre şeklinde olmalıdır. Yassı ve uzun silindir şeklindeki agregalar kendiliğinden yerleşen betonun işlenebilirliğini olumsuz etkileyebileceği için tercih edilmemesinde fayda vardır. Kendiliğinden yerleşen betonda kullanılacak maksimum agregası 5-20 mm arasında olması uygun görülmektedir.

KYB için agreganın nem miktarı, su emmesi, gradasyon, ince malzeme çeşitliliği ve şekli çok önemlidir. Sabit kalitede KYB üretimi için agreganın bu özellikleri sürekli izlenmelidir. Tedarik kaynağının değiştirilmesi beton özelliklerinde önemli değişimlere neden olur. Yıkanmış agregası kullanmak genelde daha tutarlı bir ürün verir (Gürses 2008).

KYB de kullanılan agregalar için aşağıdaki öneriler dikkate alınmalıdır;

Silt ve kil kullanılmamalı

Maksimum agregası 12-20 mm arasında tercih edilmeli

KYB'nin geçme yeteneğini ve akışını etkileyen köşeli ve düzgün şekilli agregalar tercih edilmeli. Bu tür agregaların kullanılması içsel sürtünmeyi azalttığından dolayı daha fazla akışa neden olur.

Su emmesi düşük olan agregalar hidrasyon esnasında gerekli suyu daha az emecekleri için tercih edilmelidirler.

Bu çalışmada KYB üretimi için kullanılan agregalar Erzurum ili içerisinde Horasan çevresinde temin edilen 0-5 mm çaplı agregalar ve 5-15 mm çapındaki iri taneli agregalar olmak üzere iki grup kullanılmıştır.



Şekil 3.2. KYB üretiminde kullanılan 0-5 mm çaplı ince agrega



Şekil 3.3. KYB üretiminde kullanılan 5-15 mm çapındaki agrega

3.1.1.c. Silis dumanı

Silis dumanı, silisyum veya demir silisyum alaşımlarının ergime yöntemi ile elde edilen, ana bileşeni $1\ \mu\text{m}$ 'den küçük, küresel, amorf, camsı silis partiküllerinden oluşan, yüksek düzeyde puzolanik aktiviteye sahip bir üründür.

Silis dumanı, metallerin ya da silikonlu metallerin üretimi sırasında açığa çıkan gazın hızlı bir şekilde soğutulması sonucu elde edilir. Açığa çıkan bu gaz %90 civarında çok ince bir malzeme olan silis içeren amorf yapıdadır. Silis dumanının çok ince ve yüksek reaktivite özelliğine sahip olmasından dolayı betonun mukavemetini arttırmaktadır.

Beton içerisindeki malzemelerin çimento ile bağlanabilmesi için tüm yüzeylerinin ince bir su filmi ile çevrelenmiş olması gerekir. Beton içerisinde kullanılan malzemelerin tane boyutları ile betonun su ihtiyacı arasında ters bir orantı vardır. Beton içerisindeki malzemelerin tane boyutları azalması toplam yüzey alanını arttıracak ve dolayısıyla betonun su ihtiyacını arttıracaktır. Beton karışımındaki su miktarının artması, su/çimento oranını arttıracak ve betonun mukavemetini azaltacaktır. Bundan dolayı betondaki su/çimento oranını düzenlemek için süper akışkanlaştırıcılar kullanılmaktadır.

Ayrıca silis dumanının beton karışımında bulunması beton içinde bulunan alkalileri hızla bağlayacağından aktif silis içeren agregalarla muhtemel bir alkali-silika reaksiyonunu engelleyebilmektedir (Dinç 2007).

Yeni nesil süper akışkanlaştırıcı katkıların kullanımı KYB'nin ayrışma direncini olumsuz yönde etkileyecektir. Bu nedenle karışımlarda süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımından dolayı oluşacak ayrışmayı azaltmak için ince agrega ve/veya bağlayıcı miktarını artırma yoluna gidilmektedir. (Khayat and Guizani 1997). Betonda meydana gelebilecek ayrışmayı azaltmanın bir diğer yolu ise viskozite düzenleyici katkıları kullanmaktır. KYB'de viskozite artırıcı toz malzeme olarak uçucu kül, taş tozu, öğütülmüş yüksek fırın cürufu, silis dumanı kullanılabilir.

Bu çalışmada KYB üretimi için kullanılan silis dumanı Ankara İKSA Yapı Kimyasalları tesislerinde üretilmiştir.



Şekil 3.4. KYB üretimi için kullanılan silis dumanı

Silis dumanı küresel şekli ve çok ince olmasından dolayı iyi kohezyon ve gelişmiş ayrışma direnci özelliği sağlar. Ayrıca silis dumanı betondaki terlemeyi azaltır.

3.1.1.d. Süper akışkanlaştırıcı

Kimya ve polimer teknolojisindeki gelişmeler 1980’li yılların ortalarında çok etkili akışkanlaştırıcıların artık beton üretiminde kullanılmasına olanak sağlamıştır. Beton karışımında kullanılan bu akışkanlaştırıcılar taze betonun işlenebilirliğini arttırmaktadır. İşlenebilirliğin artmasıyla taze betonun yerleşmesi sırasında karşılaşılan zorlukları ortadan kaldırmaktadır (Felekoğlu 2003).

Betonun kolayca şekil değiştirebilmesi için kayma eşiğinin küçük olması gerekir. Bu özelliğin su miktarını artırarak sağlanması durumunda betonun kararlılığı bozulmakta ve ayrışma meydana gelmektedir (Uygunoğlu 2008).

Bu çalışmada KYB üretiminde, Draco firması tarafından üretilen TS 934-2 ve ASTM C-494 standartlarına uygun yeni nesil akışkanlaştırıcı kullanılmıştır.



Şekil 3.5. KYB üretimi için kullanılan yeni nesil akışkanlaştırıcı

3.1.1.e. Karışım suyu

KYB üretimi için kullanılan karışım suyu Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarında içme suyu şebekesinden alınmıştır.

3.1.1.f. Donatı çeliği

Bu çalışma kapsamında her bir numune için boyuna donatılar için çapı 16 mm, etriyeler için ise çapı 8 mm olan nervürlü inşaat demiri kullanılmıştır.



Şekil 3.6. $d=16$ mm ve $d=8$ mm nervürlü inşaat demiri

3.1.2. Deneylerde kullanılan aletler

3.1.2.a. Deney düzeneği

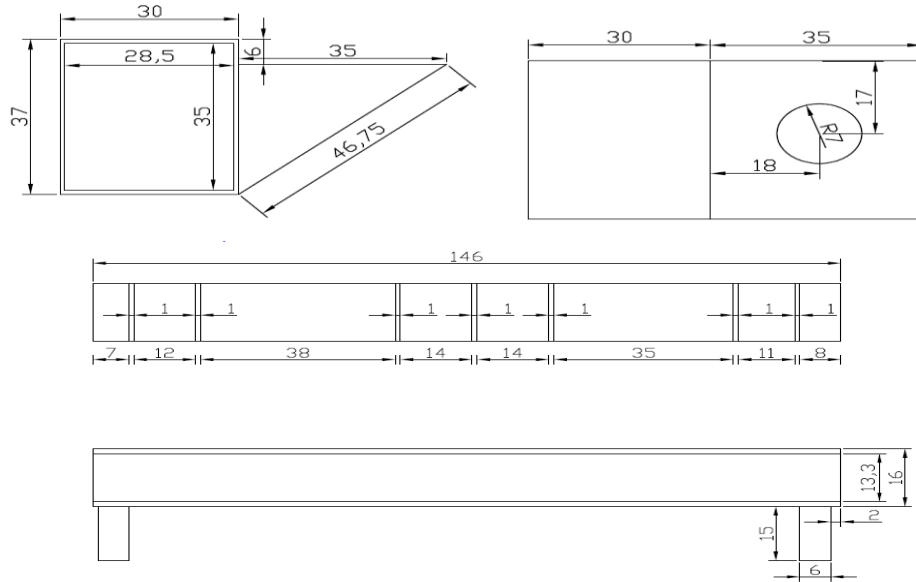
Deneylerde yük altında eğimleri ve deformasyonları ölçmek için üç adet LVDT numunenin sağ tarafına, üç adet LVDT ise numunenin sol tarafına bağlanmıştır. Deneylerde kullanılan LVDT'lerin deformasyon ölçüm aralığı 100-250 mm arasındadır. Ayrıca numunelerde birim deformasyonları ölçmek için her numunede iki adet strain gauge kullanılmıştır. Bu gerilme pulları ölçtüğü yük nedeniyle oluşan elastik bölgedeki fiziksel deformasyonu elektriksel sinyallere dönüştürerek veri toplama sistemi tarafından algılanmasını sağlar. Deneylerde kullanılan LVDT'ler ve strain gauge'ler Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Deney düzeneğinde kullanılan LVDT ve strain gauge

Deneylerde kullanılan yükleme hücresi TEDS markalı ve maksimum kapasitesi 250 kN'dur. Kullanılan pompa ABD üretimi Enerpac U10M modelidir. Kullanılan pompada hidrolik pistonu basabilmek için iki adet hortum sistemi bulunmaktadır. Deneylerde kullanılan hidrolik pistonun kapasitesi ise 22 tondur. Deneylerde kullanılan veri toplama cihazı Insturinet I420 ABD üretimidir ve 120 kanalı ve 13 portu mevcuttur. Portlara dirençler takılmaktadır ve ayrıca dirençler kablo vasıtasıyla verileri bilgisayara

aktarabilmektedir. Burulma testine tabi tutulacak kiriş numunelerinde burulma momenti oluşturmak için gerekli deney düzeneği hazırlanmıştır. Deney düzeneğinde kirişin sağ ve sol ucunda 30 cm derinliğinde içi boş kutu şeklinde iki adet çelik levhadan yapılmış kelepçe kullanılmıştır. Kirişler bu levhaların içlerine yerleştirilmiştir. Bu çelik levhaların üzerlerine ise çapraz şekilde 1460 mm uzunluğunda ve yedi adet berkitmesi bulunan HEB160 çelik profil konulmuştur. Bu profilin tam orta noktasına ise yük uygulanmıştır. Çapraz olarak konulan bu çelik profil sayesinde kirişlerin uç kısımlarında burulma momentleri meydana gelmiştir. Şekil 3.8’de deney düzeneğinin ayrıntılı çizimleri gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Deney düzeneği çizimleri



Şekil 3.9. Deney düzeneği kelepçeler ve profil

3.1.2.b. Numune kırma cihazı

Kiriş betonları dökülürken normal beton ve kendiliğinden yerleşen betondan üçer adet numune alınmıştır. Bu numunelerin 28 günlük basınç dayanımlarına bakılmıştır. Numunelerin 28 günlük basınç dayanımları Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarında bulunan kapasitesi 300 ton olan ELE marka Autotest 300 modeli pres makinesi ile ölçülmüştür.



Şekil 3.10. Pres makinesi

3.1.2.c. Betoniyer

Kiriş numunelerinin kendiliğinden yerleşen beton dökümü Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarında bulunan ve 25 devir/dakika karıştırma hızına sahip olan, 135° açı ile manevra yapabilen, 60 dm³ kapasiteli ELE marka betoniyer ile yapılmıştır.



Şekil 3.11. Betoniyer

3.1.2.d. Kalıplar

20 adet kiriş numunesinin dökülmesi için 25x30x150 cm genişliğinde ahşap kalıplar hazırlanmıştır.



Şekil 3.12. Ahşap kalıplar

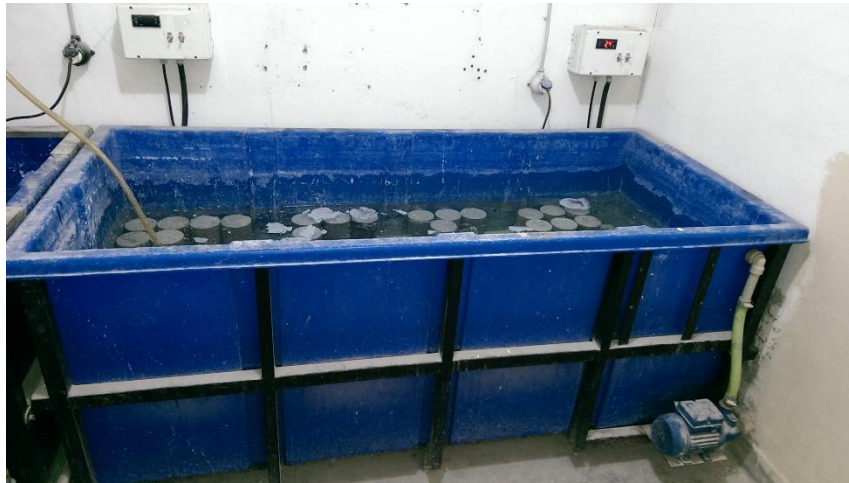
Kiriş numunelerine dökülen normal beton ve kendiliğinden yerleşen betonlardan 28 günlük basınç dayanımlarına bakmak için alınan örnekler 15x15x15cm plastikten imal edilmiş küp kalıplara konulmuştur.



Şekil 3.13. Küp kalıplar

3.1.2.e. Su kürü havuzu

Kiriş numenlerine dökülen betonlardan alınan örnekler 28 günlük süre ile Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarında bulunan kirece doymun, çevrim pompalı, sıcaklığı $23\pm2^{\circ}\text{C}$ 'de sabit tutan su kürü havuzuna konulmuştur.

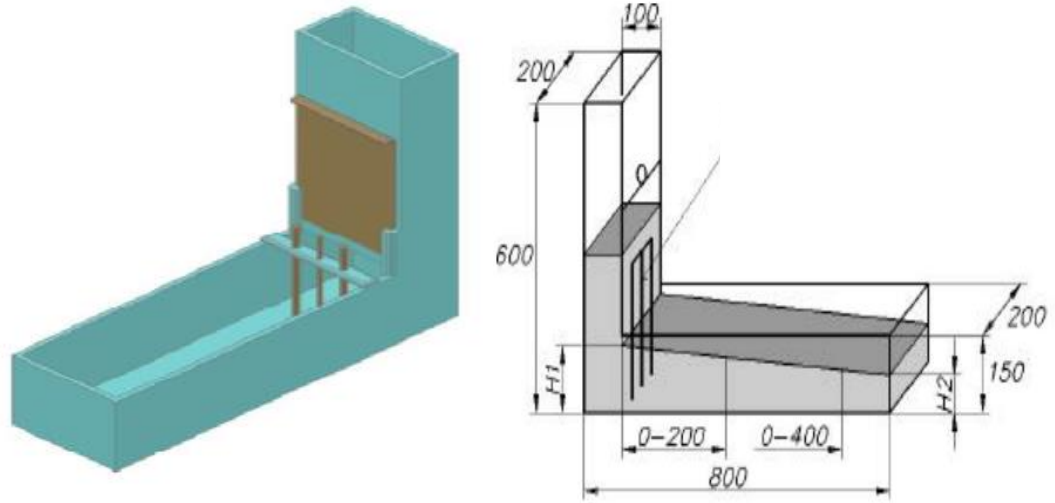


Şekil 3.14. Su kürü havuzu

3.1.2.f. KYB deneylerinde kullanılan aletler

1. L Kutusu deneyi aleti

Yapılan deneylerde, EFNARC (2002) standardına uygun çelikten yapılmış, alt kısmında üç çubuk ve sürgülü bir kapak bulunan deney aleti kullanılmıştır.



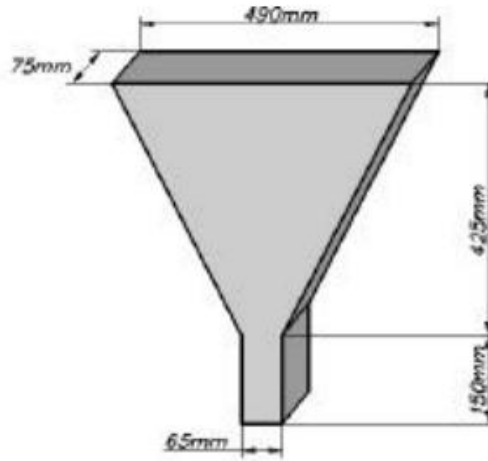
Şekil 3.15. L Kutusu deney aleti düzeneği



Şekil 3.16. L Kutusu deney aleti

2. V Hunisi deneyi aleti

Yapılan deneylerde 10 litre kapasiteli çelikten yapılmış deney düzeneği kullanılmıştır.



şekil 3.17. V Hunisi deney aleti

3. J Halkası deney aleti

Yapılan deneylerde standartlara uygun 50 cm çapına sahip yuvarlak çelikten yapılmış halka kullanılmıştır.



Şekil 3.18. J Halkası deney aleti

4. Çökme yayılma deney aleti

Yapılan deneylerde, alttaki dairenin çapı 20 cm, üstteki dairenin çapı 50 cm olan huni şeklinde çelikten yapılmış deney aleti kullanılmıştır.

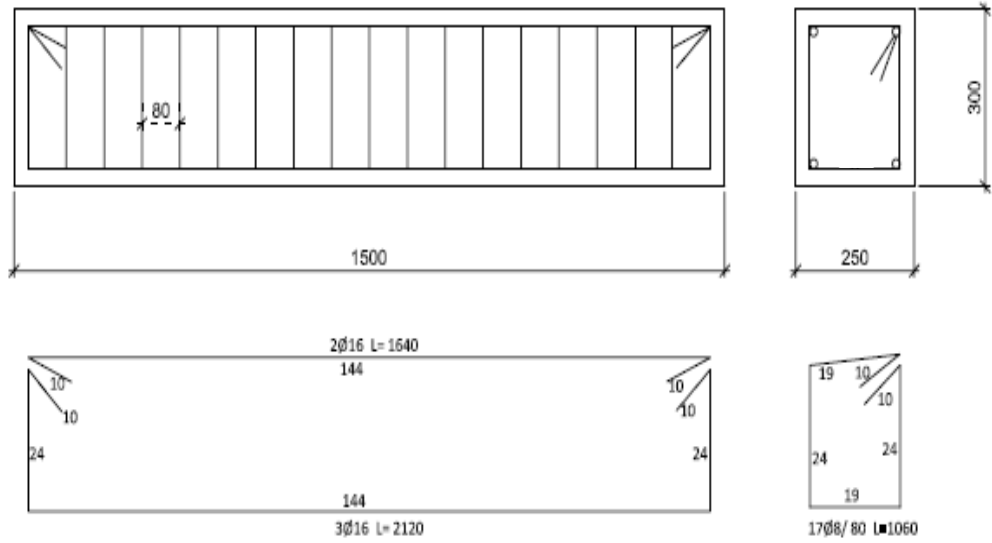


Şekil 3.19. Çökme yayılma deney aleti

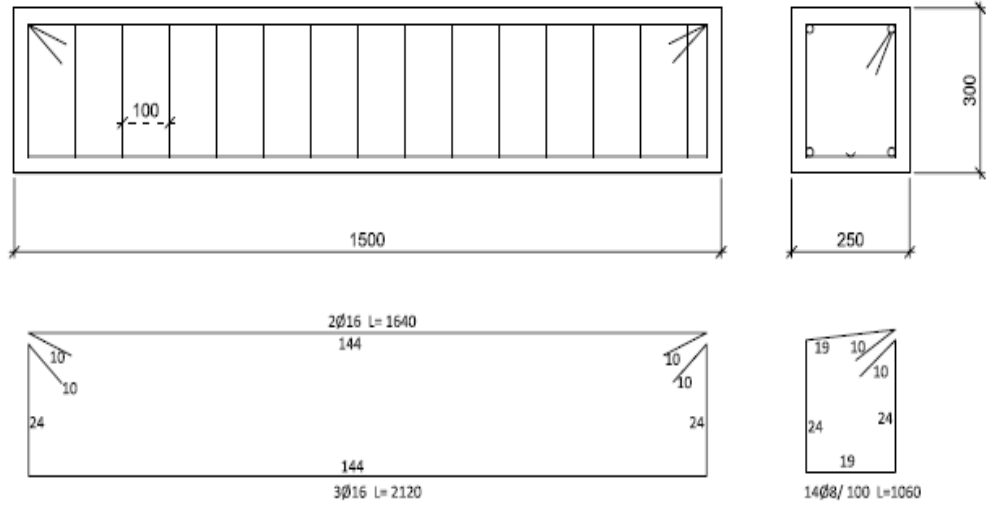
3.2. Yöntem

3.2.1. Numune boyutları

Deneye tabi tutulan kiriş numunelerinin kesit boyutları sabit tutulmuştur. Kirişlerin boyutları 25x30x150 cm olarak tasarlanmıştır. Numunelerde boyuna donatı olarak çapı 16 mm nervürlü inşaat demiri kullanılmıştır. Boyuna donatıların iki tanesi alt tarafta iki tanesi ise üstte olmak üzere toplamda dört adet boyuna donatı kullanılmıştır. Etriye olarak çapı 8 mm olan nervürlü inşaat demiri kullanılmıştır. Etriyeler 10 kiriş numunesinde 8 cm aralıkla, 10 kiriş numunesinde ise 10 cm aralıkla yerleştirilmiştir. Kiriş numunelerinde pas payı olarak ise 30 mm seçilmiştir.



