

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FARKLI ŞEKİLDE DONATILMIŞ YÜKSEK PERFORMANSLI BETONARME  
KİRİŞLERİN BURULMA MOMENTİ ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞLARININ  
DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**İnş. Yük. Müh. Ertekin ÖZTEKİN**

**TEMMUZ 2007  
TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**FARKLI ŞEKİLDE DONATILMIŞ YÜKSEK PERFORMANSLI BETONARME  
KİRİŞLERİN BURULMA MOMENTİ ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞLARININ  
DENEYSEL VE TEORİK OLARAK İNCELENMESİ**

**İnş. Yük. Müh. Ertekin ÖZTEKİN**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“Doktor”  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10.05.2007  
Tezin Savunma Tarihi : 03.07.2007**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Metin HÜSEM  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Yusuf AYVAZ  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Kadir GÜLER**

**Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Emin Zeki BAŞKENT**

**Trabzon 2007**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı 'nda Doktora Tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

“Farklı Şekillerde Donatılmış Yüksek Performanslı Beton Kirişlerin Burulma Momenti Etkisindeki Davranışlarının Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi” konusundaki bu çalışmayı bana önererek, diğer önemli görevlerine rağmen, çalışmamın başlangıcından sonuna kadar sürekli takip edip, çalışmam boyunca bana araştırma zevki ve bilimsel düşünce disiplini aşılama için uğraş veren, tezimin her aşamasında bilgi ve tecrübesinden yararlandığım yönetici hocam Sayın Doç. Dr. Metin HÜSEM 'e minnet ve şükranlarımı sunarım.

Deneysel çalışmalar için yüksek performanslı beton üretiminde büyük katkıları olan KUL HAZIR BETON SANAYİ LİMİTED ŞİRKETİ 'ne en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam esnasında görüş ve yorumlarından yararlandığım, doktora tez izleme komitesi üyeleri, Sayın Prof. Dr. Yusuf AYVAZ ve Sayın Prof. Dr. Burhan ÇUHADAROĞLU 'na teşekkürlerimi sunarım.

Değerli zamanlarını ayırarak tezimi değerlendiren hocalarım Sayın Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ ve Sayın Prof. Dr. Kadir GÜLER 'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında yakın ilgi ve yardımlarını gördüğüm başta Sayın Yrd.Doç.Dr. Selim PUL olmak üzere, Arş.Gör. Selçuk Emre GÖRKEM ve yardımları dokunan diğer tüm bölüm arkadaşlarıma teşekkür ederim. Her zaman olduğu gibi deneysel çalışmalarım esnasında da yardımına koşan çocukluk arkadaşım ve dostum Merdin PEHLİVAN 'a özellikle teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca bana emeği geçen tüm hocalarımı saygıyla anar, kendilerine minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Tüm hayatım süresince olduğu gibi bu çalışma sürecinde de beni sabır ve şefkatle destekleyen anneme, baba ve biricik kız kardeşime müteşekkir olduğumu belirtir çalışmamın ülkemize yararlı olmasını temenni ederim.

Ertekin ÖZTEKİN

Trabzon 2007

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Yüksek Performanslı Betonun Tanımı ve Tarihsel Gelişimi.....	2
1.3. Burulma Momentinin Tanımı ve Burulma Hakkında Genel Bilgiler.....	3
1.3.1. Burulma Momenti Hesaplamalarında Dikkate Alınan Yaklaşımlar.....	6
1.3.1.1. Elastisitede Burulma.....	6
1.3.1.2. Coulomb Burulması.....	6
1.3.1.3. Elastisitede Dairesel Kesitli Olmayan Çubukların Burulması.....	7
1.3.1.4. Burulmada Membran Benzeşimi.....	7
1.4. Betonarmenin Burulma Etkisi Altındaki Davranışı.....	7
1.5. Çatlama Öncesi Burulma Teorileri.....	10
1.5.1. Elastik Teori.....	10
1.5.2. Plastik Teori.....	11
1.5.3. Yanal Eğilme Teorisi .....	13
1.5.4. ACI 318-99 'daki Yaklaşım.....	15
1.6. Çatlama Sonrası Teoriler.....	16
1.6.1. Betonarme Elemanlarda Yanal Eğilme Teorisi.....	16
1.6.2. Uzay Kafes Benzeşimi.....	17
1.6.3. Diyagonal Basınç Alanı Teorisi.....	19
1.7. Literatürde Burulma İle İlgili Yapılmış Olan Çalışmalar.....	20