Şekil 3.20. 8 cm Etriye aralıklı kiriş numune detayları



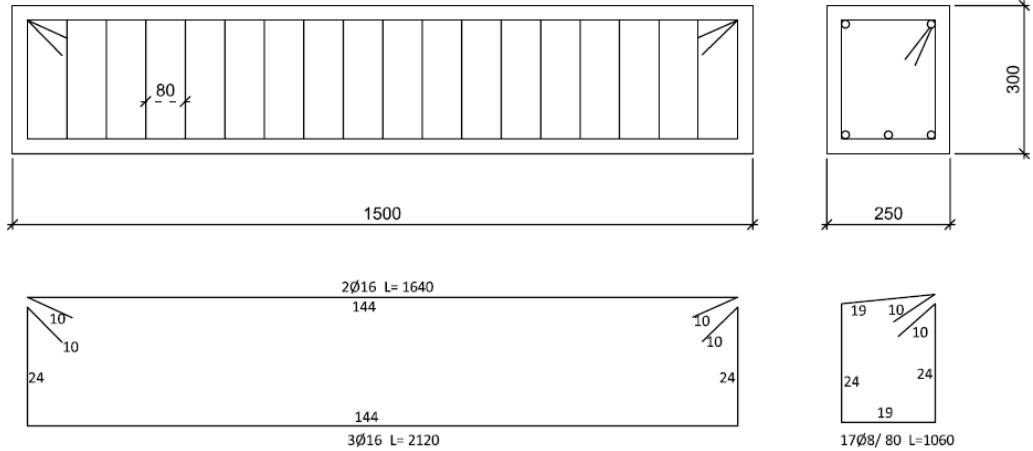
Şekil 3.21. 10 cm Etriye aralıklı kiriş numune detayları

3.2.2. Numune isimlendirilmesi

Deneye tabi tutulan kiriş numunelerinde, beton sınıfı, beton tipi ve etriye oranı olmak üzere üç parametre farklı tutulmuştur. Beton sınıfı olarak C20 ve C40; beton sınıfı olarak normal beton ve kendiliğinden yerleşen beton; etriye oranı olarak ise 8 cm ve 10 cm aralıklar tercih edilmiştir. Numunelerin bu özelliklerine göre isimlendirme yapılmıştır. Kiriş numunelerinin isimlendirilmesi aşağıdaki tabloda verilmiştir.

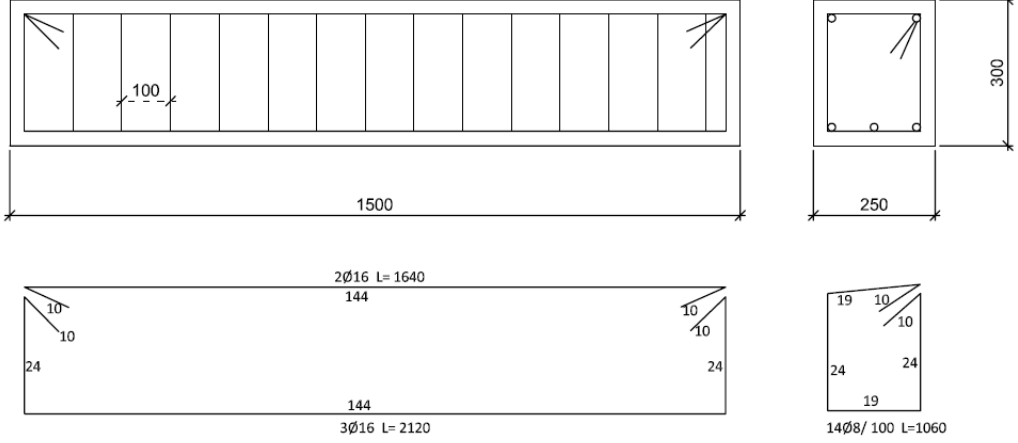
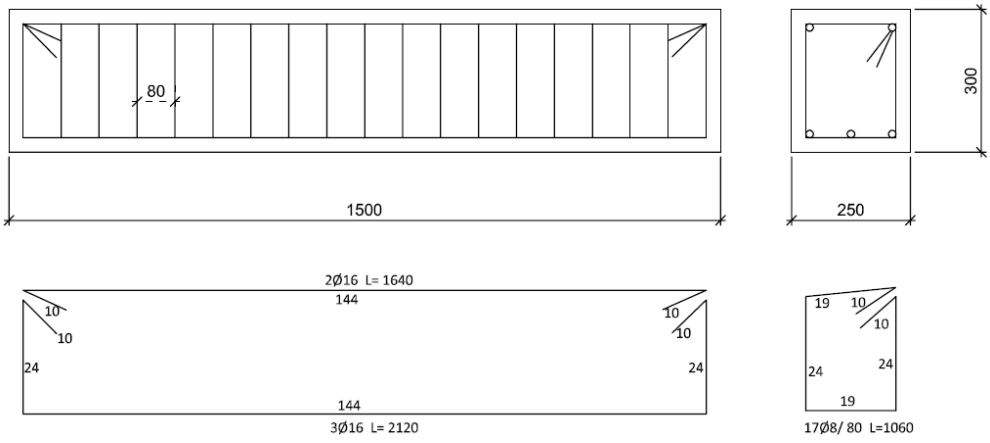
Çizelge 3.3. Kiriş numunelerinin isimlendirilmesi

KİRİŞİN ADI	NC2E8	
MONTAJ DONATISI	2Ø16	
ÇEKME DONATISI	2Ø16	
GÖVDE DONATISI	YOK	
ETRİYE ARALIĞI	80 mm	
BETON SINIFI	C20	
BETON TÜRÜ	NORMAL BETON	



KİRİŞİN ADI	NC2E10	
MONTAJ DONATISI	2Ø16	
ÇEKME DONATISI	2Ø16	
GÖVDE DONATISI	YOK	
ETRİYE ARALIĞI	100 mm	
BETON SINIFI	C20	
BETON TÜRÜ	NORMAL BETON	

Çizelge 3.3. (devam)

		
KİRİŞİN ADI	NC4E8	
MONTAJ DONATISI	2Ø16	
ÇEKME DONATISI	2Ø16	
GÖVDE DONATISI	YOK	
ETRİYE ARALIĞI	80 mm	
BETON SINIFI	C40	
BETON TÜRÜ	NORMAL BETON	
		
KİRİŞİN ADI	NC4E10	
MONTAJ DONATISI	2Ø16	
ÇEKME DONATISI	2Ø16	
GÖVDE DONATISI	YOK	
ETRİYE ARALIĞI	100 mm	
BETON SINIFI	C40	
BETON TÜRÜ	NORMAL BETON	

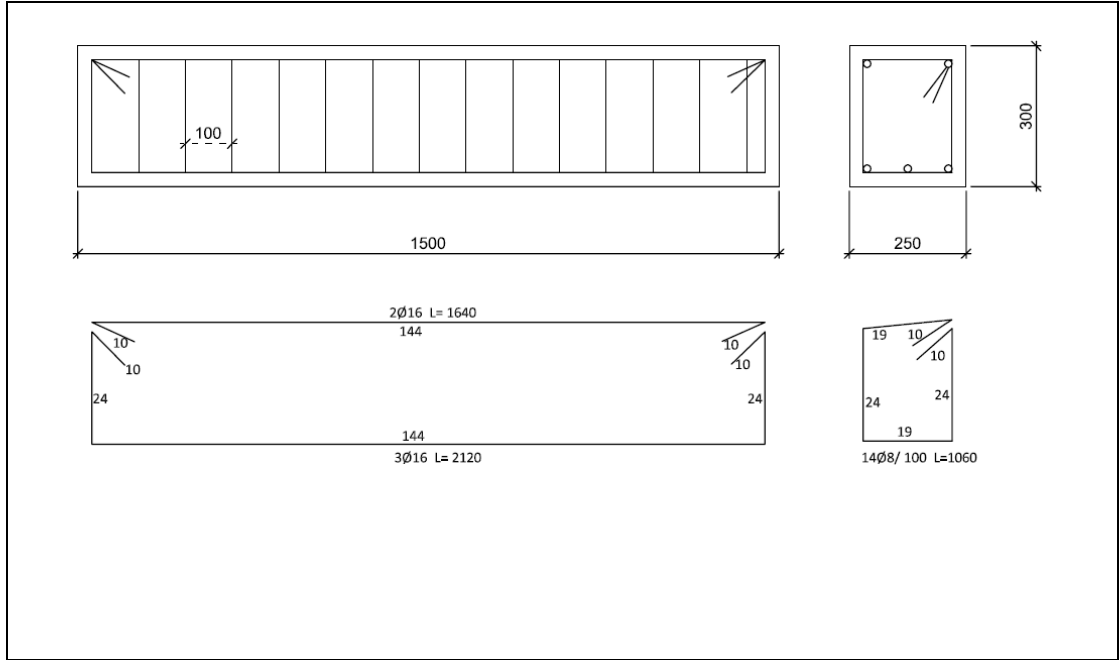
Çizelge 3.3. (devam)

--

Çizelge 3.3. (devam)

KİRİŞİN ADI	KC4E8	
MONTAJ DONATISI	2Ø16	
ÇEKME DONATISI	2Ø16	
GÖVDE DONATISI	YOK	
ETRİYE ARALIĞI	80 mm	
BETON SINIFI	C40	
BETON TÜRÜ	KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON	
KİRİŞİN ADI	KC4E10	
MONTAJ DONATISI	2Ø16	
ÇEKME DONATISI	2Ø16	
GÖVDE DONATISI	YOK	
ETRİYE ARALIĞI	100 mm	
BETON SINIFI	C40	
BETON TÜRÜ	KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETON	

Çizelge 3.3. (devam)



4. ARAŞTIRMA ve BULGULAR

Betonarme kiriş elemanların burulma altında davranışlarını incelemek için deney grupları beton tipi olarak normal beton ve kendiliğinden yerleşen beton, beton sınıfı olarak C20 ve C40, etriye oranı olarak da 8 cm ve 10 cm olmak üzere gruplara ayrılmıştır. Bu amaç doğrultusunda 20 adet 250x300x1500 mm ölçülerinde betonarme kiriş hazırlanılmıştır. Deney sonucunda elde edilen bulgular aşağıda verilmiştir.

4.1. Normal Beton Deneyleri

Betonarme kiriş elemanların burulma altında davranışını incelemek için toplam 12 adet normal beton sınıfına ait numune hazırlandı. 3 adet beton sınıfı C20 etriye oranı 80 mm, 3 adet beton sınıfı C20 etriye oranı 100 mm, 3 adet beton sınıfı C40 etriye oranı 80 mm ve 3 adet beton sınıfı C40 etriye oranı 100 mm olan kiriş numuneleri hazırlandı. Ahşap kalıplara oturtulan kiriş numunelerinin beton döküm işlemi gerçekleştirildi. Beton döküm işleminden sonra numunelerin kür işlemi yapıldı. 28 gün sonra kiriş numuneleri deneye tabi tutuldu. Aşağıdaki şekillerde beton döküm işlemi ve kür işlemi gerçekleştirilen kirişlerin resimleri görülmektedir.



Şekil 4.1. Kalıplarına oturtulmuş kiriş numuneleri



Şekil 4.2. Normal beton deneyleri için beton dökümü



Şekil 4.3. Kür işlemi

Normal beton deneyleri için kullanılan betondan beton dökümü sırasında C20 ve C40 beton sınıflarına ait 3 adet küp numune alınmıştır. Kullanılan beton sınıfını tayin etmek için alınan bu küp numuneler 28 gün sonra kırılmıştır. C20 beton sınıfına ait numunelerin 28 günlük basınç dayanımları 21 MPa, 22 MPa ve 22 MPa; C40 sınıfına ait numunelerin 28 günlük basınç dayanımları 38 MPa, 38MPa ve 40 MPa çıkmıştır. Bu sonuçlara göre de deneyler için seçilen hedef dayanım tutturulmuştur. Şekil 4.4’de

deney düzeneğine bağlanmış LVDT, strain gauge bağlanmış kiriş numunesi görülmektedir.



Şekil 4.4. Deney düzeneğine oturtulmuş kiriş numunesi

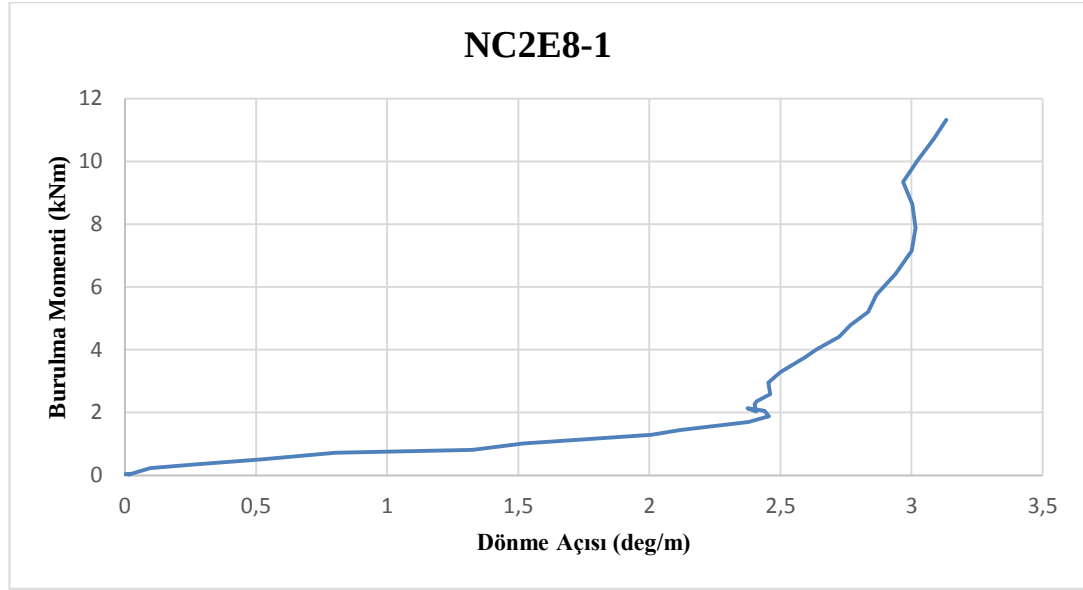
4.1.1. Burulma momenti birim dönme açısı arasındaki ilişkinin incelenmesi

Bu bölümde test numunelerinin burulma momenti-dönme açısı arasındaki ilişki incelenmiştir. Aşağıdaki grafiklerde test numunelerinin burulma momenti-dönme açısı arasındaki ilişki görülmektedir. Deneylerde yük altında eğimleri ve deformasyonları ölçmek için üç adet LVDT numunenin sağ tarafına, üç adet LVDT ise numunenin sol tarafına bağlanmıştır. Bu LVDT'ler yardımıyla kiriş numunelerinde meydana gelen dönme açıları hesaplanmıştır. LVDT'lerden okunan değerler Denklem 4.1'de yerine yazılarak numunelere ait dönme açıları deneysel olarak hesaplanmıştır.

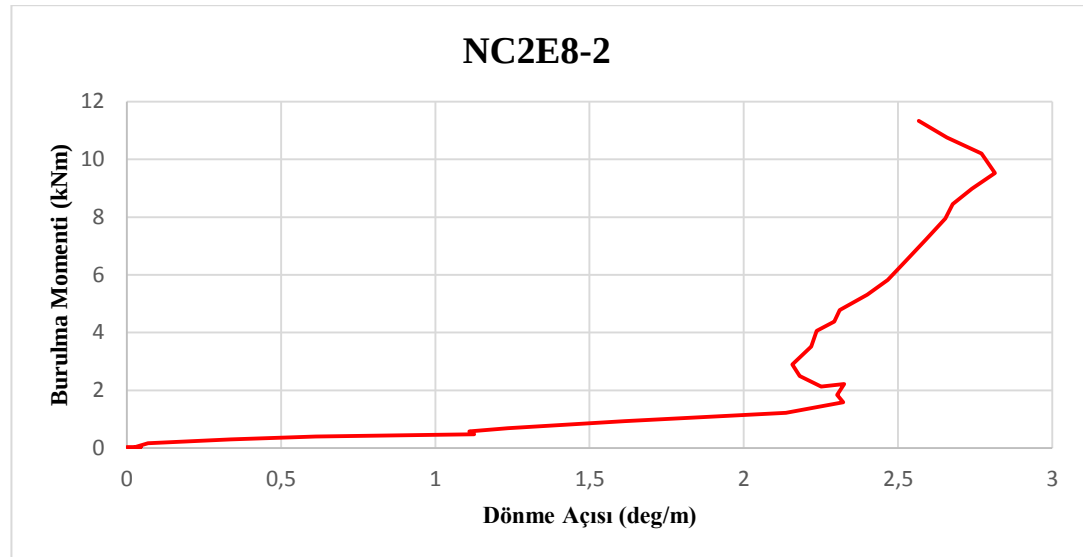
$$\theta = \frac{\arctan(\delta_{DT1} - \delta_{DT2} - \delta_I)}{L} \quad (4.1)$$

$$\delta_L = \frac{PL^3}{192EI} \quad (4.2)$$

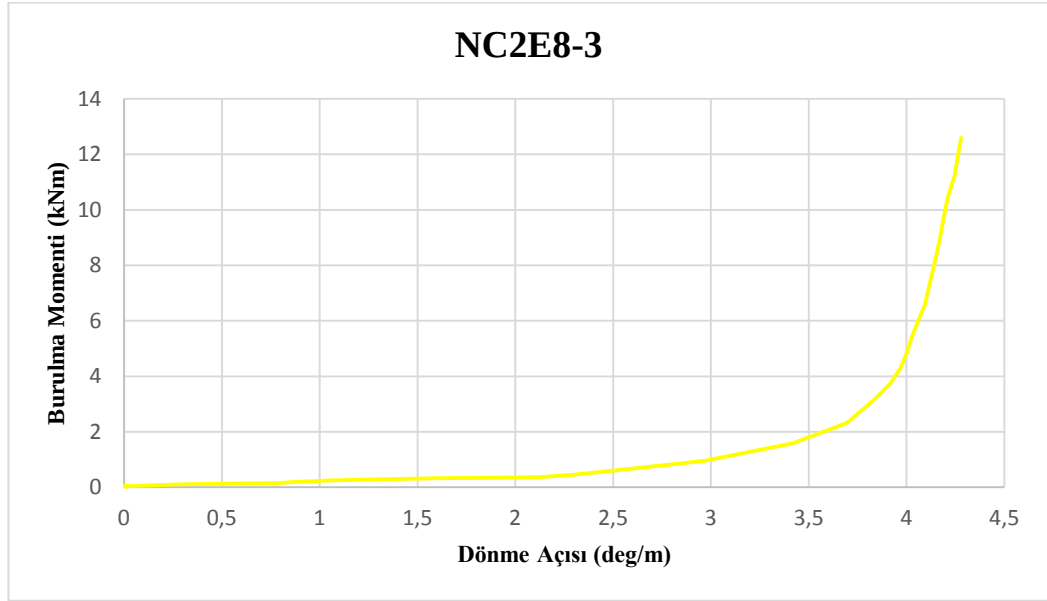
Burada, θ numunelerdeki dönme açısını, δ_{DT1} ve δ_{DT2} LVDT'lerden okunan değerleri, L kirişin toplam boyunu, P uygulanan yükü, E kirişin elastisite modülünü, I kirişin atalet momentini göstermektedir.



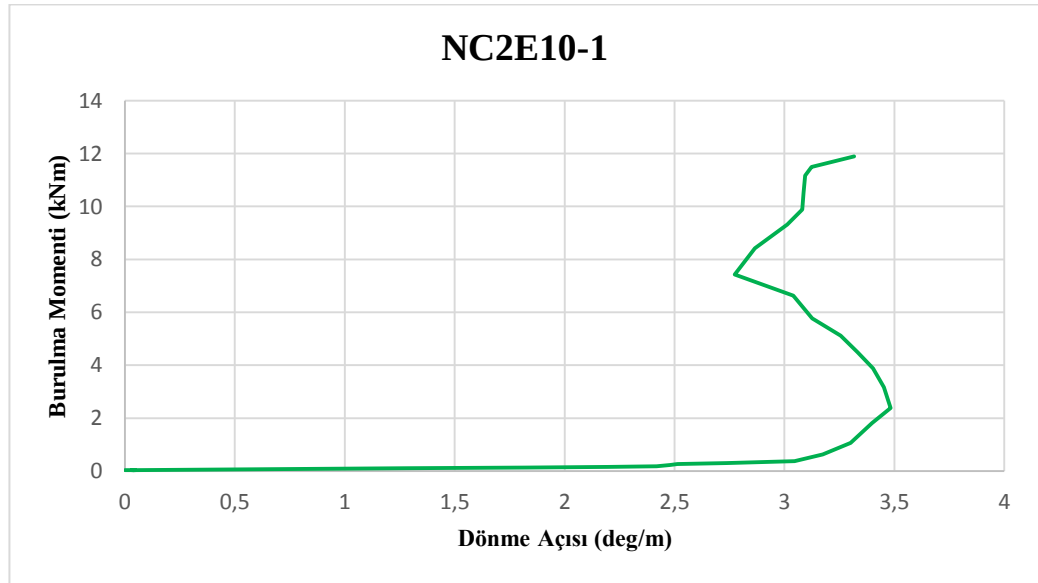
Şekil 4.5. NC2E8-1 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği



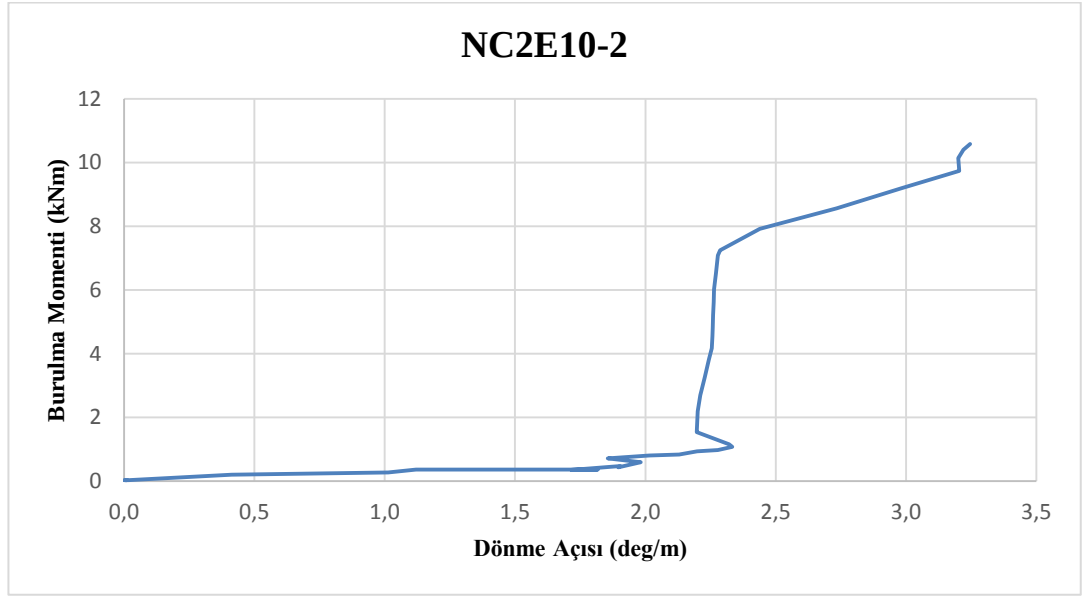
Şekil 4.6. NC2E8-2 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği



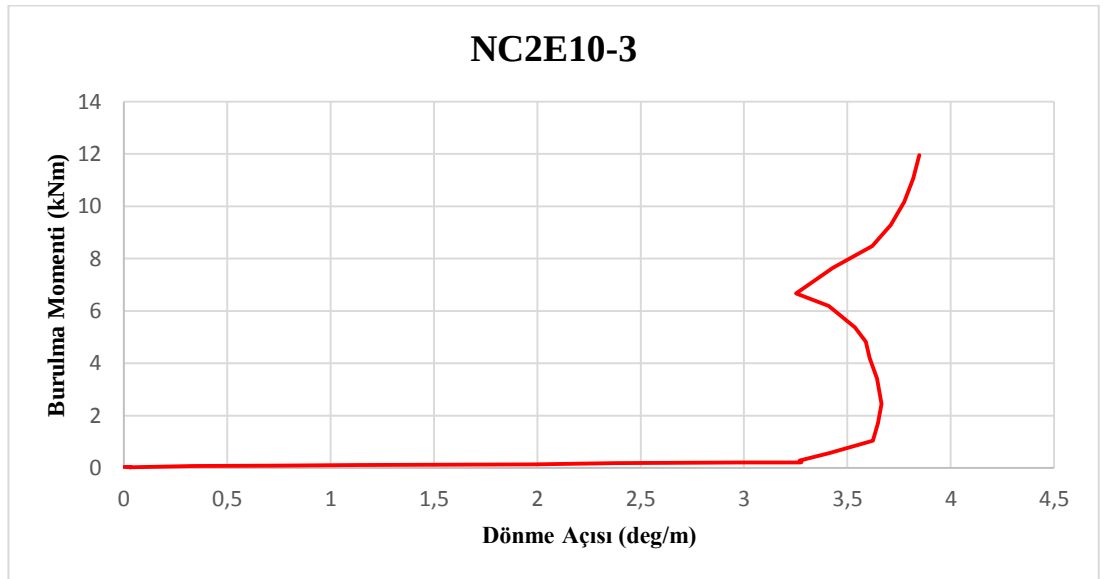
Şekil 4.7. NC2E8-3 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği



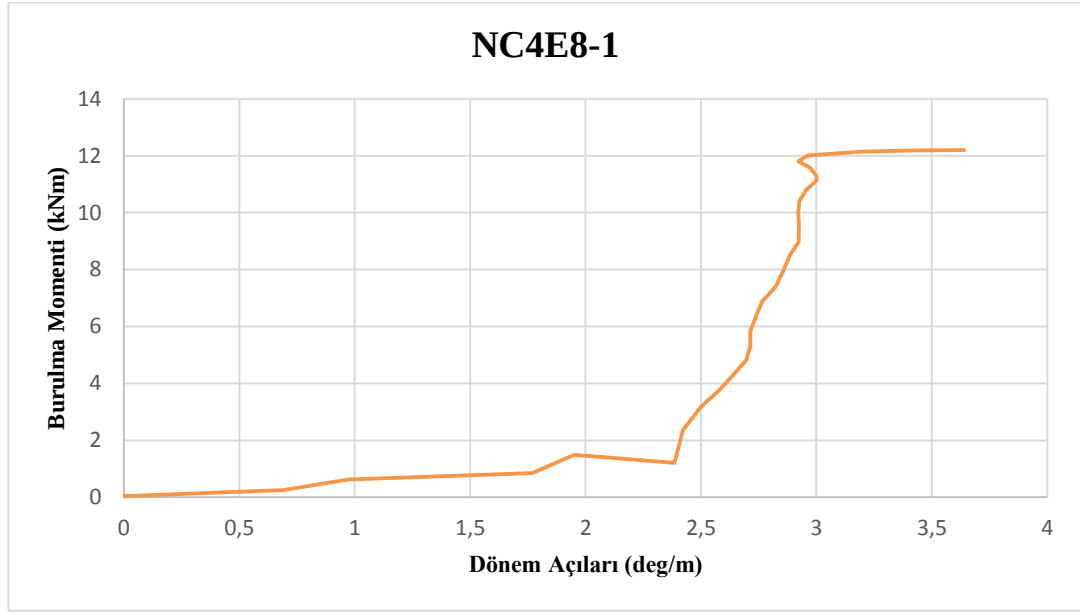
Şekil 4.8. NC2E10-1 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği



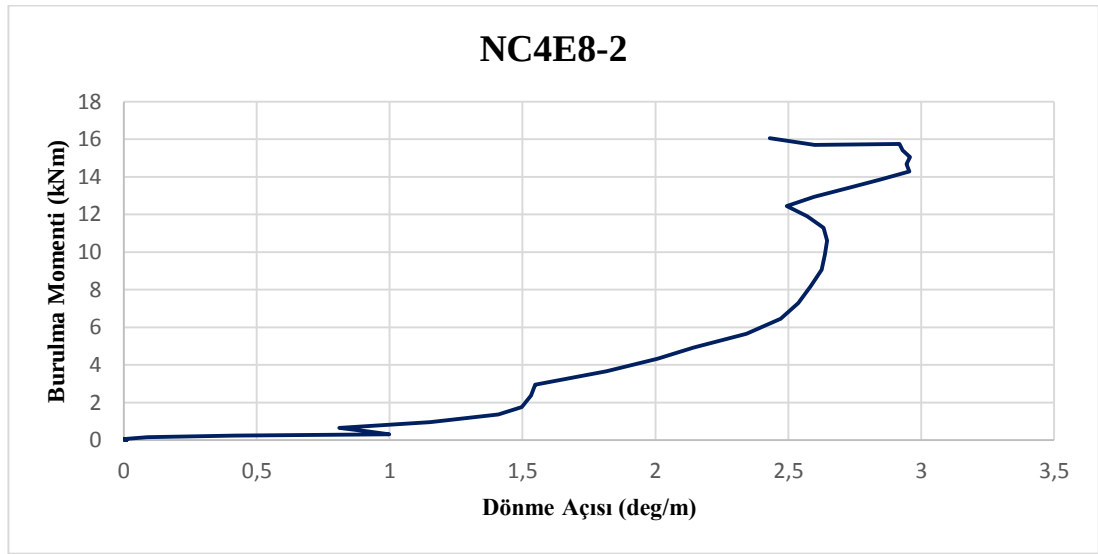
Şekil 4.9. NC2E10-2 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği



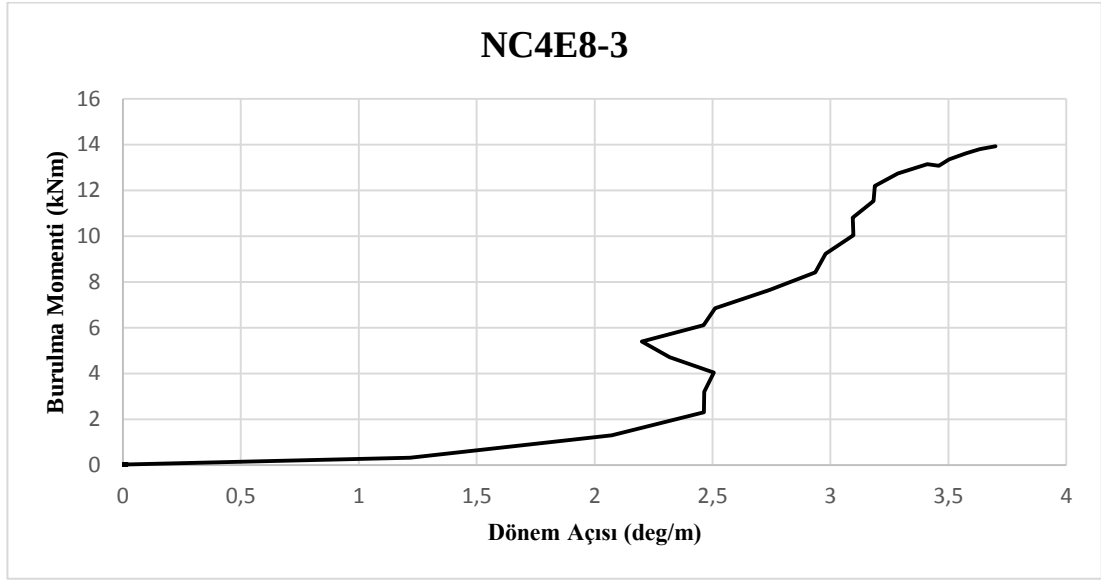
Şekil 4.10. NC2E10-3 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği



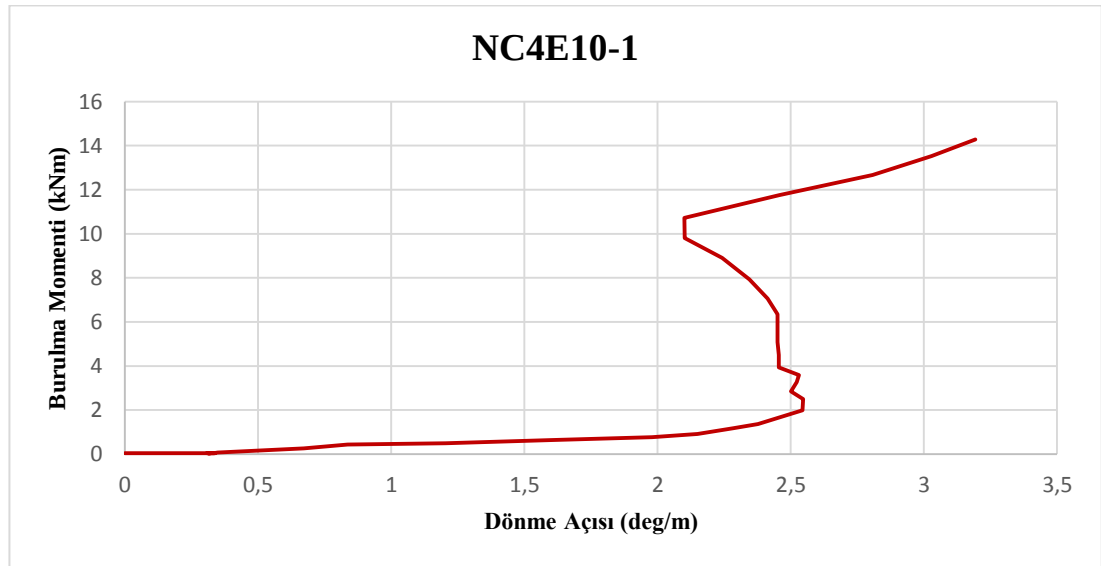
Şekil 4.11. NC4E8-1 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği



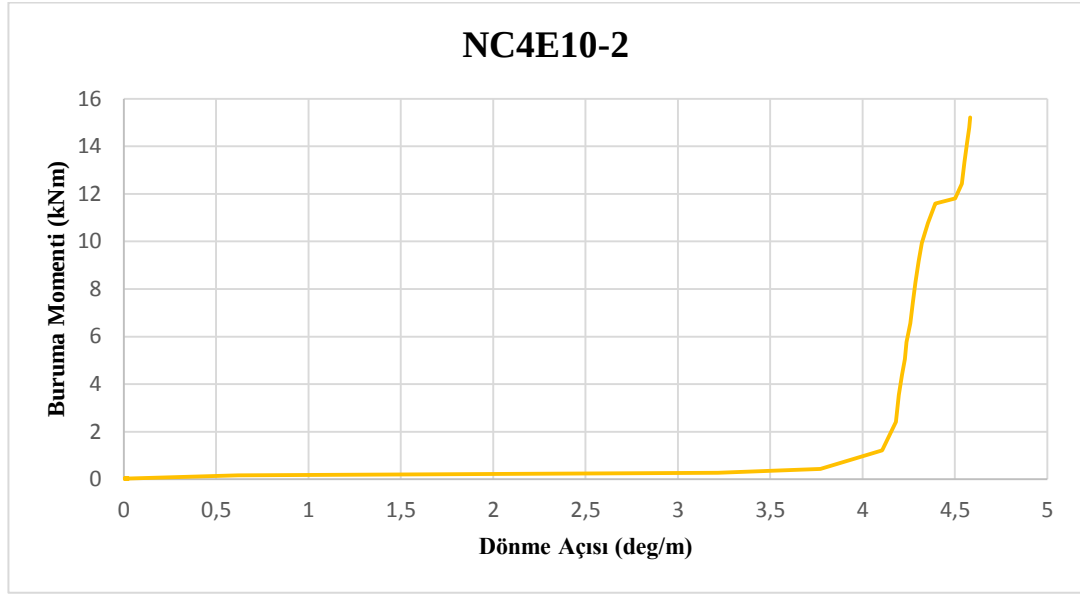
Şekil 4.12. NC4E8-2 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği



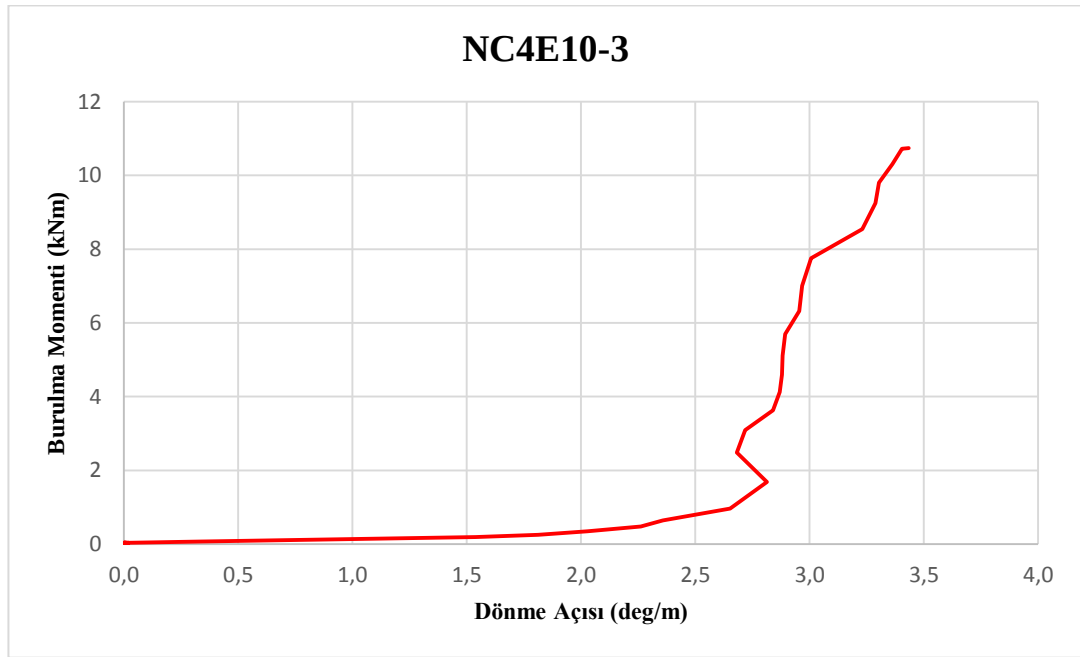
Şekil 4.13. NC4E8-3 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği



Şekil 4.14. NC4E10-1 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği



Şekil 4.15. NC4E10-2 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği



Şekil 4.16. NC4E10-3 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği

Grafiklere baktığımızda artan burulma momenti altında dönme açısı ilk başta lineer bir şekilde artmıştır. Daha sonra eğri lineerliğini kaybetmiştir ve nonlineer bir şekil almıştır. Burulma momenti dönme açısı grafiklerinin incelediğimiz zaman en büyük

burulma momenti değerine NC4E8-2 numunesinin ulaştığını görmekteyiz. Yine en büyük burulma momenti değerlerine NC2E8 serisinin ulaştığını görmekteyiz. En düşük burulma momenti değerlerinin ise NC2E10 serisine ait olduğunu görmekteyiz. Numuneleri karşılaştırdığımız zaman NC2 serisinin NC4 serisinden daha büyük değerlerde burulma açısı ve daha az burulma momenti taşıdığını görmekteyiz. Aynı şekilde etriye oranı 80 mm olan serilerin 100 mm olan serilere göre daha düşük değerlerde burulma açısı ve daha fazla burulma momenti karşıladığını söyleyebiliriz. Dolayısıyla burulma momenti ve burulma açısı ile beton sınıfı ve etriye oranı arasında bir ilişkinin olduğunu bu çalışma kapsamında görmekteyiz. Beton sınıfı yüksek olan numunelerin daha fazla burulma momenti karşıladığını ve daha düşük değerlerde dönme eylemi gerçekleştirdiğini söyleyebiliriz. Etriye oranını düşük tutmanın burula momenti üzerinde olumlu bir etkisi olduğunu söyleyebiliriz. Benzer şekilde etriye oranı düşük olan seriler daha az değerlerde dönme eylemi göstermişlerdir. Kamiński and Pawlak (2011)'de yapmış oldukları çalışmada sadece burulma momenti (pure torsion) uyguladıkları kiriş elemanlarda burulma momenti ve dönme açısı arasında bu çalışmadakine benzer veriler elde etmişlerdir. Kamiński and Pawlak (2011) çalışmalarında kiriş kesitlerinin burulma momenti-dönme açısı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu çalışma da ise etriye oranı ve beton sınıfının burulma momenti-dönme açısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Burulmaya maruz betonarme bir kirişte mukavemetin yanı sıra aranan önemli bir özellik de düktil davranıştır. Düktil davranıştan kasıt, burulma çatlaması oluşuktan sonra kirişin ani ve gevrek bir şekilde kırılmaması, taşınan burulma momentinde bir azalma olmadan deformasyonların artabilmesidir. Yapılan deneyler düktil davranışın kayma donatısının bir fonksiyonu olduğunu kanıtlamıştır. Bu durumda düktil davranışı sağlamak için kirişte bulunması gereken en az kayma donatısının belirlenmesi gerekir. Davranış anlatılırken, çatlamaya kadar donatının etkili olmadığı, çatlamadan sonra ise beton katkısının ihmal edilecek kadar azdır. O halde amaç, çatlak oluşuktan sonraki mukavemetin en az çatlak öncesi kadar olmasını sağlamaktır. Bu da çelikten bağımsız çatlama mukavemetini, donatının mukavemetine eşitlemekle elde edilir. Burulma momenti dönme açısı grafiklerine baktığımız zaman grafiklerin altında kalan alan bize

düktil davranış hakkında bilgi vermektedir. Burulma momenti dönme açısı grafiklerinde grafiğin altında kalan alan ne kadar büyük ise düktil davranışta o kadar iyidir diyebiliriz. Yani grafiğin altında kalan alanın büyük olması o numunede burulma çatlakları meydana geldikten sonra kırılmanın sünek bir şekilde gerçekleştiğini gösterir. Bu da bize betonarme elemanlarda istediğimiz kırılma şeklinin gerçekleştiğini gösterir. Deney grafiklerine baktığımız zaman NC4E8 serisinin burulma momenti dönme açısı grafiklerinin altında kalan alanların daha fazla olduğunu görmekteyiz. Yani bu seriye ait numunelerde meydana gelen kırılma diğer numunelere göre daha gevrek bir şekilde gerçekleşmiştir. Deneylerden elde edilen grafiklerden yola çıkarsak beton sınıfını yüksek tutmanın ve etriye oranını ise düşük tutmanın düktil davranış üzerinde olumlu bir etkisinin olduğunu söyleyebiliriz. Buda bize inşaat mühendisliğinin başlıca problemlerinden biri olan deprem anındaki betonarme elemanların davranışı hakkında yardımcı olacaktır. Yani bir deprem anında, daha yüksek beton sınıfı ve daha düşük etriye oranı kullanmak yapıda eğer göçme meydana gelecekse, göçme olayı olmadan betonarme kiriş eleman daha fazla direnecektir ani bir şekilde kırılmayacaktır.