1.8.	Bazı Standartlarda Burulma Etkisi ile İlgili Öneriler.....	37
1.8.1.	EuroCode-2.....	37
1.8.2.	ACI 318-1995.....	39
1.8.3.	TS 500-2000.....	40
1.9.	Çalışmanın Amacı.....	41
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	43
2.1.	Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	43
2.1.1.	Agrega Özellikleri.....	44
2.1.2.	Çimento, Su, Mineral ve Kimyasal Katkı Maddelerinin Özellikleri.....	45
2.1.3.	Karışım Suyu Özellikleri.....	45
2.1.4.	Mineral ve Kimyasal Katkı Maddelerinin Özellikleri.....	45
2.1.5.	Donatı Özellikleri.....	46
2.2.	Deney Numuneleri ve Üretimi.....	47
2.2.1.	Deney Numuneleri.....	47
2.2.2.	Beton Üretimi, Yerleştirilmesi ve Kürü.....	56
2.3.	Deney Düzeneği ve Burulma Deneyleri.....	60
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	64
3.1.	Burulma Deneylerinin Değerlendirilmesi.....	64
3.2.	Burulma Momentinin Tahmini.....	111
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	120
5.	KAYNAKLAR.....	125
	ÖZGEÇMİŞ	

## ÖZET

Yüksek performanslı betonların kullanımı giderek yaygınlaşmasına rağmen, bu tür betonların özellikleri geleneksel betonların özellikleri kadar iyi bilinmemektedir. Gerçekten de, yürürlükteki yönetmeliklerde betonarme ve öngerilmeli beton yapıların hesap ve projelendirilmesinde kullanılan bağıntı, hüküm ve önerilerin çoğu, basınç dayanımı yaklaşık 50 MPa 'ya kadar olan betonlar üzerinde gerçekleştirilmiş olan deneylerden elde edilen verileri temel almaktadır. Özellikle betonarmenin monolitik özeliği ve doğrusal elastik olmayan davranışı yüzünden son derece karmaşık ve kesin çözümü olanaksız olarak ortaya çıkan burulma etkisinin projelendirme kriterleri yüksek performanslı betonlar için ise yeterli değildir.

Betonarme elemanların burulma momenti etkisi altındaki dayanımı; eğilme, kesme ve basınç etkileri gibi diğer etkiler altındaki dayanımlarından düşüktür. Şüphesiz ki yüksek performanslı beton kullanımıyla betonarme elemanların burulma dayanımlarında artış sağlanabilmektedir. Ancak betonarme elemanların donatı düzeninin burulma dayanımlarını artırıp artırmayacağı pek iyi bilinmemektedir.

Bu çalışmanın temel amacı betonarme kirişlerin donatı düzeninin burulma dayanımları üzerindeki etkilerini incelemektir. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışma beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde genel bilgiler verilmekte olup, ikinci bölümde çalışmanın amacı doğrultusunda donatı düzeni farklı yüksek performanslı betonarme kirişlerin üretiminden, burulma deney düzeneğinin oluşturulmasından ve burulma deneylerinden bahsedilmektedir. Çalışmanın üçüncü bölümünde deneylerden elde edilen bulgular irdelenerek, burulma momentinin teorik hesabı için yapılan çalışmalardan bahsedilmektedir. Çalışmanın bütününden çıkarılabilecek sonuç ve öneriler dördüncü bölümde özetlenmekte olup bu bölümü beşinci bölümdeki kaynaklar dizini izlemektedir.