4.1.2. Standartlarla burulma momentinin incelenmesi

Bu bölümde deney sonuçlarının standartlarla karşılaştırılması yapılmıştır. Bu amaçla ACI, Eurocode-2 ve Türk Standartları (TS500-2000) olmak üzere üç farklı standart ele alınmıştır. Burulma momenti ACI şartnamesine göre aşağıdaki formülden hesaplanmıştır.

$$T_{ACI} = f_{ys}(A_{sw}/s)2A_o \cot\theta \quad (4.3)$$

Burada f_{ys} çeliğin akma dayanımını, A_{sw} etriye alanını, A_o ise $0,85A_{oh}$ formülünden hesaplanır ve A_{oh} merkezi boyuna donatıların ortası olan kesitin alanını göstermektedir.

Eurocode-2'ye göre burulma momenti;

$$T_{EU} = 2A_k \sqrt{\frac{A_{sw}f_{ywd}}{s}} \sqrt{\frac{A_{sl}f_{yld}}{u_k}} \quad (4.4)$$

Burada A_k merkezi boyuna donatıların ortası olan kesitin alanını, f_{ywd} etriye için kullanılan çeliğin akma dayanımı, s etriye aralığını, A_{sl} boyuna donatı alanını f_{yld} boyuna donatı olarak kullanılan çeliğin akma dayanımı u_k A_k 'nın çevresini ifade etmektedir.

Türk Standartları'nda burulma;

$$T_{TS500-2000} = \frac{A_{sw}2A_kf_{ywd}}{s} \quad (4.5)$$

Çizelge 4.1'de teorik olarak hesaplanan ve deneyler sonucu ölçülen burulma momenti değerleri görülmektedir. Deneysel burulma momenti kapasitesi hesaplanırken deney sırasında pompa ile yükleme yapıldı ve kirişte çatlaklar oluştuğundan sonra ki nihai yük not edildi. Daha sonra bu yük deney düzeneğindeki profilin yarı uzunluğu ile (0,76 m) ile çarpıldı ve deneysel burulma momenti kapasitesi hesaplandı.

Çizelge 4.1. Deneysel burulma momenti kapasitesinin standartlarla karşılaştırılması (kNm)

	T_{EU}	T_{ACI}	$T_{TS500-2000}$	$T_{DENEYSEL}$
NC2E8-1	6,68	9,30	10,94	11,20
NC2E8-2	6,68	9,30	10,94	11,33
NC2E8-3	6,68	9,30	10,94	12,60
NC2E10-1	5,97	7,44	8,75	11,90
NC2E10-2	5,97	7,44	8,75	10,60
NC2E10-3	5,97	7,44	8,75	11,90
NC4E8-1	6,68	9,30	10,94	12,18
NC4E8-2	6,68	9,30	10,94	16,10
NC4E8-3	6,68	9,30	10,94	13,92
NC4E10-1	5,97	7,44	8,75	14,20
NC4E10-2	5,97	7,44	8,75	15,20
NC4E10-3	5,97	7,44	8,75	10,74

Çizelge 4.1 göstermektedir ki, deneysel sonuçlar teorik değerlerden hemen hemen her numunede daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni numunelerde kullanılan donatı oranı standartlarda belirtilen orandan daha yüksek kullanılmasıdır. TS500-2000 standardına göre hesaplanan değerler diğerlerinden daha yüksektir. Deneysel sonuçlara en yakın değerler TS500-2000 standardına göre hesaplanan değerlerdir. Bunun nedeni ise kiriş numunelerinde donatılendirma ve boyutlandırma yapılırken Türk Standartları temel alınmış olmasıdır. Standartlara göre hesaplanan değerlerin bir birinden farklı sonuçlar vermesi gibi bir problemle karşılaşmıştır. Bu çalışmadaki sonuçlar bu problemle karşılaşan mühendisler fayda sağlaması amacıyla da yapılmıştır.

Çizelge 4.1’de teorik olarak hesaplanan burulma momenti değerlerinin deneysel olarak elde edilen değerlerden farklı çıkmasının bir sebebi de basit burulma akademik bir konu olarak kabul edilmektedir ve deneysel çalışma boyunca da numunelere burulma momenti tek başına etki ettirilmiştir. Fakat ACI şartnamesine göre kesme, burulma ve eğilme zorlamaları birlikte etki ettiği kabul edilir.

4.1.3. Teorilerle burulma momentinin incelenmesi

Bu bölümde deneysel olarak elde edilen burulma momenti kapasitesinin elastik, plastik ve yanal eğime teorileri ile karşılaştırılması yapılmıştır. Bu doğrultuda elastik teori ile burulma momenti kapasitesi hesaplanırken Denklem 4.6 kullanıldı.

$$T_e = \alpha x^2 y f_{ctk} \quad (4.6)$$

Burada, α Saint-Verne sabiti ve Çizelge 4.1’den hesaplanabilir, x ve y sırasıyla kirişin yatay ve düşey uzunlukları f_{ctk} ise betonun karakteristik çekme dayanımı ifade eder.

Plastik teori ile burulma momenti hesaplanırken Denklem 4.7 kullanıldı.

$$T_p = \alpha_p x^2 y f_{ctk} \quad (4.7)$$

$$\alpha_p = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{6} \frac{x}{y} \right) \quad (4.8)$$

Burada, α_p plastik teori sabitini ifade eder.

Yanal eğilme teorisine göre burulma hesabı;

$$T_{sb} = \frac{x^2 y}{3} f_{cts} \quad (4.9)$$

formülünden hesaplanabilir. f_{cts} betonun yarmada çekme dayanımını göstermektedir.

Çizelge 4.2’de elastik, plastik ve yanal eğilme teorilerine göre hesaplanan burulma momenti kapasiteleri ile deneysel olarak elde edilen değerler verilmiştir.

Çizelge 4.2. Elastik plastik ve yanal eğilme teorileri ile deneysel burulma momenti kapasitesinin karşılaştırılması (kNm)

KİRİŞ ADI	Elastik Teori Burulma Değerleri	Plastik Teori Burulma Değerleri	Yanal Eğilme Teorisi Burulma Değerleri	Deneysel Burulma Momenti Kapasitesi T_u	Ortalama Burulma Değerleri
NC2E8-1	6,51	10,83	12,5	11,20	11,71
NC2E8-2	6,51	10,83	12,5	11,33	
NC2E8-3	6,51	10,83	12,5	12,60	
NC2E10-1	6,51	10,83	12,5	11,90	11,47
NC2E10-2	6,51	10,83	12,5	10,60	
NC2E10-3	6,51	10,83	12,5	11,90	
NC4E8-1	8,95	14,89	17,2	12,18	14,07
NC4E8-2	8,95	14,89	17,2	16,10	
NC4E8-3	8,95	14,89	17,2	13,92	
NC4E10-1	8,95	14,89	17,2	14,20	13,38
NC4E10-2	8,95	14,89	17,2	15,20	
NC4E10-3	8,95	14,89	17,2	10,74	

Deneysel sonuçlar plastik teori ile hesaplanan burulma momenti değerlerinin altında, elastik teori ile hesaplanan burulma momenti değerlerinin ise üstünde çıkmıştır. Her iki teoride de göçmenin maksimum çekme gerilmelerinin, betonun çekme dayanımına (f_{ctk}) ulaştığı anda olduğu kabul edilir. Plastik teoriye göre bütün kesitin plastik davranış gösterdiği ve kayma gerilmelerinin kesitin her noktasında aynı olduğu kabul edilir. Ayrıca plastik teoriyle burulma momenti hesabında, kiriş göçme anında plastik davranış gösterir fakat burulmadan meydana gelen göçme olayı tam olarak plastik değildir. Bundan dolayı deneysel sonuçlar ile plastik teori ile hesaplanan burulma momenti değerlerinin altında kalmıştır. Elastik teoride ise en büyük kayma gerilmeleri uzun kenarın orta noktasında meydana gelmektedir. Betonun davranışı ne tam elastik ne de tam plastik olmadığından, elastik teori burulma kapasitesinin altında plastik teori ise burulma kapasitesinin üzerinde sonuçlar vermiştir. Bu nedenle burulma etkisindeki beton veya betonarme elemanlarda kırılma mekanizmasının yeniden gözden geçirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmanın amaçlarından bir tanesi de bu teoriler arasındaki farkı göstermektir ve mühendislere fikir vermektir. Bazı araştırmacılar basit burulma etkisindeki beton kirişlerin kırılmasına eğilme momentinin neden olduğunu ileri sürmüşlerdir. Bu teoriye göre beton elemandaki ilk çatlama kirisin büyük yan yüzlerinden birinde kiriş eksenine 45 derecelik bir açı ile baslar. Sonra çatlak alt ve üst yüzlere diyagonal olarak uzanır. Sonra dördüncü yüzde mevcut çatlak uçlarını birleştiren doğru üzerinde betonun aniden kırılmasıyla beton eleman kırılır. Gerçeğe en yakın değerler ise yanal eğilme teorisinde elde edilmiştir.

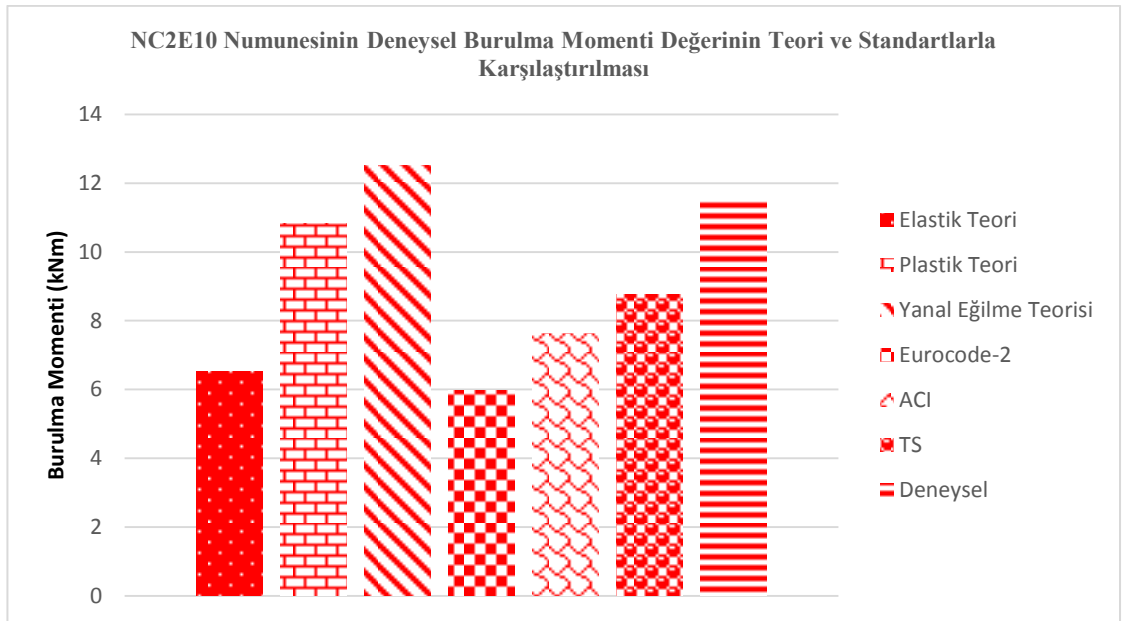
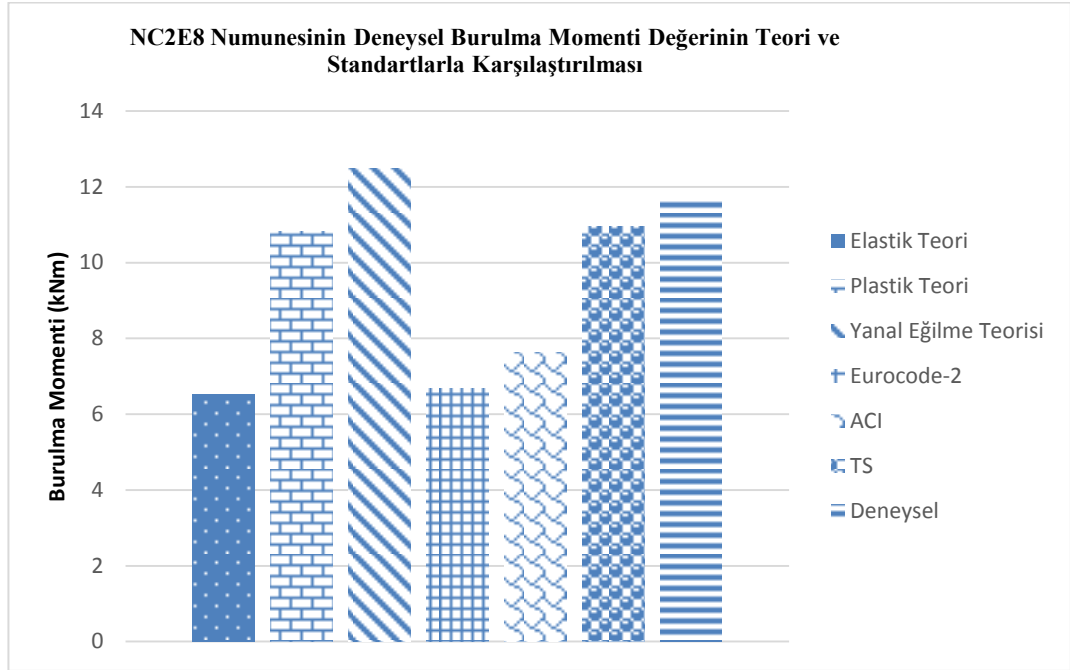
Çizelge 4.2'deki değerler, etriye oranı ile numunelerde burulma momenti kapasitesi (T_u) değeri ile orantılı olduğunu göstermektedir. Etriye oranı daha az olan kiriş numuneleri daha büyük değerlerde kırılmıştır. Yani etriye oranı az tutmak kirişin burulma momenti kapasitesini artırmaktadır. Csikós and Hegedűs (1998b) yapmış oldukları çalışmalarda etriye oranının burulma momenti üzerinde etkili olduğunu göstermişlerdir. Csikós and Hegedűs (1998b) çalışmasında etriye aralığı daha kısa olan numunelerin daha fazla burulma momenti karşıladıklarını görülmektedir. Bu çalışmanın Csikós and Hegedűs (1998b)'un çalışmasından farklı yanı ise etriye aralıkları bu çalışmada bir birine daha yakın değerler seçilmiştir. Ek olarak etriye donatıları ve boyuna donatılar daha büyük

çapta kullanılmıştır. Bu donatıların ve kesit boyutlarının seçiminde Türk Standartları'na uygun olması göz önünde bulundurulmuştur. Böylece Türkiye'de yapılacak betonarme binalarda burulma çatlaklarının önlenmesi bu çalışmanın amaçlarından bir tanesidir. Etriye oranı az olan numunelerin daha fazla burulma momenti karşılamalarının sebebi etriye aralığı az olan numunelerde etriyeler boyuna donatılara daha iyi bir şekilde sargı görevi görmüşlerdir. Dolayısıyla beton numune üzerine gelen kesme kuvvetlerini daha iyi karşılamıştır. Burulma momentinin de kesme kuvvetinden kaynaklandığını düşünürsek etriye aralığı az olan numunelerin daha yüksek burulma momenti değerlerine çıkması normaldir. Ayrıca etriye aralığının az olması numunelerde daha fazla plastik şekil değiştirme özelliği kazandırmıştır ve dolayısıyla elemanların sünekliliğini artırmıştır. Bir diğer husus ise burulma çatlakları oluşuktan sonra, kiriş burulma rijitliği büyük çapta azalmaktadır.

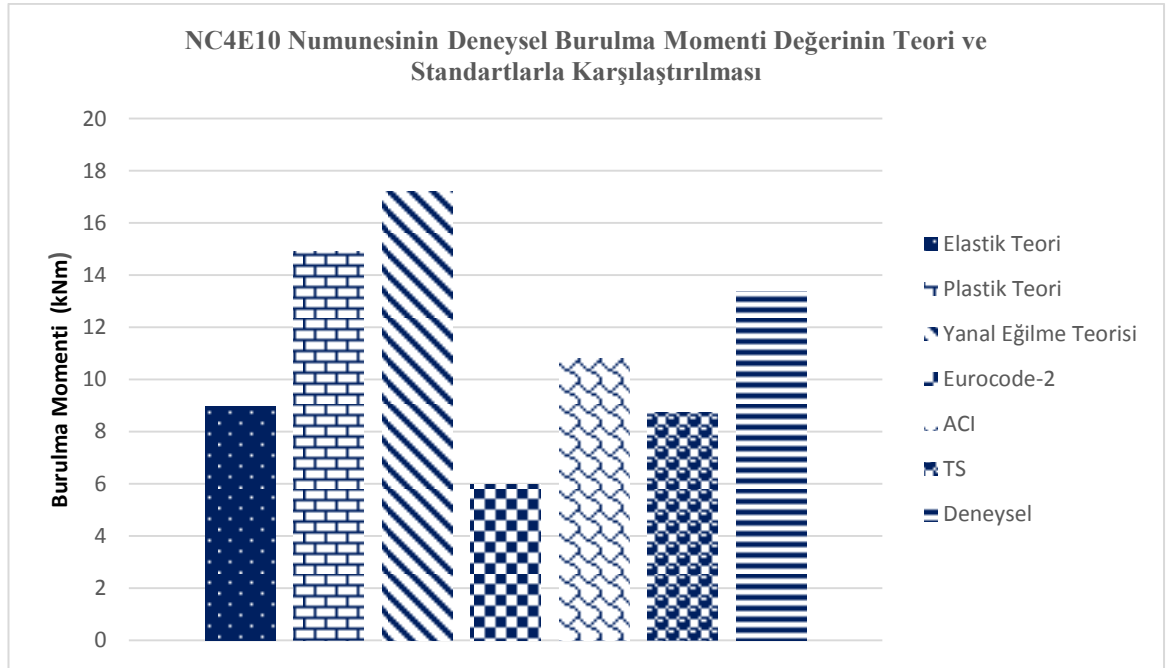
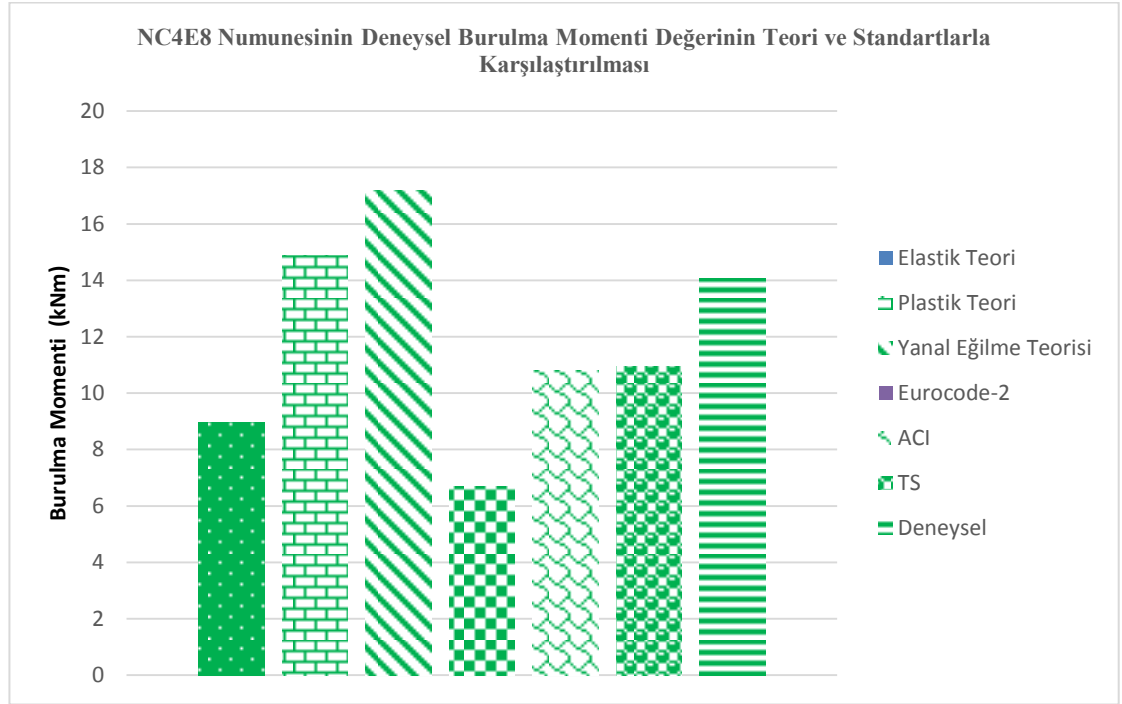
Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi beton basınç dayanımı yüksek olan grupta daha büyük burulma momenti değerlerine ulaşılmıştır. Buda betonun basınç dayanımı ile ilgilidir. Yani daha fazla basınç dayanımına sahip olan numuneler daha büyük kesme kuvveti ve dolayısıyla daha büyük burulma momenti değerleri karşılarlar. Çizelge 4.2'de de görüldüğü gibi en büyük burulma momenti değerine NC4E8-2 numunesi ulaşmıştır. Bu da biraz önce bahsettiğimiz faktörlerin bir sonucudur. Çizelge 4.2'ye bakıldığında en büyük burulma momenti değerlerine NC4E8 serinin ulaştığını görmekteyiz.

Çizelge 4.1 ve 4.2'de teorik olarak hesaplanan burulma momenti değerlerinin deneysel olarak elde edilen değerlerden farklı çıkmasının bir sebebi de basit burulma akademik bir konu olarak kabul edilmektedir ve deneysel çalışma boyunca da numunelere burulma momenti tek başına etki ettirilmiştir. Fakat ACI şartnamesine göre kesme, burulma ve eğilme zorlamaları birlikte etki ettiği kabul edilir.

Şekil 4.17'de deneysel verilerin daha iyi anlaşılabilmesi için elastik, plastik, yanal eğilme teorileri, Türk Standardı, ACI ve Eurocode-2'ye göre hesaplanan teorik değerlerle karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 4.17. (devam)



Şekil 4.17. DeneySEL Burulma momenti kapasitelerinin teori ve standartlarla karşılaştırılması

4.1.4. Kritik burulma momenti değerleri

Betonarme kiriş elemanlarda çatlağa sebep olan ilk kuvvete kritik kuvvet, bu kuvvete karşılık gelen burulma momentine ise kritik burulma momenti (T_{cr}) değeri denir. Kritik burulma momentini deneysel olarak hesaplamak için kiriş numunelerinde ilk çatlağa sebep olan kuvvet not edildi ve bu kuvvet deney düzeneğinin üzerindeki profilin boyunun yarısına bölünerek hesaplandı. Deneysel olarak hesaplanan kritik burulma momenti değeri TS500-2000 standardında önerilen değerle karşılaştırılmıştır. TS500-2000 standardına göre kritik burulma momenti değeri,

$$T_{cr} = 1,35x f_{ctd} x S \quad (4.10)$$

formülünden hesaplanır. Burada f_{ctd} betonun tasarım çekme dayanımını, S burulma dayanım momentini göstermektedir. S değeri $bw^2h/3$ formülünden hesaplanır.

Deneysel olarak hesaplanan kritik burulma momenti değeri daha önce bu alanda çalışmaları olan Hsu, Kuyt, Lampert ve Thurliman'nun kritik burulma momenti değerleri ile karşılaştırılmıştır.

Hsu (1968), çalışmalarına ve analizlerine dayanarak kritik burulma momenti için önerdiği formül aşağıdaki gibidir.

$$T_{cr} = \frac{1,015}{\sqrt{b}} b^2 h \sqrt{f_c} + \left(0,66m \frac{f_{yd}}{f_{ywd}} + 0,33 \frac{h_j}{b_j} \right) \frac{A_{sw} f_{ywd} h_j b_j}{s} \quad (4.11)$$

$$m = \frac{A_s s}{2(h_j + b_j) A_{sw}} \quad (4.12)$$

Burada, b ve h sırasıyla kiriş en kesitinin yatay ve dikey uzunluklarını, A_s kirişteki bütün boyuna donatıların alanını, b_j ve h_j sırasıyla etriye kesitinin yatay ve dikey uzunluklarını ifade etmektedir.

Kuyt (1968), kritik burulma momenti için önermiş olduğu formül ikiye ayrılmaktadır. Kuyt kritik burulma momentinin etriye ve boyuna donatılara göre iki şekilde hesaplanmasını önermektedir.

$$\text{Etriye için,} \quad T_{cr} = A_{sw} f_{ywd} \frac{2 A_c}{s} \cot \theta \quad (4.13)$$

$$\text{Boyuna donatı için,} \quad T_{cr} = 2 b_j h_j \sqrt{\frac{A_s f_{yd}}{2(h_j + b_j)}} \frac{A_{sw} f_{ywd}}{s} \quad (4.14)$$

Lampert ve Thurliman (Thürlimann 1968) da kritik burulma momentini hesaplariken etriye ve boyuna donatı olmak üzere iki şekilde hesaplamışlardır.

$$\text{Etriye için,} \quad T_{cr} = \frac{2 A_k A_{sw} f_{yw}}{s} \operatorname{ctg} \theta \quad (4.15)$$

$$\text{Boyuna donatı için,} \quad T_{cr} = \frac{2 A_k A_{sl} f_y}{u_k} \operatorname{tg} \theta \quad (4.16)$$

Kiriş numunelerinde ilk çatlağın oluştuğu andaki eksenel F kuvveti, bu kuvvete karşılık gelen kritik burulma değerleri, Türk Standardı'na, Lampert ve Thurliman, Hsu ve Kuyt'a göre hesaplanan kritik burulma momenti değerleri Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Kritik burulma momenti değerleri

KİRİŞ ADI	TS500-2000 Kritik Burulma Momenti Değerleri (kNm)	T_{HSU} (kNm)	T_{KUYT} (kNm)		$T_{Lampert and Thurliman}$ (kNm)		Kritik Eksenel Kuvvet F (kN)	Deneysel Kritik Burulma Momenti (kNm)	Ortalama Kritik Burulma Momenti Değerleri (kNm)
NC2E8-1	8,77	5,94	18,00	0,42	4,10	10,95	14,69	10,72	10,72
NC2E8-2	8,77	5,94	18,00	0,42	4,10	10,95	13,97	10,20	
NC2E8-3	8,77	5,94	18,00	0,42	4,10	10,95	15,39	11,24	
NC2E10-1	8,77	5,94	14,40	0,38	4,10	8,76	12,75	9,31	9,26
NC2E10-2	8,77	5,94	14,40	0,38	4,10	8,76	12,59	9,19	

Çizelge 4.3. (devam)

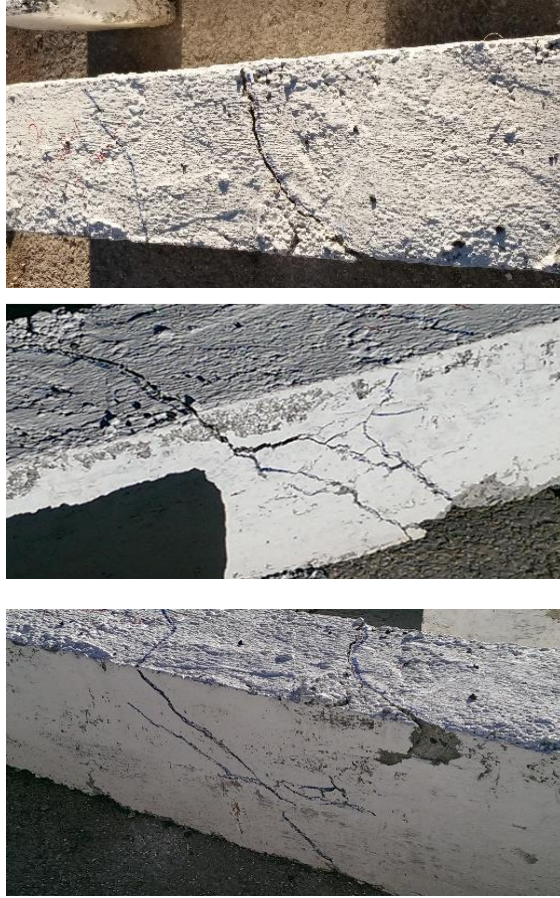
NC2E10-3	8,77	5,94	14,40	0,38	4,10	8,76	12,72	9,28	
NC4E8-1	12,49	5,94	18,00	0,42	4,10	10,95	16,68	12,10	13,95
NC4E8-2	12,49	5,94	18,00	0,42	4,10	10,95	21,57	15,75	
NC4E8-3	12,49	5,94	18,00	0,42	4,10	10,95	19,07	13,80	
NC4E10-1	12,49	5,94	14,40	0,38	4,10	8,76	17,34	12,67	12,24
NC4E10-2	12,49	5,94	14,40	0,38	4,10	8,76	18,25	13,32	
NC4E10-3	12,49	5,94	14,40	0,38	4,10	8,76	14,71	10,70	

Çizelge 4.3’de görüldüğü gibi deneysel olarak elde edilen kritik burulma momenti değerleri TS500-2000 standartlarına göre hesaplanan değerlere yakın çıkmıştır. Beton sınıfının yüksek olması ve etriye oranının düşük tutulması kritik burulma momenti üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Ayrıca deneysel olarak elde edilen kritik burulma momenti değeri önerilen formüllerden Lampert ve Thurliman’nın etriye oranı için önermiş oldukları formüle en yakın çıkmıştır.

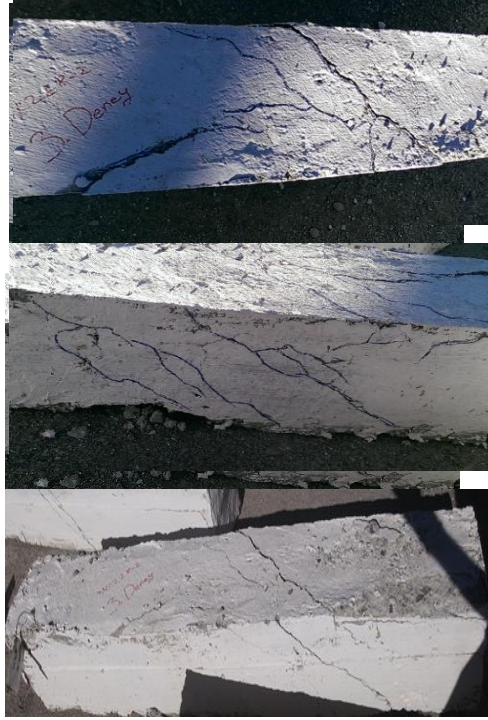
4.1.5. Burulma momenti çatlaklarının incelenmesi

Kiriş numunelerindeki çatlaklar elastisite teorisine uygun olarak kiriş yatay eksenine ile 45° ’lik açı yapacak şekilde oluşmuşlardır. Bunun nedeni ise çekme kuvvetinin kayma düzlemine paralel veya dik etkimesi durumunda kayma gerilmesinin oluşmadığı veya sıfır olduğu, 45 derecelik açı ile etki etmesi durumunda ise kayma gerilmesinin en yüksek değerine ulaşmasından kaynaklanmaktadır. Çatlakların başlangıç noktaları kiriş üst kısmında meydana gelmiştir ve artan yük dolayısıyla artan burulma momenti etkisiyle çatlaklar kirişin yan yüzeyi boyunca aşağıya doğru ilerlemişlerdir. İlk çatlağı takip eden diğer çatlaklar ise kirişlerin orta noktalarına doğru meydana gelmiştir. Bazı numunelerde meydana gelen ikinci ve üçüncü çatlaklar dallanma şeklinde ve ilk çatlağın etrafında oluşmuştur. Bazı numunelerde ise ikinci ve üçüncü çatlaklar ilk çatlağa yaklaşık 10 cm mesafede meydana gelmiştir. Burulma momentine maruz kalan kiriş numunelerinde ilk çatlağın ani bir şekilde oluştuğu gözlemlenmiştir. İlk çatlak meydana geldikten sonra artan yük altında çatlak genişliği giderek artmıştır. İkinci ve üçüncü çatlaklarda meydana gelen çatlak genişliği ilk çatlaktaki çatlak genişliğine

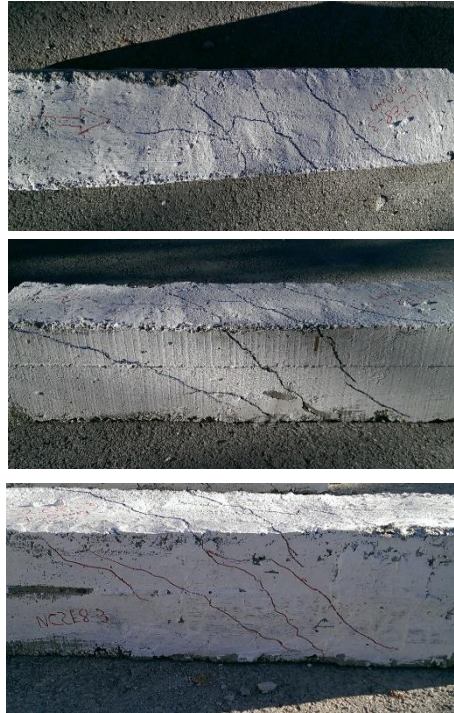
ulaşmamıştır. Çatlak dağılımı iki grupta da benzer şekilde dağılmıştır. NC4 serindeki çatlakların sayısının diğer seriden daha az olduğu görülmektedir. Burulma momentine maruz kalan betonarme kiriş elemanlarda meydana gelen burulma çatlakları aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.



şekil 4.18. NC2E8-1 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları



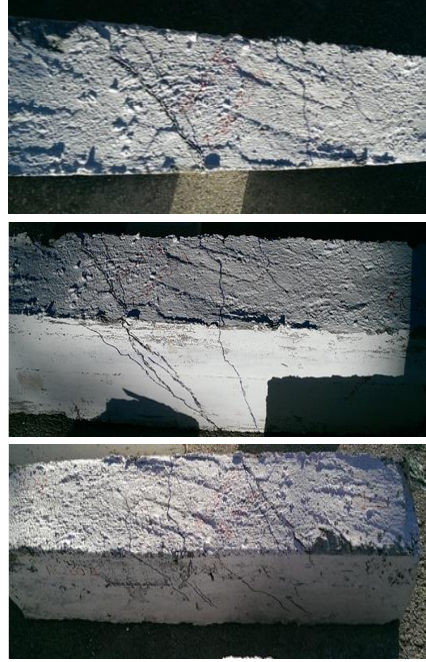
Şekil 4.19. NC2E8-2 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları



Şekil 4.20. NC2E8-3 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları



Şekil 4.21. NC2E10-1 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları



Şekil 4.22. NC2E10-2 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları



Şekil 4.23. NC2E10-3 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları



Şekil 4.24. NC4E8-1 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları



Şekil 4.25. NC4E8-2 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları



Şekil 4.26. NC4E8-3 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları



Şekil 4.27. NC4E10-1 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları



Şekil 4.28. NC4E10-2 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları



Şekil 4.29. NC4E10-3 numunesinde meydana gelen burulma çatlakları

Normal beton deneylerinde elde edilen deneysel, teorik ve standartlara göre hesaplanan burulma momenti kapasitesi ve kritik burulma momenti değerlerinin daha iyi bir şekilde analiz edilebilmesi için Çizelge 4.4 hazırlanmıştır.

4.2. Kendiliğinden Yerleşen Beton Deneyleri

Bu bölümde kendiliğinden yerleşen beton (KYB) tipine ait, burulma momentine maruz kalan betonarme kiriş elemanların davranışı incelenmiştir. Bu amaçla 8 adet 250x300x1500 mm boyutlarında kiriş numunesi hazırlanmıştır. 2 adet KYB C20 beton tipi ve 80 mm etriye aralıklı kiriş, 2 adet KYB C20 ve 100 mm etriye aralıklı kiriş, 2 adet KYB C40 ve 80 mm etriye aralıklı kiriş ve 2 adet KYB C40 beton tipi ve 100 mm etriye aralıklı kiriş hazırlandı. KYB betonlarının döküm işlemi Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında gerçekleştirildi. Şekil 4.30'da beton dökümü bitmiş kiriş numuneleri görülmektedir. Deney numunelerinin beton dökümü sırasında her bir test grubundan 3 adet 15x15x15 cm boyutlu küp numune örneği alınmıştır. Küp numuneler 28 gün sonra kırılmıştır. C20 beton sınıfına ait numunelerin 28 günlük basınç dayanımları 21 MPa, 21 MPa ve 24 MPa; C40 sınıfına ait numunelerin 28 günlük basınç dayanımları 44 MPa, 42 MPa ve 40 MPa çıkmıştır. Bu sonuçlara göre de deneyler için seçilen hedef dayanım tutturulmuştur. Hazırlanan kiriş numuneleri de aynı şekilde 28 gün sonra burulma momenti deneyine tabi tutulmuştur.



Şekil 4.30. Beton dökümü bitmiş KYB kirişleri

KYB dökümü sırasında betonun akmasını ölçmek için yayılma deneyi, akma direncini (viskozite) belirlemek için V hunisi deneyi, geçme kabiliyetini ölçmek için ise 3 aralıklı

L kutusu deneyi yapılmıştır. Çizelge 4.5, 4.6 ve 4.7’de KYB için gerekli şartlar gösterilmektedir.

Çizelge 4.5. KYB akma değerleri

Sınıf	Akma Değeri (mm)
SF1	550-650
SF2	660-750
SF3	760-850

Çizelge 4.6. KYB V hunisi değerleri

Sınıf	Zaman (saniye)
VF1	≤ 8
VF2	9-25

Çizelge 4.7. KYB L kutusu değerleri

Sınıf	Geçme Kabiliyeti
PA2	$\geq 0,80$

KYB dökümü sırasında yapılan yayılma deneyi C20 beton sınıfı için 64 cm, C40 beton sınıfı için 64 cm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.31’de C20 beton sınıfı için yapılan yayılma deneyi, Şekil 4.32’de ise C40 beton sınıfı için yapılan yayılma deneyi görülmektedir. C20 ve C40 beton sınıfları için elde edilen yayılma değerleri Çizelge 4.5’e bakıldığında SF1 sınıfına girmektedir.



Şekil 4.31. C20 beton sınıfı yayılma deneyi



Şekil 4.32. C40 beton sınıfı yayılma deneyi

KYB dökümü sırasında yapılan V hunisi deneylerinde akma süresi C20 beton sınıfı için 9,8 saniye, C40 beton sınıfı için 8,6 saniye olarak ölçülmüştür. Çizelge 4.6'ya bakıldığında iki deney grubu da VF2 sınıfındadır. Şekil 4.33'de C20 beton sınıfı için, Şekil 4.34'de de C40 beton sınıfı için yapılan V hunisi deneyleri görülmektedir.



Şekil 4.33. C20 beton sınıfı V hunisi deneyi



Şekil 4.34. C40 beton sınıfı V hunisi deneyi

KYB beton dökümü sırasında yapılan L kutusu deneyleri C20 beton sınıfı için Şekil 4.35’de C40 beton sınıfı için Şekil 4.36’da görülmektedir.



Şekil 4.35. C20 beton sınıfı L kutusu deneyi



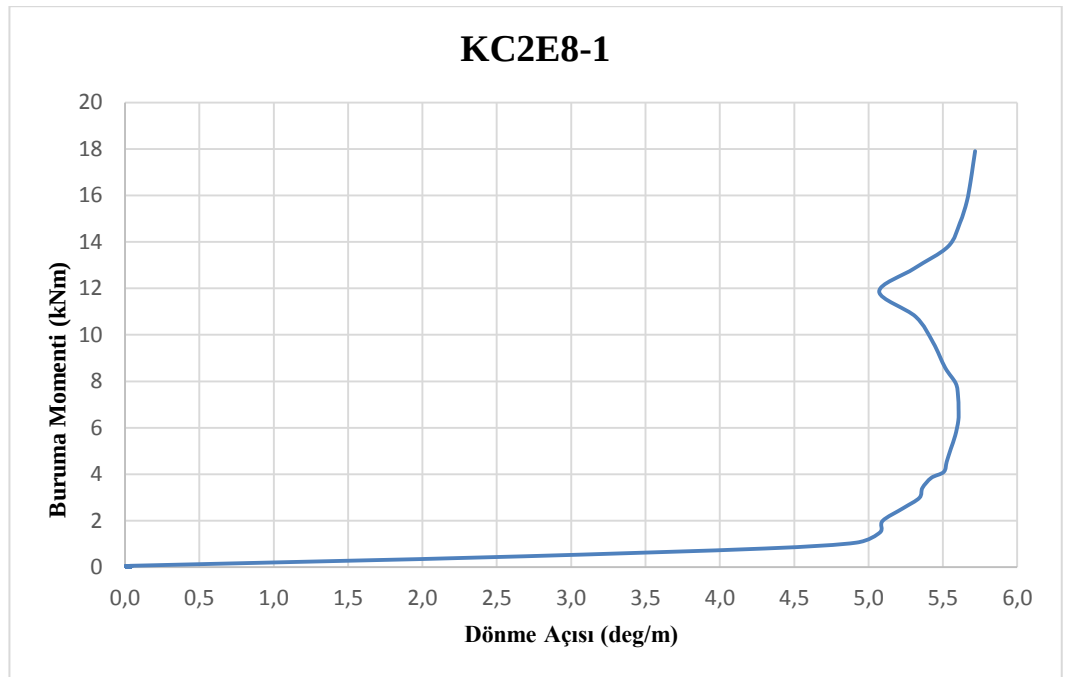
Şekil 4.36. C40 beton sınıfı L kutusu deneyi

C20 beton sınıfı için yapılan L kutusu deneyinde, betonun akması doğrultusunda L kutusunun yatay kısmının en sonunda kutunun genişliği boyunca eşit aralıklarla üç

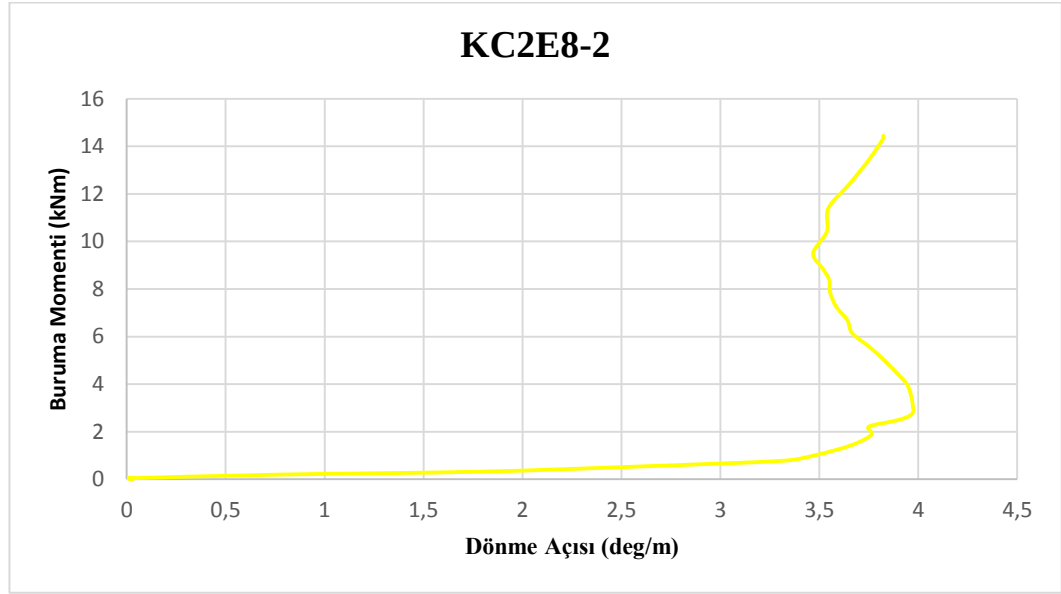
noktada, betonun üst kısmı ile kutunun yatay kısmının üst kısmı arasındaki dikey mesafe ölçülmüştür. Aynı işlem kutunun kapağının hemen arkasındaki bölüm için de yapılmıştır. Ölçüm alınan bu üç noktanın ortalaması kullanılarak ortalama derinlik bulunmuştur. Daha sonra kutunun ön tarafındaki ortalama değer kapak kısmındaki ortalama değere bölünmüştür. Kutunun ön kısmının ortalama değeri (H1) 9 cm, kapak kısmının ortalama değeri (H2) ise 8 cm çıkmıştır. Betonun geçme oranı $H1/H2$ den 1,125 bulunmuştur. Aynı işlemler C40 beton sınıfı içinde yapılmış ve H1 değeri 7 cm, H2 değeri 5 cm olarak ölçülmüştür. C40 betonun geçme kabiliyeti $H1/H2$ 'den 1,4 olarak bulunmuştur.