Elde edilen sonuçlar; yüksek performanslı betonarme kirişlerin farklı şekilde donatılması ile burulma davranışlarının değiştiğini göstermektedir. Bazı donatı düzeninin burulma dayanımını, bazılarının ise deformasyon davranışını değiştirdiği görülmüştür. Ayrıca bu çalışmada teorik burulma momentinin tahmini için sunulan bağıntıların, literatürdeki bağıntılarla karşılaştırılarak, deney sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler :** Yüksek Performanslı Beton, Burulma, Basit Burulma, Burulma Momenti, Farklı Donatılmış Kirişler

## SUMMARY

### **Investigations of Torsional Behaviour of High Performance Reinforced Concrete Beams Having Different Reinforcement Arrangements Under The Pure Torsion**

Although high performance concrete (HPC) is commonly used, its properties are not known as much as the properties of ordinary concrete. Indeed, most of equations, rules and suggestions given in codes used in the design of reinforced concrete and prestressed concrete structures are developed from the data obtained from experimental studies made on concrete that have a strength of less than about 50 MPa. Especially, the reason of the monolithic structure and non-linear-elastic behaviour of concrete, the equations used for design, aren't convenient for the HPC members.

Most structural members have been affected by torsional effects for the reasons of the nonsymmetrical loadings and structural geometries. Generally these effects are not effective as much as the other sectional effects in a member. Torsional resistance are able to increased by using HPC. But, the main purpose of these study is to investigate of whether torsional resistance is able to increased or not by using different reinforcement.

The study consists of five chapters. In the first chapter, general information is presented. In second chapter, experimental setup, producing high performance reinforced concrete beams and torsion mechanism are described. In the third chapter, experimental findings are presented by graphics and photos, some examines are realized on findings, and a new approximation is presented to predict torsional moment in this chapter. The conclusions drawn from the results of this study and suggestions are presented in fourth chapter. This last chapter is followed by the list of references.

The conclusions obtained from this study showed that, different reinforcement arrangements change the behaviour of the HPC in pure torsion. While some arrangements are change the strength and another some are change the deformation behaviour. Furthermore, a new formulation is proposed to predict the torsional moment capacity of beams made of HPC.

**Key words :** High Performance Concrete, Torsion, Pure Torsion, Torsional Moment, Reinforcement Arrangement.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.	Burulma etkisine maruz bazı yapılar .....	4
Şekil 2.	Uygunluk burulması.....	5
Şekil 3.	Denge burulması.....	5
Şekil 4.	Burulma momentine maruz dikdörtgen kesitli donatısız bir kirişin kırılması.....	8
Şekil 5.	Burulma momentine maruz dikdörtgen kesitli donatılı bir kirişin çatlamaşı	8
Şekil 6.	Basit burulma altındaki betonarme kirişlerde, burulma-birim dönme açısı ilişkisinin şematik gösterilmesi.....	9
Şekil 7.	Elastik teoriye göre basit burulma etkisindeki dikdörtgen kesitlerdeki kayma gerilmesi dağılımı.....	11
Şekil 8.	Plastik teoriye göre basit burulma etkisindeki dikdörtgen kesitlerdeki kayma gerilmesi dağılımı.....	12
Şekil 9.	Kum tümseği analogisi ve kesitin dikdörtgenlere bölünmesi.....	12
Şekil 10.	Yanal eğilme teorisine göre beton bir elemanın kırılma yüzeyi.....	14
Şekil 11.	Yanal eğilme teorisine göre kırılma eksenini ve burulmanın eğilme bileşenleri.....	15
Şekil 12.	Betonarme elemanlar için yanal eğilme teorisi.....	17
Şekil 13.	Uzay kafes benzeşimi.....	18
Şekil 14.	Basınç alanı teorisine göre kayma akımı.....	19
Şekil 15.	Koutchoukali ve Belarbi' nin basit burulma deneylerini gerçekleştirdikleri düzenek.....	23
Şekil 16.	Rao ve Seshu 'nun basit burulma deneylerinin gerçekleştirdikleri düzenek	32
Şekil 17.	Çift eksenli kayma gerilmesi ve burulma düzeneği.....	34
Şekil 18.	Kiriş kenar yüzlerine yerleştirilmiş olan farklı donatılar.....	35
Şekil 19.	Eurocode-2 'de burulma momenti hesabı için önerilen ince cidarlı kesit....	38
Şekil 20.	Dikdörtgen, tablalı, kutu ve çok kenarlı dış bükey enkesitler.....	41
Şekil 21.	TDG CODA marka veri toplama sistemi.....	44
Şekil 22.	Beton karışımına giren agrega granülometrisi.....	44
Şekil 23.	Üniversal deney aleti.....	47
Şekil 24.	Hidrolik pres.....	59