4.2.1. Burulma momenti birim dönme açısı arasındaki ilişkinin incelenmesi

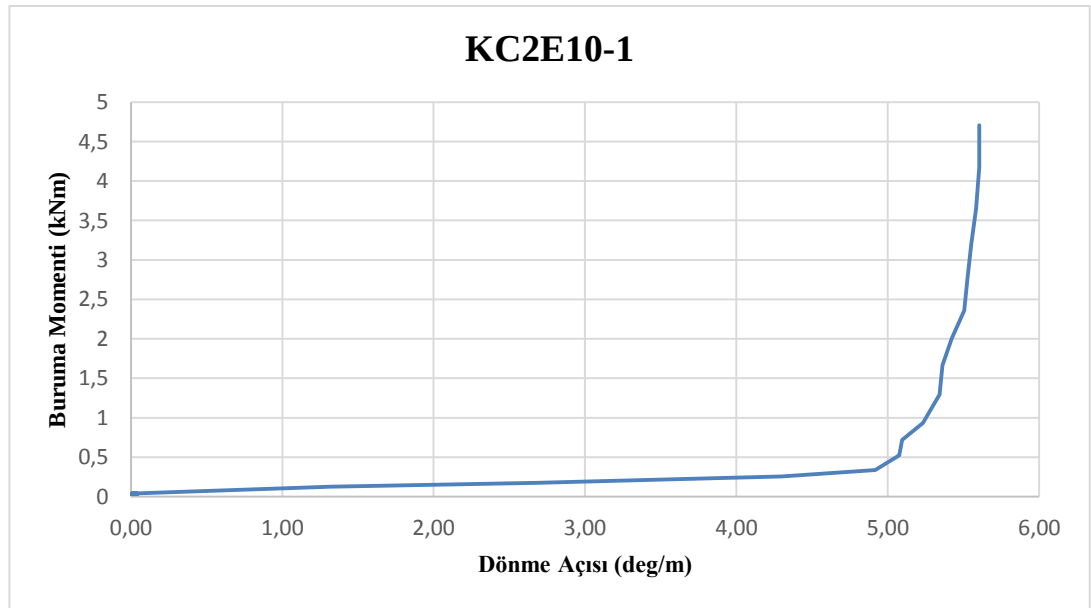
Kendiliğinden yerleşen beton serisi için çizilen burulma momenti-dönme açısı grafiklerinde dönme açısı Denklem 4.1 ve 4.2'den elde edilmiştir.



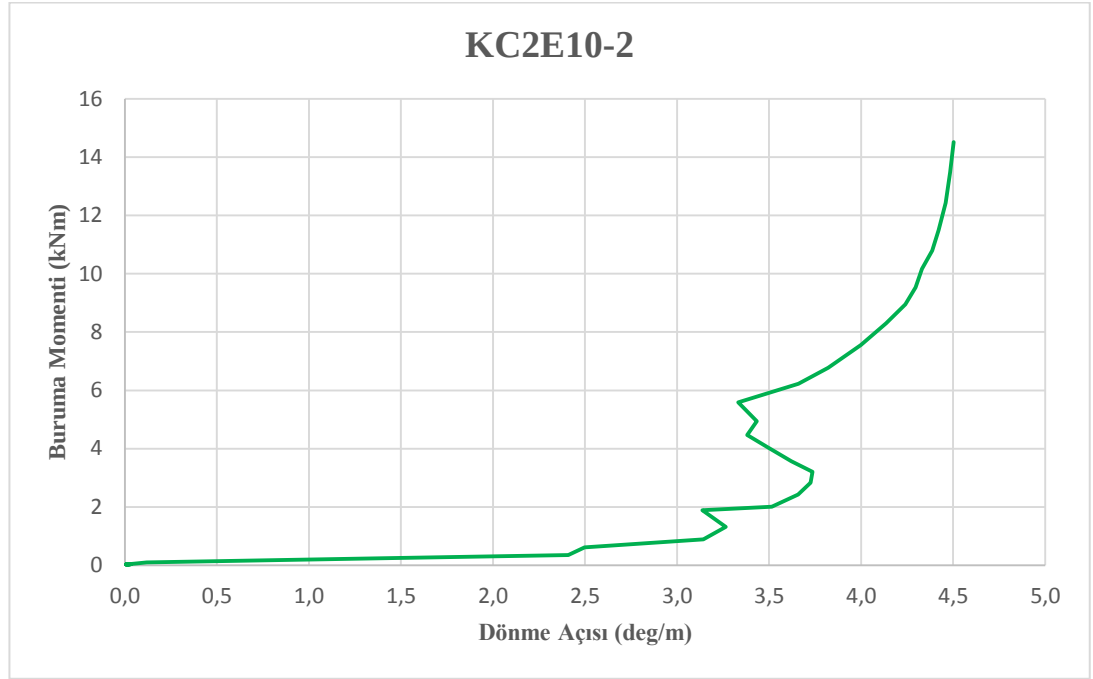
Şekil 4.37. KC2E8-1 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği



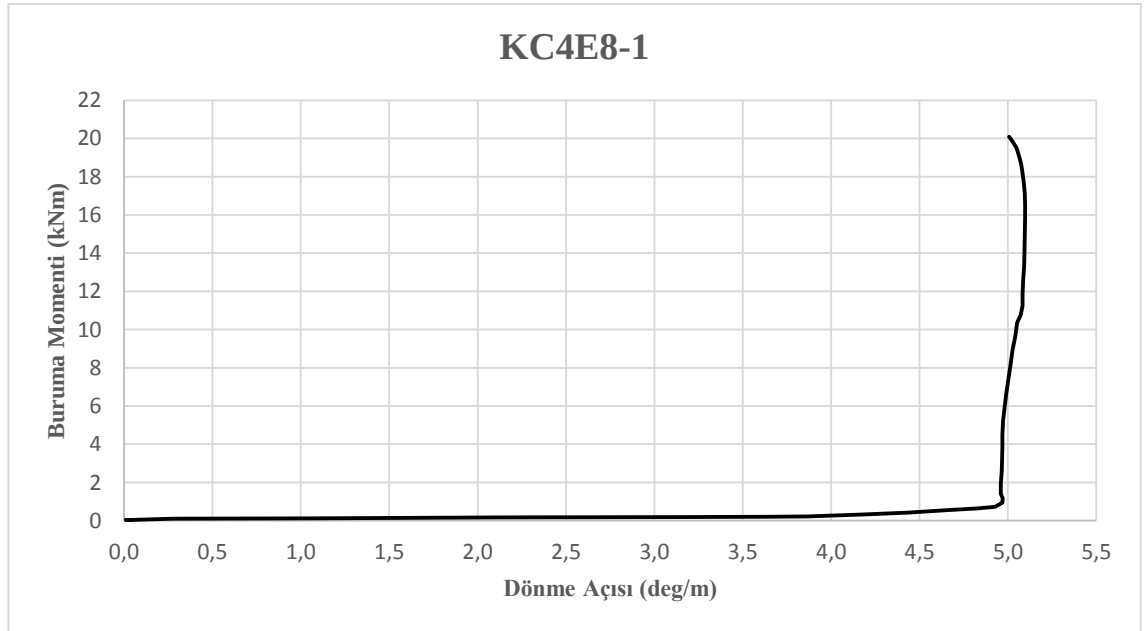
Şekil 4.38. KC2E8-2 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği



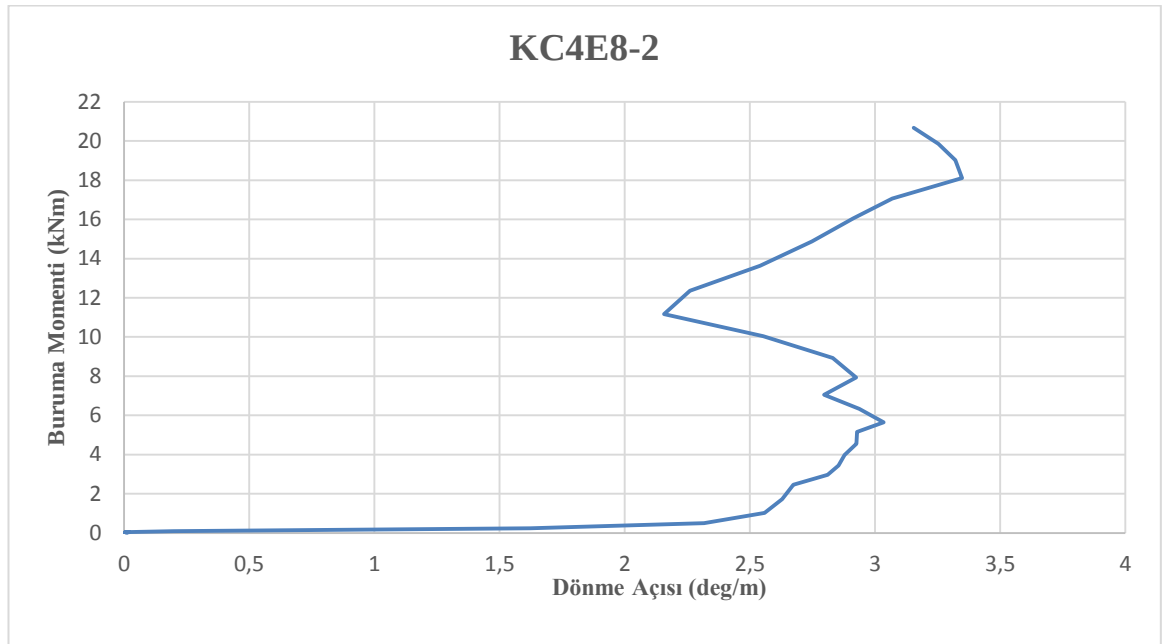
Şekil 4.39. KC2E10-1 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği



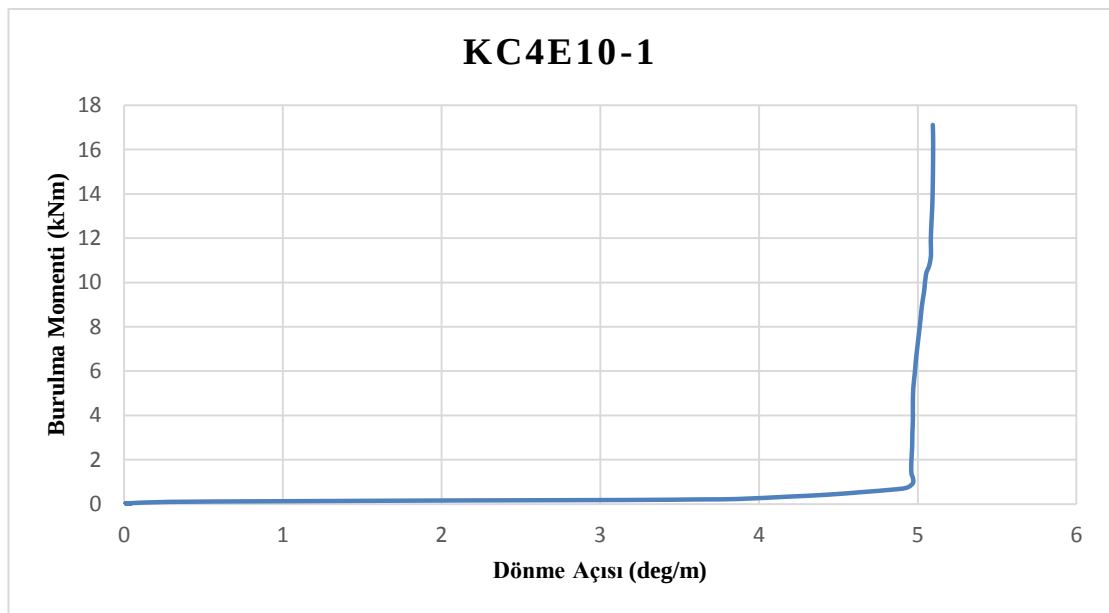
Şekil 4.40. KC2E10-2 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği



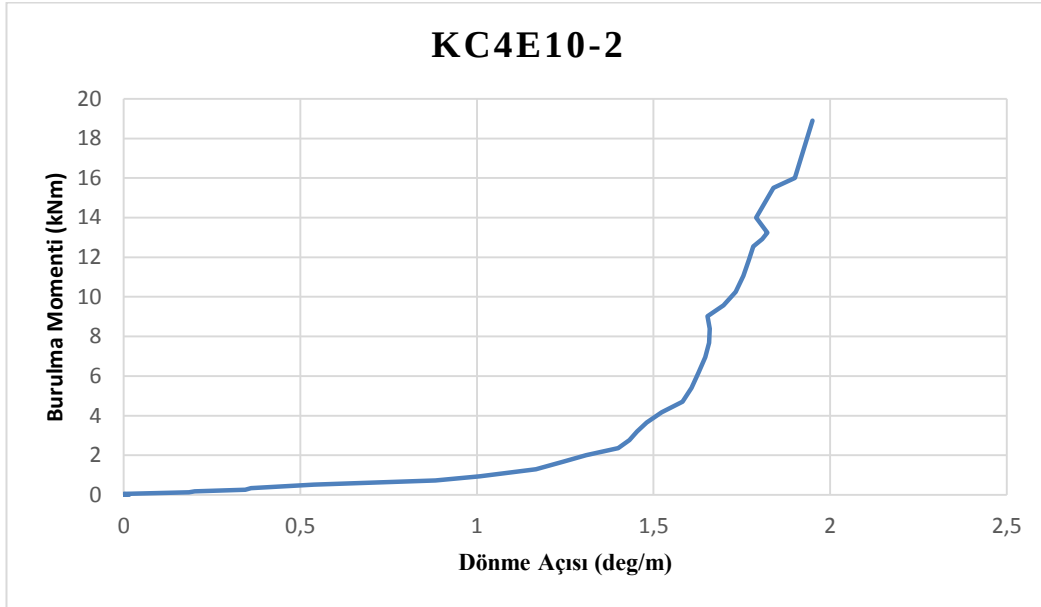
Şekil 4.41. KC4E8-1 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği



Şekil 4.42 KC4E8-2 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği



Şekil 4.43 KC4E10-1 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği



Şekil 4.44 KC4E10-1 numunesinin burulma momenti dönme açısı grafiği

Burulma momenti-dönme açısı grafikleri incelendiğinde maksimum dönmeye KC2E10-1 numunesinin ulaştığını görülmektedir. En küçük dönme açısı değerine de KC4E8-2 numunesinin sahip olduğu görülmektedir. KC2 ve KC4 numuneleri karşılaştırıldığında zaman KC4 numunelerinin daha düşük değerlerde dönme hareketi yaptıkları görülmektedir. Dolayısıyla beton dayanımının fazla olması dönme açısının daha düşük değerler almasına sebep olur yorumunu yapılabilir.

4.2.2. Standartlarla burulma momentinin incelenmesi

Bu bölümde KYB beton tipine sahip kiriş elemanların deneysel olarak elde edilen burulma momenti kapasitelerinin, ACI, Eurocode-2 ve TS500-2000 standartlarının önerdiği formüllerle karşılaştırılması yapılmıştır. ACI, Eurocode-2 ve TS500-2000'e göre burulma momenti kapasitesi hesaplanırken Denklem 4.3, 4.4 ve 4.5 kullanılmıştır.

Çizelge 4.8. KYB için deneysel burulma momenti kapasitesinin standartlarla karşılaştırılması (kNm)

	T_{EU}	T_{ACI}	$T_{TS500-2000}$	$T_{DENEYSEL}$
KC2E8-1	6,68	7,62	10,94	17,91
KC2E8-2	6,68	7,62	10,94	14,45
KC2E10-1	5,97	7,62	8,75	13,24
KC2E10-2	5,97	7,62	8,75	14,51
KC4E8-1	6,68	10,78	10,94	20,01
KC4E8-2	6,68	10,78	10,94	20,67
KC4E10-1	5,97	10,78	8,75	18,17
KC4E10-2	5,97	10,78	8,75	18,90

Çizelge 4.8’de görüldüğü gibi deneysel olarak ölçülen burulma momenti kapasitesi değerleri teorik değerlerden yüksek çıkmıştır. En büyük burulma momenti kapasitesi değerine KC4E8-2 numunesinde ulaşılmıştır. KYB ile dökümü yapılan kiriş numunelerinin teorik değerlerden yüksek çıkmasının nedeni kullanılan donatı oranının fazla olması ve KYB’den dolayı geçirimsiz bir beton elde edilmiş olmasıdır. Deneysel sonuçlara en yakın değerler Türk Standartları ile hesaplanan teori değerlerdir. Deneysel olarak ölçülen burulma momenti kapasitesi ACI ve Eurocode-2’nin önerdiği formülden hesaplanan teorik değerlerden çok daha yüksek çıkmıştır.

4.2.3. Teorilerle burulma momentinin incelenmesi

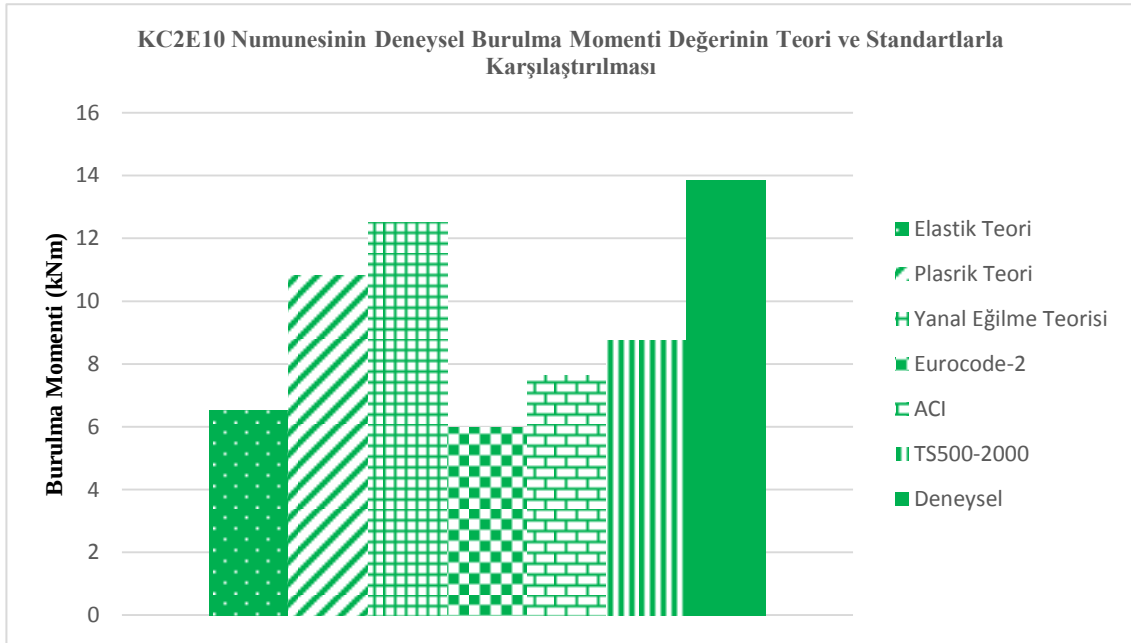
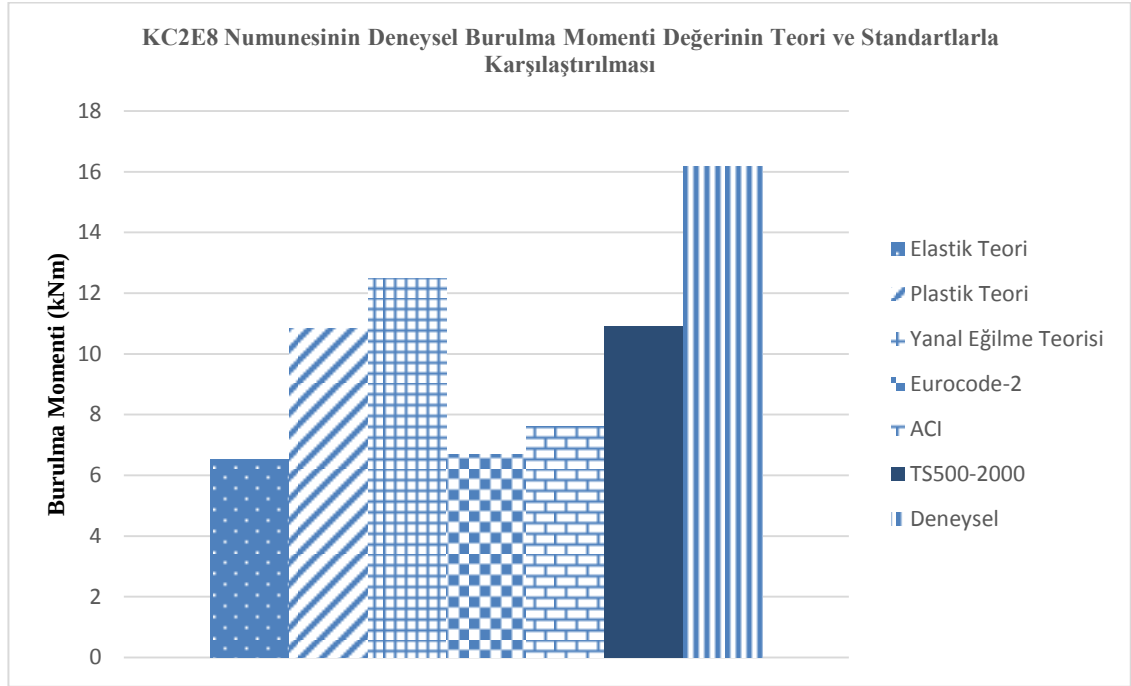
Bu bölümde KYB kiriş elemanların deneysel burulma momenti kapasiteleri ile elastik, plastik ve yanal eğilme teorileri ile elde edilen teorik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elastik, plastik ve yanal eğilme teorileri ile burulma momenti kapasitesi hesaplanırken Denklem 4.6, 4.7 ve 4.9 kullanılmıştır.

Çizelge 4.9. KYB serisi için elastik plastik ve yanal eğilme teorileri ile deneysel burulma momenti kapasitesinin karşılaştırılması (kNm)

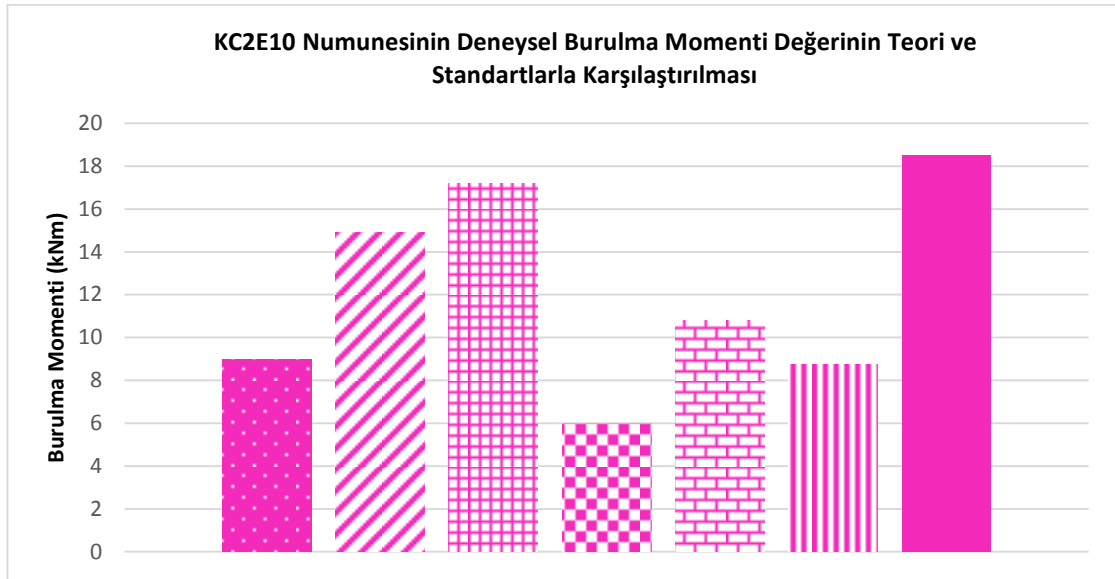
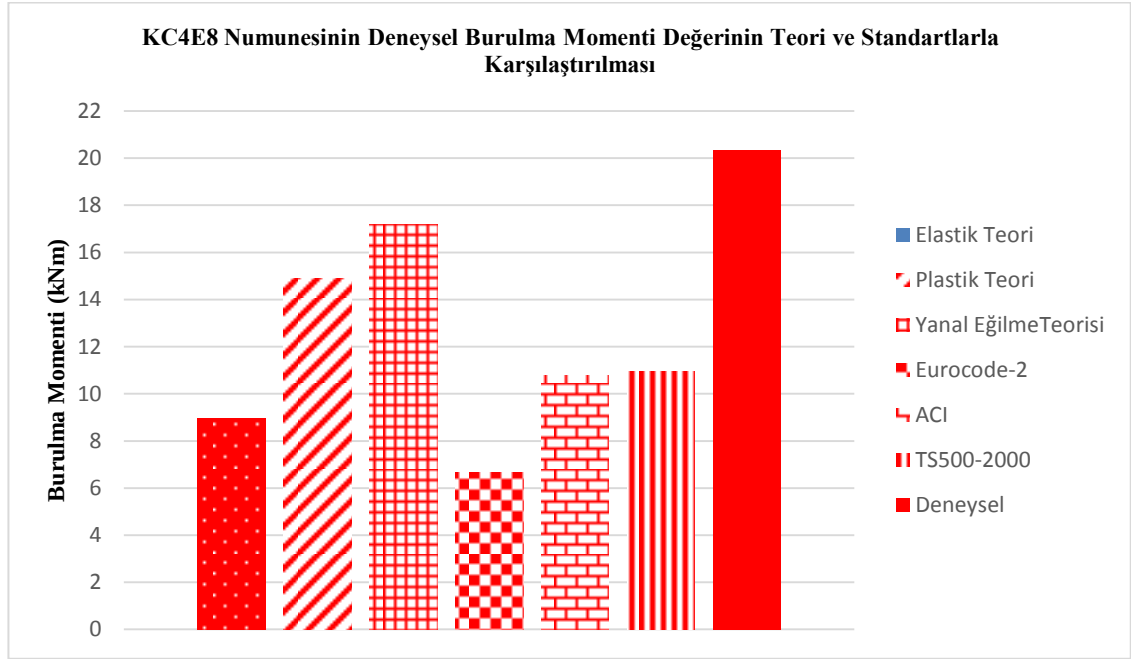
KİRİŞ ADI	Elastik Teori Burulma Değerleri	Plastik Teori Burulma Değerleri	Yanal Eğilme Teorisi Burulma Değerleri	Deneysel Burulma Momenti Kapasitesi T_u	Ortalama Burulma Değerleri
KC2E8-1	6,51	10,83	12,5	17,91	16,18
KC2E8-2	6,51	10,83	12,5	14,45	
KC2E10-1	6,51	10,83	12,5	13,24	13,86
KC2E10-2	6,51	10,83	12,5	14,51	
KC4E8-1	8,95	14,89	17,2	20,01	20,34
KC4E8-2	8,95	14,89	17,2	20,67	
KC4E10-1	8,95	14,89	17,2	18,17	18,54
KC4E10-2	8,95	14,89	17,2	18,90	

Çizelge 4.9’da da görüldüğü gibi deneysel sonuçları en yakın teorik değerler geleneksel beton deneylerinde de olduğu gibi yanal eğilme teorisi ile hesaplanan değerler çıkmıştır. Deneysel olarak ölçülen değerler teorik değerlerden yüksek çıkmıştır. KC2 ve KC4 numunelerine baktığımız zaman beton dayanımının artması burulma momenti kapasitesi arttırdığını söyleyebiliriz. Benzer şekilde etriye oranının azaltılması burulma momentinin değerini ciddi manada arttırmaktadır. Etriye aralığının az olması kiriş numunesinin daha fazla plastik şekil değiştirmesine sebep olmuştur. Dolayısıyla kiriş numunesinin sünekliğini arttırmıştır ve daha fazla burulma momenti karşılamasına sebep olmuştur.

Şekil 4.45’de KYB serisinin deneysel verilerinin daha iyi anlaşılabilmesi için elastik, plastik, yanal eğilme teorileri, Türk Standardı, ACI ve Eurocode-2’ye göre hesaplanan teorik değerlerle karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 4.45. (devam)



Şekil 4.45. KYB serisi için deneySEL burulma momenti kapasitelerinin teori ve standartlarla karşılaştırılması

4.2.4. Kritik burulma momenti değerleri

KYB serilerinde ilk çatlağa sebep olan kritik burulma momenti değeri (T_{cr}) deneysel olarak ölçülmüştür. Deneysel T_{cr} değerinin teorik değerlerle karşılaştırılması Çizelge 4.10'da yapılmıştır. Teorik kritik burulma momenti değerleri hesaplanırken Denklem 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 ve 4.16 kullanılmıştır.

Çizelge 4.10. KYB serisi için kritik burulma momenti değerleri

KİRİŞ ADI	TS500-2000 Kritik Burulma Momenti Değerleri (kNm)	T_{HSU} (kNm)	T_{KUYT} (kNm)		$T_{Lampert \text{ and } Thurliman}$ (kNm)		Deneysel Kritik Burulma Momenti (kNm)	Ortalama Kritik Burulma Momenti Değerleri (kNm)
KC2E8-1	8,77	5,94	18,00	0,42	4,10	10,95	16,58	15,00
KC2E8-2	8,77	5,94	18,00	0,42	4,10	10,95	13,41	
KC2E10-1	8,77	5,94	14,40	0,38	4,10	8,76	11,85	12,14
KC2E10-2	8,77	5,94	14,40	0,38	4,10	8,76	12,43	
KC4E8-1	12,49	5,94	18,00	0,42	4,10	10,95	19,52	19,28
KC4E8-2	12,49	5,94	18,00	0,42	4,10	10,95	19,03	
KC4E10-1	12,49	5,94	14,40	0,38	4,10	8,76	16,53	16,01
KC4E10-2	12,49	5,94	14,40	0,38	4,10	8,76	15,50	

Çizelge 4.10'da görüldüğü gibi deneysel olarak elde edilen kritik burulma momenti değerleri Kuyt'ın önerdiği formülle hesaplanan teorik değere yakın çıkmıştır. Beton sınıfının yüksek olması ve etriye oranının düşük tutulması kritik burulma momenti üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir.

4.2.5. Burulma momenti çatlaklarının incelenmesi

Bu bölümde burulmaya maruz kalan betonarme kiriş elemanlarda meydana gelen çatlaklar incelenmiştir. Şekil 4.46'da KYB kirişlerinin deneye tabi tutulmadan önceki halleri görülmektedir.



Şekil 4.46. KYB deney kirişleri

Burulma momentine maruz kalan betonarme kiriş numunelerinde meydana gelen çatlaklar Şekil 4.47, 4.48, 4.49, 4.50, 4.51 ve 4.52’de görülmektedir. Kirişlerde meydana gelen çatlaklar incelendiğinde çatlak sayılarının normal betonda meydana gelen çatlaklardan daha az olduğu görülmektedir. Aynı şekilde kirişlerde meydana gelen çatlaklar daha az sayıda dallanma yapmıştır. Çatlaklar kiriş eksenine ile 45 derecelik açı yapacak şekilde meydana gelmiştir. İlk çatlağın kiriş yan yüzeyinin üst kısmında meydana geldiği ve aşağı yönde hızlı bir şekilde ilerlediği gözlemlenmiştir. İlk çatlağı takip eden ikinci ve üçüncü çatlakların oluştuğu deney sırasında görülmüştür. Deney numunelerinde en fazla çatlak dallanmasının görüldüğü numune KC4E8-1’dir. KC2E8 ile KC2E10 kirişleri karşılaştırıldığı zaman KC2E8 numunelerinde çatlak dağılımının daha az olduğu gözlemlenmiştir. Etriye aralığının kısa olması burulma momentinden kaynaklanan çatlakları azalttığı söylenebilir.



Şekil 4.47. KC2E8-1 numunesinde meydana gelen çatlaklar



Şekil 4.48. KC2E8-2 numunesinde meydana gelen çatlaklar



Şekil 4.49. KC2E10-1 numunesinde meydana gelen çatlaklar



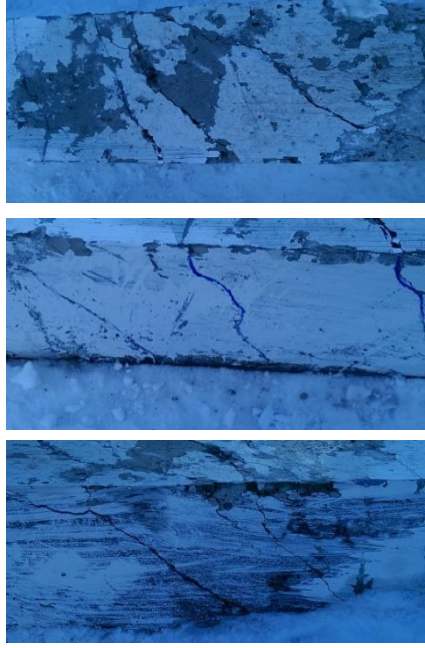
Şekil 4.50. KC2E10-2 numunesinde meydana gelen çatlaklar



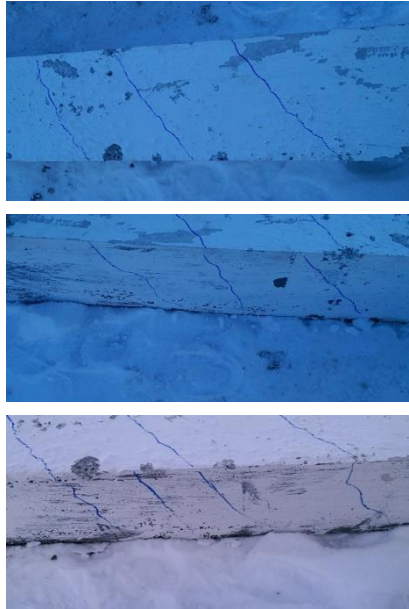
Şekil 4.51. KC4E8-1 numunesinde meydana gelen çatlaklar



Şekil 4.52. KC4E8-2 numunesinde meydana gelen çatlaklar



Şekil 4.53. KC4E10-1 numunesinde meydana gelen çatlaklar



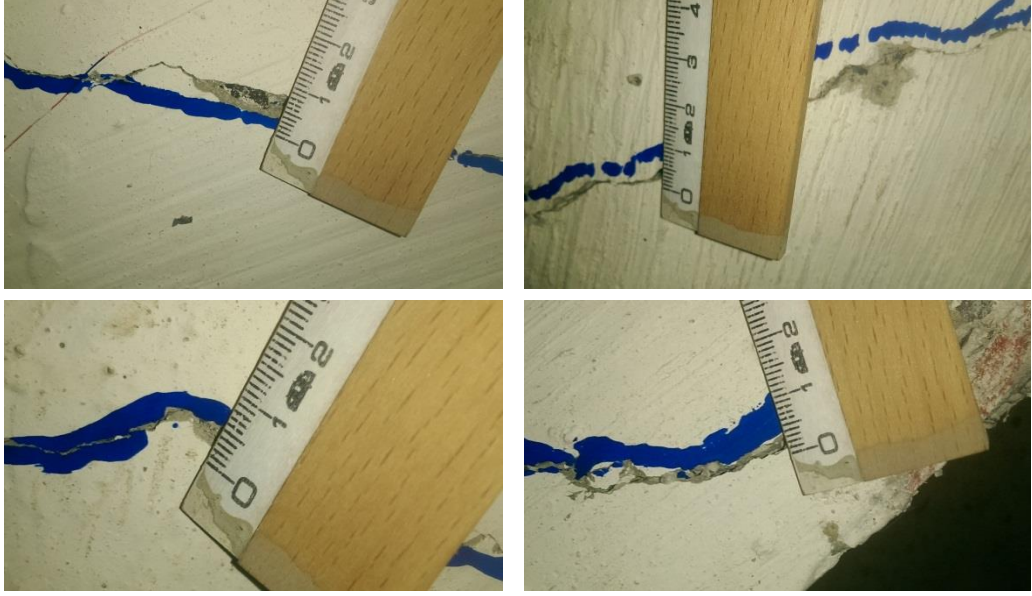
Şekil 4.54. KC4E10-2 numunesinde meydana gelen çatlaklar

4.2.6. Çatlak genişliklerinin incelenmesi

Normal beton ve KYB kirişlerinde meydana gelen çatlak genişlikleri karşılaştırıldığı zaman KYB serilerindeki çatlak genişliklerinin daha az olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.55’de normal beton serilerin, Şekil 4.56’da de KYB serilerinde meydana gelen çatlaklar gösterilmektedir. Şekillere bakıldığı zaman KYB serilerindeki çatlak genişliklerinin çok düşük değerler aldığını görmekteyiz. Bunun nedeni KYB işlenebilirliğinin çok iyi olmasıdır. KYB yapısındaki mineral ve kimyasal katkılardan dolayı akışkan bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla beton dökümü sırasında herhangi bir vibratör işlemine gerek duymadan kendiliğinden yerleşmiştir.



Şekil 4.55. Normal beton numunelerinde meydana gelen çatlak genişlikleri



Şekil 4.56. KYB numunelerinde meydana gelen çatlak genişlikleri

Normal beton deneylerinde elde edilen deneysel, teorik ve standartlara göre hesaplanan burulma momenti kapasitesi ve kritik burulma momenti değerlerinin daha iyi bir şekilde analiz edilebilmesi için Çizelge 4.11 hazırlanmıştır.

Çizelge 4.11. KYB serisi için deneysel verilerin teori ve standartlarla karşılaştırılması

	T_{EU} (kNm)	T_{ACI} (kNm)	T_{TS500-2000} (kNm) (T _{cr})	T_{TS500-2000} (kNm) (T _u)	T_{EL} (kNm)	T_{PL} (kNm)	T_Y (kNm)	T_u DENEYSEL (kNm)	T_{cr-} DENEYSEL (kNm)
KC2E8-1	6,68	9,30	8,77	10,94	6,51	10,83	12,5	17,91	16,58
NC2E8-2	6,68	9,30	8,77	10,94	6,51	10,83	12,5	14,45	13,41
KC2E10-1	5,97	7,44	8,77	8,75	6,51	10,83	12,5	13,24	11,85
KC2E10-2	5,97	7,44	8,77	8,75	6,51	10,83	12,5	14,51	12,43
KC4E8-1	6,68	9,30	12,49	10,94	8,95	14,89	17,2	20,01	19,52
KC4E8-2	6,68	9,30	12,49	10,94	8,95	14,89	17,2	20,67	19,03
KC4E10-1	5,97	7,44	8,77	8,75	8,95	14,89	17,2	18,17	16,53
KC4E10-2	5,97	7,44	8,77	8,75	8,95	14,89	17,2	18,90	15,50
$T_{EU} = 2A_k \sqrt{\frac{A_{sw}f_{ywd}}{s}} \sqrt{\frac{A_{sl}f_{yld}}{u_k}} \quad T_{ACI} = f_{ys} \left(\frac{A_{sw}}{s} \right) 2A_0 \cot \theta \quad T_{TS500-2000} = \frac{A_{ot} 2A_e f_{ywd}}{s}$ $T_{TS500-2000} = 1,35 f_{ctd} S$ $T_{EL} = \alpha_e f_{ctk} x^2 y \quad T_{PL} = \alpha_p f_{ctk} x^2 y \quad T_Y = \frac{x^2 y}{3} f_{ctf}$									

4.3. Normal Beton ve Kendiliğinden Yerleşen Beton Deneylerinin Karşılaştırılması

Bu bölümde 12 adet normal beton ve 8 adet kendiliğinden yerleşen betonla dökümü yapılan kiriş numunelerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Çizelge 4.12’de normal beton numunelerinin burulma momenti kapasitesi ile kendiliğinden yerleşen beton numunelerinin burulma momenti karşılaştırılmıştır. Normal beton serilerinde, dökülen 3 adet kirişin burulma momenti kapasitesinin (T_u) ortalaması, kendiliğinden yerleşen beton serilerinde ise dökülen 2 adet kirişin burulma momenti kapasitesinin (T_u) ortalaması kullanılmıştır.