Şekil 25.	Ortalama gerilme şekildeğiştirme grafiği.....	59
Şekil 26.	Şematik olarak burulma deney düzeneği.....	60
Şekil 27.	Burulma deney düzeneğinin mesnetleri.....	60
Şekil 28.	Kirişin ankastre mesnede cıvatalar ve destek plakaları ile tespiti.....	61
Şekil 29.	Kuvvet kolu düzeneği.....	61
Şekil 30.	Beton veya betonarme kirişlerin basit mesnet detayı.....	62
Şekil 31.	Burulma deney düzeneği ve ölçüm çerçevesi.....	62
Şekil 32.	Potansiyometrik cetveller.....	63
Şekil 33.	Piston ve yükölçer(Loadcell).....	63
Şekil 34.	Kirişin kendi eksenini etrafında $\alpha$ açısı kadar dönmesi.....	64
Şekil 35.	T1 ve T2 serisi kirişlerin B1 kirişlerine göre burulma momenti oranları....	66
Şekil 36.	Tüm kirişlerin donatısız B1 kirişine göre dönme açısı oranları.....	70
Şekil 37.	T1 Serisi kirişlerde maksimum moment ve bu momente karşılık gelen dönme açısı oranları.....	71
Şekil 38.	T2 Serisi kirişlerde maksimum moment ve bu momente karşılık gelen dönme açısı oranları.....	71
Şekil 39.	T1 ve T2 kiriş serilerinde nihai burulma momentinin maksimum burulma momentine oranı.....	72
Şekil 40.	Donatısız kirişlerin basit burulma momenti etkisinde oluşan kırılma yüzeyleri.....	73
Şekil 41.	T1B1 kirişinin deney sonrası kırılma durumu.....	73
Şekil 42.	T2B1 kirişinin deney sonrası kırılma durumu.....	74
Şekil 43.	T1B1 ve T2B1 kirişlerinin yan yüzlerindeki şekildeğiştirmelerin burulma momenti ile değişimi.....	75
Şekil 44.	T1B1 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	76
Şekil 45.	T2B1 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	76
Şekil 46.	T1B2 kirişinde oluşan çatlaklar.....	77
Şekil 47.	T2B2 kirişinde oluşan çatlaklar.....	77
Şekil 48.	T1B2 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	79
Şekil 49.	T2B2 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	79
Şekil 50.	T1B3 kirişinde oluşan çatlaklar.....	80
Şekil 51.	T2B3 kirişinde oluşan çatlaklar.....	81
Şekil 52.	T1B3 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	81
Şekil 53.	T2B3 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	82

Şekil 54.	T1B4 kirişinde oluşan çatlaklar.....	83
Şekil 55.	T2B4 kirişinde oluşan çatlaklar.....	83
Şekil 56.	T1B4 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	84
Şekil 57.	T2B4 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	85
Şekil 58.	T1B5 kirişinde oluşan çatlaklar.....	86
Şekil 59.	T2B5 kirişinde oluşan çatlaklar.....	86
Şekil 60.	T1B5 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	87
Şekil 61.	T2B5 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	87
Şekil 62.	T1B6 kirişinde oluşan çatlaklar.....	88
Şekil 63.	T2B6 kirişinde oluşan çatlaklar.....	88
Şekil 64.	T1B6 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	89
Şekil 65.	T2B6 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	90
Şekil 66.	T1B7 kirişinde oluşan çatlaklar.....	90
Şekil 67.	T2B7 kirişinde oluşan çatlaklar.....	91
Şekil 68.	T1B7 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	92
Şekil 69.	T2B7 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	92
Şekil 70.	T1B8 kirişinde oluşan çatlaklar.....	93
Şekil 71.	T2B8 kirişinde oluşan çatlaklar.....	93
Şekil 72.	T1B8 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	94
Şekil 73.	T2B8 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	95
Şekil 74.	T1B9 kirişinde oluşan çatlaklar.....	95
Şekil 75.	T2B9 kirişinde oluşan çatlaklar.....	96
Şekil 76.	T1B9 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	97
Şekil 77.	T2B9 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	97
Şekil 78.	T1B10 kirişinde oluşan çatlaklar.....	98
Şekil 79.	T2B10 kirişinde oluşan çatlaklar.....	99
Şekil 80.	T1B10 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	99
Şekil 81.	T2B10 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	100
Şekil 82.	T1B11 kirişinde oluşan çatlaklar.....	101
Şekil 83.	T2B11 kirişinde oluşan çatlaklar.....	101
Şekil 84.	T1B11 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	102
Şekil 85.	T2B11 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	102
Şekil 86.	T1B12 kirişinde oluşan çatlaklar.....	103