Çizelge 4.12. Normal beton ve KYB kirişlerinin burulma momenti kapasitelerinin karşılaştırılması

Kiriş Adı	Burulma Momenti Kapasitesi(kNm) (T_u)1	Kiriş Adı	Burulma Momenti Kapasitesi(kNm) (T_u)2	Burulma Momenti Kapasitesindeki Artış %
NC2E8	11,71	KC2E8	16,18	38,17
NC2E10	11,47	KC2E10	13,86	20,84
NC4E8	14,07	KC4E8	20,34	44,56
NC4E10	13,38	KC4E10	18,54	38,56

Çizelge 4.12’e bakıldığı zaman kendiliğinden yerleşen beton tipi burulma momenti kapasitesinde yaklaşık %40’lık bir artışa neden olmuştur. NC4E8 serisinde maksimum artış tespit edilmiştir. Burulma momenti kapasitesindeki bu artışın sebebi, KYB’nin normal betona göre daha akıcı, daha iyi gradasyona sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. KYB’nin karışımında kullanılan silis dumanı çok ince bir yapıya sahip olmasından dolayı KYB ile dökümü yapılan numunelerin daha geçirimsiz bir yapıya sahip olmalarına neden olmuştur. Çizelge 4.12’e bakıldığı zaman burulma momentine maruz bırakılan kiriş numunelerinde maksimum burulma momentini 20,34 kNm ile KC4E8 serisinin, en düşük burulma momentini ise 11,47 kNm ile NC2E10 serisinin karşıladığını görmekteyiz. Bu sonuçlara dayanarak, beton sınıfını yükseltmenin, etriye aralığını düşük tutmanın ve beton tipi olarak KYB’nin burulma

momenti kapasitesi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu yorumu yapılabilir. NC2E8 ile NC2E10 numuneleri karşılaştırıldığı zaman 11,71 kNm’lik burulma momenti kapasitesi ile NC2E8 serisi daha büyük bir burulma momenti karşılamıştır. Buradan etriye aralığının düşük tutmanın burulma momenti kapasitesi üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir yorumunu yapabiliriz. NC2E8 ile NC4E8 numuneleri karşılaştırıldığı zaman NC4E8 numunesinin daha yüksek burulma momenti karşıladığını görmekteyiz. Buradan beton sınıfını yüksek tutmanın burulma momenti kapasitesini arttırdığı yorumunu yapabiliriz.

Çizelge 4.13’de ise normal beton ve kendiliğinden yerleşen beton serilerinin kritik burulma momenti değerleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.13. Normal beton ve KYB kirişlerinin kritik burulma momenti değerlerinin karşılaştırılması

Kiriş Adı	Kritik Burulma Momenti Kapasitesi(kNm) (T_{cr})1	Kiriş Adı	Kritik Burulma Momenti Kapasitesi(kNm) (T_{cr})2	Kritik Burulma Momenti Kapasitesindeki Artış %
NC2E8	10,72	KC2E8	15,00	39,93
NC2E10	9,26	KC2E10	12,14	31,10
NC4E8	13,95	KC4E8	19,28	38,21
NC4E10	12,24	KC4E10	16,01	30,80

Çizelge 4.13’e bakıldığı zaman kendiliğinden yerleşen beton tipinin burulma momenti kapasitesinde olduğu gibi kritik burulma momenti (T_{cr}) üzerinde de olumlu bir etkiye sahiptir. KYB’nin kritik burulma momenti değerini yaklaşık %35 arttırdığı tespit edilmiştir. KYB, NC2E8 serisinde %39,93’lük bir dayanım artışı ile maksimum değere ulaşmıştır. Kiriş numunelerinin kritik burulma momenti kapasiteleri karşılaştırıldığı zaman maksimum kritik burulma momenti değerine 19,28 kNm’lik değeri ile KC4E8 serisinin ulaştığını görmekteyiz. En düşük kritik burulma momenti değerine ise 9,26 kNm’lik değeri ile KC2E10 serisi sahiptir.

Çizelge 4.14’de burulma momentine maruz bırakılan her bir numunenin burulma momenti kapasitesi (T_u) ve T_u burulma moment değerine karşılık gelen dönme açısı

(ϕ_u) ile kritik burulma momenti değeri (T_{cr}) ve ilk çatlağın oluştuğu andaki birim dönme açısı (ϕ_{cr}) verilmiştir.

Çizelge 4.14. Normal beton ve KYB kirişlerinin karşılaştırılması

Kiriş Adı	Burulma Momenti Kapasitesi (kNm) T_u	Burulma Momenti Kapasitesi Dönme Açısı (deg/m) ϕ_u	Kritik Burulma Momenti Kapasitesi (kNm) T_{cr}	Kritik Burulma Momenti Kapasitesi Dönme Açısı (deg/m) ϕ_{cr}
NC2E8-1	11,20	3,13	10,72	3,09
NC2E8-2	11,33	2,77	10,20	2,56
NC2E8-3	12,60	4,27	11,24	4,24
NC2E10-1	11,90	3,31	9,31	3,01
NC2E10-2	10,60	3,24	9,19	2,98
NC2E10-3	11,90	3,84	9,28	3,70
NC4E8-1	12,18	3,64	12,10	3,43
NC4E8-2	16,10	2,91	15,75	2,43
NC4E8-3	13,92	3,69	13,80	3,69
NC4E10-1	14,20	3,19	12,67	2,80
NC4E10-2	15,20	4,58	13,32	4,55
NC4E10-3	10,74	3,43	10,70	3,40
KC2E8-1	17,91	5,71	16,58	5,68
KC2E8-2	14,45	3,82	13,41	3,74
KC2E10-1	13,24	1,80	11,85	1,75
KC2E10-2	14,51	4,50	12,43	4,45
KC4E8-1	20,01	5,05	19,52	5,02
KC4E8-2	20,67	3,32	19,03	3,15
KC4E10-1	18,17	5,09	16,53	5,08
KC4E10-2	18,90	4,95	15,50	4,91

Çizelge 4.14'e bakıldığı zaman kiriş numunelerinin burulma momenti kapasiteleri ile kritik burulma momenti değerlerinin bir birine yakın olduğunu görmekteyiz. Dolayısıyla kiriş numunelerinde ilk çatlak oluştuğundan sonra kirişin çok kısa bir süre içerisinde göçmeye gittiğini söyleyebiliriz. Aynı şekilde kiriş numunelerinin ϕ_u ve ϕ_{cr} dönme açıları da bir birine oldukça yakındır. Yani kiriş ilk çatlak oluşuncaya kadar

yapacağı dönmeyi nerdeyse yapmıştır diyebiliriz. Yüksek beton sınıfı ve düşük etriye aralığının hem T_u burulma momenti değerine karşılık gelen ϕ_u açısı, hem de ilk çatlak oluştuğu andaki dönme açısı ϕ_{cr} üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.15’de normal beton ve kendiliğinden yerleşen beton numunelerinde oluşan maksimum çatlak genişliklerinin değerleri ve karşılaştırılması yapılmıştır.

Çizelge 4.15. Normal beton ve KYB kirişlerinin maksimum çatlak genişliklerinin karşılaştırılması

Kiriş Adı	Maksimum Çatlak Genişliği (mm)	Ortalama Çatlak Genişliği (mm) w1	Kiriş Adı	Maksimum Çatlak Genişliği (mm)	Ortalama Çatlak Genişliği (mm) w2	Çatlak Genişliğindeki Azalış %
NC2E8-1	2,3	2,73	KC2E8-1	2,9	2,5	8,42
NC2E8-2	4,1		NC2E8-2	2,0		
NC2E8-3	1,8					
NC2E10-1	8,1	6,9	KC2E10-1	3,2	3,3	52,17
NC2E10-2	6,8		KC2E10-2	3,3		
NC2E10-3	5,8					
NC4E8-1	3,1	4,6	KC4E8-1	2,0	1,4	69,57
NC4E8-2	6,1		KC4E8-2	0,7		
NC4E8-3	4,8					
NC4E10-1	3,5	3,4	KC4E10-1	1,7	2,0	41,17
NC4E10-2	---		KC4E10-2	2,2		
NC4E10-3	3,3					

Çizelge 4.15 KYB beton serilerinin, normal beton serilerine göre çok az çatlak genişliklerine ulaştığını göstermektedir. KYB kullanımı çatlak genişliğini %69’lara varan oranda azaltmıştır. Deney numunelerinde maksimum çatlak genişliği 8,1 mm ile NC2E10-1 numunesinde ölçülmüştür. Minimum çatlak genişliği ise 0,7 mm ile KC4E8-2 numunesinde ölçülmüştür. KYB’de mevcut boşlukların normal betona göre bir birinden daha fazla bağımsız olması KYB kirişlerindeki çatlak genişliğinin daha küçük değerlerde olmasına sebep olmuştur. KYB kirişlerinin daha iyi gradasyona sahip olması da maksimum çatlak genişliğinin normal beton numunelerindeki maksimum çatlak genişliklerine göre daha küçük değerlerde kalmasına sebep olmuştur.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Betonarme kiriş elemanlarda beton sınıfı, beton tipi ve etriye oranının burulma davranışı üzerinde etkisinin araştırıldığı bu çalışmada 20 adet deney yapılmıştır ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1- Beton sınıfı olarak daha yüksek dayanıma sahip olan kiriş numunelerin burulma momenti kapasitelerinin daha yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda NC40 serisinin NC20 serisine göre, KC40 serisinin de KC20 serisine oranla daha yüksek burulma momenti kapasitesine ulaştıkları deneysel olarak belirlenmiştir.

2- Kendiliğinden yerleşen beton tipinin, normal betona göre daha yüksek burulma momenti kapasitesine ulaştığı deneysel olarak gözlemlenmiştir. KYB serilerinin normal beton serilerine göre yaklaşık %40 daha fazla burulma momenti kapasitesine sahip oldukları deneysel olarak tespit edilmiştir. Dolayısıyla betonarme yapılarda kendiliğinden yerleşen beton kullanmanın burulma momenti üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Beton sınıfını arttırmak, NC2 serisi ile KC2 serisi, NC4 serisi ile de KC4 serisi karşılaştırıldığı zaman kendiliğinden yerleşen beton tipi serisinin daha yüksek burulma momenti kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

3- Etriye aralığının azalması burulma momenti kapasitesini arttırdığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada 80 mm etriye aralığına sahip olan kiriş numunelerinin, etriye aralığı 100 mm olan kiriş numunelerine göre yaklaşık %15 daha yüksek burulma momenti kapasitesine sahip oldukları deneysel olarak belirlenmiştir. Etriye aralığını azaltmak burulma momenti kapasitesini NC2 serisinde %2, NC4 serisinde %5, KC2 serisinde %17, KC4 serisinde %9 oranında arttırdığı tespit edilmiştir. Burulma momenti kapasitesindeki bu değişimin kendiliğinden yerleşen betonların normal betona göre burulma momenti kapasitesinde daha etkili olduğu ifade etmektedir.

4- Bu çalışmada kullanılan elastik, plastik ve yanal eğilme teorileri ile hesaplanmış teorik burulma momenti değerleri ile deneysel olarak elde edilen değerler karşılaştırıldığında yanal eğilme teorisi gerçeğe en yakın sonuçlar vermiştir. Betonda meydana gelen kırılma ne tam olarak elastik ne de tam plastik olmadığı için deneysel olarak elde edilen burulma momenti değerleri elastik teori değerlerinden fazla, plastik teori değerlerinden de düşük çıkmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde burulma momenti hesaplarında yanal eğilme teorisi 1970'li yıllarda kullanılmaya başlanmıştır. Fakat Avrupa'da burulma momenti hesaplarında elastik ve plastik teorilerinin harmanlaması yapılmıştır. Ülkemizde de burulma momenti hesabı için önerilen formüllerde Avrupa'nın ve ABD'nin kullanmış olduğu formüllerin harmanlaması yapılmıştır.

5- Deneysel olarak elde edilen burulma momenti kapasiteleri ile ACI, Eurocode-2 ve TS500-2000 standartlarının önerdiği formüllere göre hesaplanan teorik değerler karşılaştırıldığı zaman, en yakın sonuçlar TS500-2000'de elde edilmiştir.

6- Burulma momenti-dönme açısı ilişkisine baktığımız zaman kendiliğinden yerleşen beton tipi serisinin normal beton serisine göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Aynı şekilde yüksek dayanıma sahip serilerin düşük dayanıma sahip serilere göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Etriye aralığı 80 mm olan serilerin 100 mm olan serilere göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

7- Bütün deney numunelerinde meydana gelen çatlaklar benzerdir. Kiriş numunelerinde meydana gelen çatlaklar 45 derecelik açılar şeklinde olmuştur. Deney numunelerinde kritik burulma momenti değerine ulaşıldığı zaman kirişlerde 45 derecelik ve ani bir şekilde ilk çatlağın oluştuğu gözlemlenmiştir. Artan yük altında ilk çatlağı takip eden ve dallanma şeklinde meydana gelen diğer çatlaklar oluşmuştur. Beton dayanımı fazla olan serilerde çatlakların sayısının daha az olduğu gözlemlenmiştir. Kirişlerde meydana gelen ilk çatlaklar beton dayanımı yüksek olan serilerde daha büyük burulma momenti değerlerinde meydana gelmiştir.

8- KYB serilerinde meydana gelen maksimum çatlak genişliklerinin normal beton serilerinde ki çatlak genişliğinden daha küçük olduğu gözlemlenmiştir. KYB beton tipini kullanmak maksimum çatlak genişliğini %69 oranında azalttığı deneysel olarak ölçülmüştür. Bu durumun kendiliğinden yerleşen betonların gradasyonu ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

9- Deney numunelerindeki kritik burulma momenti değerleri karşılaştırıldığı zaman KYB serilerinin normal beton serilerine göre %35 daha fazla burulma momenti değerine ulaştığı tespit edilmiştir. KYB beton tipinin kritik burulma momenti değeri üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu deneysel olarak tespit edilmiştir. Benzer şekilde beton sınıfını arttırmak kritik burulma momenti değerini %30 arttırmıştır. Etriye aralığını azaltmak kritik burulma momenti değerini normal beton serilerinde %15, KYB serilerinde %20 oranında artmasına sebep olmuştur.

10- Deney numunelerindeki burulma momenti kapasiteleri ve kritik burulma momenti değerleri bir birine oldukça yakın çıkmıştır. Aynı şekilde burulma momenti kapasitesine ve kritik burulma momenti değeri karşılık gelen dönme açıları da bir birlerine yakın çıkmışlardır. Dolayısıyla test edilen betonarme kiriş elemanlarda ilk çatlak oluşuktan sonra artık kirişte önemli bir dayanım kaybının meydana geldiğini söyleyebiliriz.

11- KYB serilerinde ki kirişlerde meydana gelen çatlakların normal beton serilerindeki kirişlerde meydana gelen çatlaklara oranla daha az sayıda oldukları gözlemlenmiştir.

12- Burulma momenti kapasitesi, kritik burulma momenti değeri, dönme açısı, burulma momenti çatlakları parametrelerini ele aldığımız zaman kendiliğinden yerleşen beton tipinin, günümüzde yaygın şekilde kullanılan geleneksel betona oranla daha iyi sonuçlar verdiği deneysel olarak gözlemlenmiştir. Fakat kendiliğinden yerleşen betonun maliyetinin fazla olması bu beton tipinin ülkemizde kullanım alanının sınırlandırmaktadır. Kendiliğinden yerleşen betonun ülkemizde sınırlı kullanımından dolayı Türk Standartları'nda da kendine fazla yer bulamamasına neden olmaktadır. Aynı şekilde Deprem Bölgesinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik'te de

kendiliğinden yerleşen beton tipine rastlanılmamaktadır. Bu çalışma sayesinde kendiliğinden yerleşen betonun, betonarme kirişlerin burulma davranışı hakkında bir inceleme yapılmıştır. Bu bağlamda özel beton tiplerinin betonarme davranışı üzerindeki etkilerinin irdelenmesi beton teknolojisinin betonarme yapılardaki etkisinin açıklanması açısından kaçınılmazdır.

KAYNAKLAR

- Alyamaç, K.E., 2008. Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Lineer Olmayan Kırılma Mekanik Prensibiyle İncelenmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Anonim, 2000. TS500-2000, Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- Anonymous, 2008. ACI Committee 318, Building code requirements for structural concrete and commentary, American Concrete Institute, Detroit.
- Anonymous, 2004, Eurocode-2, Design of concrete structures part 1-1: General rules and rules for buildings, British Standards Institution, England.
- Bakhsh, A.H., Wafa F.F. and Akhtaruzzaman A.A., 1990. Torsional behavior of plain high-strength concrete beams. *ACI Structural Journal*, 87(5), 583-588.
- Celep, Z., 2011. Betonarme Yapılar. Beta Dağıtım, 6. Baskı, 864s, İstanbul.
- Chalioris, C.E. and Karayannis C.G., 2013. Experimental investigation of RC beams with rectangular spiral reinforcement in torsion. *Engineering Structures*, 56(2013), 286-297.
- Chalioris, C.E., 2008. Torsional strengthening of rectangular and flanged beams using carbon fibre-reinforced-polymers–Experimental study. *Construction and Building Materials*, 22 (1), 21-29.
- Collins, M. and Mitchell D., 1974. The behaviour of structural concrete beams in pure torsion. Phd. Thesis, University of Toronto, Department of Civil Engineering, Toronto.
- Csikós, Á. and Hegedűs I., 1998a. Torsion of reinforced concrete beams, *Proceedings of the 2nd international PhD symposium in civil engineering*, Budapest.
- Csikós, Á. and Hegedűs, I., 1998b. Torsion of reinforced concrete beams. *Proceedings of the 2nd international PhD symposium in civil engineering*, Budapest.
- Dinç, A., 2007. Kendiliğinden yerleşen çelik lif donatılı betonların mekanik davranışına su/ince malzeme oranı ve lif dayanımının etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Doğangün, A., 2008. Betonarme yapıların hesap ve tasarımı: DBYBHY-2007 TS500-2000 ve Deprem yönetmeliği-2007'ye uygun. Birsen yayınevi, 6. Baskı, 842s, İstanbul.
- Domone, P.L., 2007. A review of the hardened mechanical properties of the self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, 29(1), 1-12.
- Ersoy, U., 1975. Betonarmede Burulma. Güven Kitapevi, 1. Baskı, 94s, Ankara.
- EFNARC, 2002. Specification and guidelines for self-compacting concrete. EFNARC, Association House, 99 West Street, Farnham, UK.
- EFNARC, 2005. European guidelines for self compacting concrete-specification, production and use, The European Federation of Specialist Construction Chemical and Concrete Systems.
- Felekoğlu, B., 2003. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

- Gürses, O., 2008. Kendiliğinden yerleşen betonların özellikleri ve uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Hsu, T.T., 1968. Torsion of structural concrete-behavior of reinforced concrete rectangular members. ACI Special Publication, 18(1968).
- Kamiński, M. and Pawlak W., 2011. Load capacity and stiffness of angular cross section reinforced concrete beams under torsion. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 11(4), 885-903.
- Kandemir, A., 2005. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kalıcılık Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Kayan, İ., 1992. Cisimlerin mukavemeti. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, 2.Baskı, 732s, İstanbul.
- Kaymak, H., 2010. Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Metakaolin ve Kalsit Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Khayat, K.H. and Guizani Z., 1997. Use of viscosity-modifying admixture to enhance stability of fluid concrete. ACI Materials Journal, 94(4), 332-340.
- Koutchoukali, N.-E. and Belarbi A., 2001. Torsion of high-strength reinforced concrete beams and minimum reinforcement requirement. ACI Structural Journal, 98(4), 462-469.
- Kuyt, B., 1968. Ultimate Torsional Resistance Of Rectangular Reinforced Concrete Beams. Concrete, 2(12), 522-530.
- MacGregor, J.G. and Ghoneim M.G., 1995. Design for torsion. ACI Structural Journal, 92(20), 211-218.
- Onsongo, W.M., 1978. The diagonal compression field theory for reinforced concrete beams subjected to combined torsion, flexure and axial load. Phd. Thesis, University of Toronto, Toronto.
- Orhan, E., 2012. Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Katkı Oranlarının Değişiminin Beton Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Öztekin, E., 2007. Farklı Şekilde Donatılmış Yüksek Performanslı Betonarme Kirişlerin Burulma Momenti Etkisindeki Davranışlarının Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Öztürk, O., 2007. FRP ile Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerin Burulma Davranışı. Yüksek Lisans, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Panchacharam, S. and Belarbi A., 2002. Torsional behavior of reinforced concrete beams strengthened with FRP composites. First FIB Congress, Osaka, Japonya.
- Pawlak, W. and Kamiński M., 2012. Cracking of reinforced concrete beams under torsion—theory and experimental research. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 12(3), 368-375.
- Pope A.M. and Schutter G.D., 2005. Creep and shrinkage of self-compacting concrete. First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, Çin.
- Rasmussen, L. and Baker G., 1995. Torsion in reinforced normal and high-strength concrete beams part 1: experimental test series. ACI Structural Journal, 92(1), 56-65.

- Thürlimann, B., 1968. Torsionsversuche an Stahlbetonbalken. Institut für Baustatik, 100 s, Zürich.
- Uygunoğlu, T., 2008. Hafif agregalı kendiliğinden yerleşen betonların özellikleri. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Yardımcı, M.Y., 2007. Çelik lifli kendiliğinden yerleşen betonların reolojik, mekanik, kırılma parametrelerinin araştırılması ve optimum tasarımı. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Zhang, Y., 2002. Torsion in high strength concrete rectangular beams. MS Thesis, University of Nevada, Reno, Nevada.

ÖZGEÇMİŞ

07.01.1988 yılında Erzurum'un Şenkaya ilçesinde doğan Barış BAYRAK, ilk ve orta öğrenimini Erzurum 70. Yıl Cumhuriyet İlköğretim Okulu'nda tamamladı. Lise öğrenimini Erzurum Mehmet Akif Ersoy Lisesi'nde tamamladıktan sonra 2008 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2012 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. Bayrak, 2012 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Ana Bilim Dalında başladığı yüksek lisans öğrenimini 10 Aralık 2015 te tamamladı.