Şekil 87.	T2B12 kirişinde oluşan çatlaklar.....	103
Şekil 88.	T1B12 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	104
Şekil 89.	T2B12 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	105
Şekil 90.	T1B13 kirişinde oluşan çatlaklar.....	105
Şekil 91.	T2B13 kirişinde oluşan çatlaklar.....	106
Şekil 92.	T1B13 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	107
Şekil 93.	T2B13 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi.....	107
Şekil 94.	T1 seri kirişlerinin burulma momenti-rölatif dönme ilişkisi.....	109
Şekil 95.	T2 seri kirişlerinin burulma momenti-rölatif dönme ilişkisi.....	109
Şekil 96.	Plastisite teorisine göre dikdörtgen bir kesitteki gerilme bölgeleri, ve bu bölgelerdeki toplam gerilmelerin AB doğrusuna uzaklıkları.....	112
Şekil 97.	Kiriş yüzlerindeki çatlak oluşumları ve gerilme yönleri.....	112
Şekil 98.	Burulma çatlağındaki donatılarda oluşan kuvvet bileşenleri.....	115

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa No</u></b>
Çizelge 1. Dikdörtgen kesitli çubukların burulmasına ait en büyük gerilme ve rölatif burulma açısını belirleyen katsayılar.....	11
Çizelge 2. Agreganın fiziksel özellikleri.....	43
Çizelge 3. Agreganın mekanik özellikleri.....	43
Çizelge 4. Agreganın granülometrik bileşimi.....	45
Çizelge 5. Beton üretiminde kullanılan çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri.....	46
Çizelge 6. Silis dumanının yaklaşık kimyasal bileşimi.....	46
Çizelge 7. Deneysel kirişlerde kullanılan nervürlü donatıların bazı mekanik özellikleri.....	47
Çizelge 8. Burulma deneyleri için üretilen kirişlerin donatı düzenleri.....	48
Çizelge 9. Yüksek performanslı beton bileşimi.....	58
Çizelge 10. Standart silindirik numune dayanımları .....	59
Çizelge 11. Kirişlere etkiyen burulma momenti, dönme açıları ve değişim oranları.....	65
Çizelge 12. Çatlama öncesi ve çatlama sonrası rijitlikler.....	110
Çizelge 13. Beton ve betonarme kirişler için burulma momenti bağıntıları.....	117
Çizelge 14. B1, B2, B3, B4 ve B5 kirişleri için deneysel ve tahmin edilen burulma momenti değerleri.....	118
Çizelge 15. Bu çalışma kapsamında burulma momentinin tahmini için önerilen bağıntıların daha önce yapılmış olan deneysel çalışmalarla karşılaştırılması.....	119

## SEMBOLLER DİZİNİ

$A$	; Elemanın kesit alanı
$A_k$	; Kesit köşelerine yerleştirilen boyuna donatı ile belirlenen orta çizginin meydana getirdiği alan
$A_o$	; Kayma gerilmesinin meydana geldiği alan
$A_{oh}$	; Kesitin enine donatı ile sarılı alanı
$A_i$	; i bölgesinin alanını
$A_l$	; Boyuna donatı alanı
$A_t$	; Enine donatının kesit alanı
$b$	; Dikdörtgen kesitin kısa kenarı
$c$	; Beton örtü kalınlığı
$d$	; Enkesit faydalı yüksekliği
$E_c$	; Beton elastisite modülü
$E_s$	; Donatı elastisite modülü
$f_c'$	; Beton basınç dayanımı
$f_{ck}$	; Betonun karakteristik basınç dayanımı
$f_{ctk}$	; Betonun karakteristik çekme dayanımı
$f_r$	; Betonun kırılma dayanımını
$f_{sp}$	; Betonun yarma dayanımı
$f_{yl}$	; Boyuna donatının akma dayanımı
$f_{yv}$	; Enine donatının akma dayanımı
$G$	; Kayma modülü
$h$	; En kesitin uzun kenarı
$l_i$	; i bölgesinin ağırlık merkezinin AB doğrusuna en kısa uzaklığı
$P_o$	; Kayma gerilmesinin bulunduğu alanın çevre uzunluğu
$P_{cp}$	; Eleman enkesitinin çevre uzunluğunu
$R$	; Burulma rijitliği
$s$	; Enine donatı aralığı
$t$	; Tabla kalınlığı

$t_{ef,i}$	; Etkili cidar kalınlığı
$T_c$	; Beton kesitin burulma momenti taşıma gücü
$T_{cr}$	; İlk çatlağı oluşturan çatlama momenti
$u$	; Enkesitin en dış çevre uzunluğu
$u_k$	; $A_k$ alanının çevresi
$x_0$	; Beton örtü kalınlığı hariç kesit genişliği
$x_1$	; Enine donatının kısa kolunun uzunluğu
$y_0$	; Beton örtü kalınlığı hariç kesit yüksekliği
$y_1$	; Enine donatının uzun kolunun uzunluğu
$z_i$	; Cidar kenar uzunluğu
$\alpha$	; $h/b$ oranına bağlı bir katsayı
$\beta_i$	; $y_i/x_i$ oranına bağlı bir katsayı
$\epsilon_c$	; Betonun birim şekildeğiştirmesi
$\epsilon_{cu}$	; Betonun nihai birim şekildeğiştirmesi
$\epsilon_s$	; Donatının birim şekildeğiştirmesi
$\phi$	; Dönme açısı
$\rho$	; Asal çekme donatısı oranı
$\rho_{wo}$	; Etriye donatı oranı
$\sigma$	; Beton elemandaki burulmadan kaynaklanan gerilme
$\theta$	; Beton diyagonal eğimini, çatlak açısı
$\tau_{max}$	; Maksimum kayma gerilmesi
$\tau_t$	; Burulma momentinden kaynaklanan kayma gerilmesi
$\tau_{tcr}$	; Betonun bir eksenli çekme dayanımı

Not: Bu dizinde yer almayan bazı semboller metin içinde ilgili oldukları yerde açıklanmışlardır.

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Betonarme, kendisini oluşturan malzemelerin giderek kalitesinin artmasına paralel olarak gelişmiş ve bugün inşaatlarda yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesi haline gelmiştir. Ancak, artan ihtiyaçlara paralel olarak beton dayanım ve dayanıklılığını artıran bazı katkı maddelerinin de beton bileşiminde kullanılmaya başlamasıyla bugün “Yüksek Performanslı Beton” diye tanımlanan ve dayanımı 100 MPa’ı aşan betonlar, öngörülmesi beton ve betonarme yapılarda, özellikle yüksek yapılarda kullanım alanı bulmuş ve bu tür yapılarda projelendirme kriterlerini değiştirmeyi zorlar hale gelmiştir. Ancak her ne kadar yüksek performanslı betonun kullanımı artıyor olsa da henüz yüksek performanslı betonlar için yeterli projelendirme kriterleri mevcut değildir. Özellikle betonarmenin monolitik özelliği ve doğrusal elastik olmayan davranışı yüzünden son derece karmaşık ve çözümü imkansız denecek kadar zor olan burulma problemleri ve projelendirme kriterleri yeni bir yapı malzemesi olarak kabul edebileceğimiz yüksek performanslı betonlar için yeterli düzeyde değildir [1, 2, 3, 4]. Bazı betonarme yapı elemanları eğilme momenti, normal kuvvet ve kesme kuvvetinin etkisinde kalabildiği gibi, özellikle ızgara sistemler, düzlemde eğri köprüler, kenar kirişleri, merdiven ve balkon kirişleri, gibi betonarme yapı elemanları burulma momenti etkisi altında kalmaktadırlar. Dolayısıyla da bu yapı elemanlarının projelendirilmesinde burulma momentinin de dikkate alınması gerekmektedir.

Bu çalışmanın temel amacı farklı enkesit ve donatı düzenlerine sahip yüksek performanslı betonarme kirişlerin salt burulma etkisindeki davranışlarının araştırılmasıdır. Bu amaçla gerçekleştirilen bu çalışmada önce yüksek performanslı betonlar hakkında genel bilgi ile birlikte betonarme elemanların burulma etkisi altındaki davranışları, taşıma gücü ve burulma hesabı hakkında genel bilgiler verilmiştir. Daha sonra değişik donatı düzenine sahip olan yüksek performanslı betonarme kirişlerin, basit burulma momenti etkisindeki davranışları deneysel ve teorik olarak araştırılmış, elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

## 1.2. Yüksek Performanslı Betonun Tanımı ve Tarihsel Gelişimi

“Yüksek Performanslı Beton” yeni bir malzeme olarak düşünülmesine rağmen gelişimi uzun yıllar almıştır. Yüksek performanslı betonun gelişimine paralel olarak tanımı da sürekli değişmiştir. Örneğin, 1950’li yıllarda standart silindir (150mm x 300 mm) beton numunelerinin karakteristik basınç dayanımı 34 MPa olan betonlar “Yüksek Performanslı Beton” olarak tanımlanmaktaydı. 1960’lı yıllarda A.B.D.’de standart silindir basınç dayanımı 41 ile 52 MPa arasında olan betonlar ticari amaçlı olarak üretilmiştir. 1970’lerin ilk yıllarında betonların basınç dayanımı 60 MPa’ya kadar ulaşabilmiştir. Yakın geçmişte ise basınç dayanımı 80 MPa ile 100 MPa arasında değişen yüksek performanslı beton, yekpare prefabrik ve ön gerilmeli beton yapılarda kullanılmaya başlanmıştır. Çok yüksek dayanımlı agregalar kullanılarak üretilen betonlarda ise 250 MPa’lık dayanıma ulaşılabilmektedir [5, 6, 7, 8].

Yüksek performanslı beton tanımı zamana, betonun kullanıldığı bölgeye ve yaygın üretim teknolojisine göre değişmektedir. Diğer bir deyişle yüksek performanslı betonlar Türkiye’de bugün 28 günlük standart silindir beton numunelerinin karakteristik basınç dayanımı 40-50 MPa ’dan daha büyük olan betonlar olarak tanımlanabilmektedir. Ancak, geleneksel olarak kullanılan betonun basınç dayanımı 35 MPa iken, basınç dayanımı 60 MPa olan betonlar yüksek performanslı beton olarak kabul edilebilmektedir. Bununla birlikte, her ülkenin yapı şartnamelerinde bulunan beton basınç dayanım sınıflarının üzerindeki betonlar yüksek performanslı beton olarak adlandırılmaktadır. Örneğin CEB/FIB State-of-the Art Report [9] yüksek performanslı beton tanımı için minimum 60 MPa’lık maksimum 130 MPa’lık silindir basınç dayanımı öngörmekte iken TS500-1984 [10] ‘e göre 30 MPa ’nın, ACI 318-89 [11] a göre 41 MPa ’nın üzerindeki betonlar yüksek performanslı beton olarak adlandırılmaktadır.

Burada betonarmeye ilişkin bugün yürürlükte olan yönetmeliklerdeki projelendirme kriterleri, maksimum basınç dayanımı yaklaşık 50 MPa ’ya kadar değişen beton dayanımlarının kullanıldığı deney sonuçlarına bağlı olarak belirlenmekte, bu nedenle basınç dayanımı 50 MPa ’yı geçen bütün betonlar yüksek performanslı beton olarak düşünülerek, projelendirmede kullanılan geleneksel beton için önerilen kriterlerin yüksek performanslı betona uygulanmasında geçerliliklerinin incelenmesi gerektiğini belirtmek uygun olmaktadır [12, 13, 14].



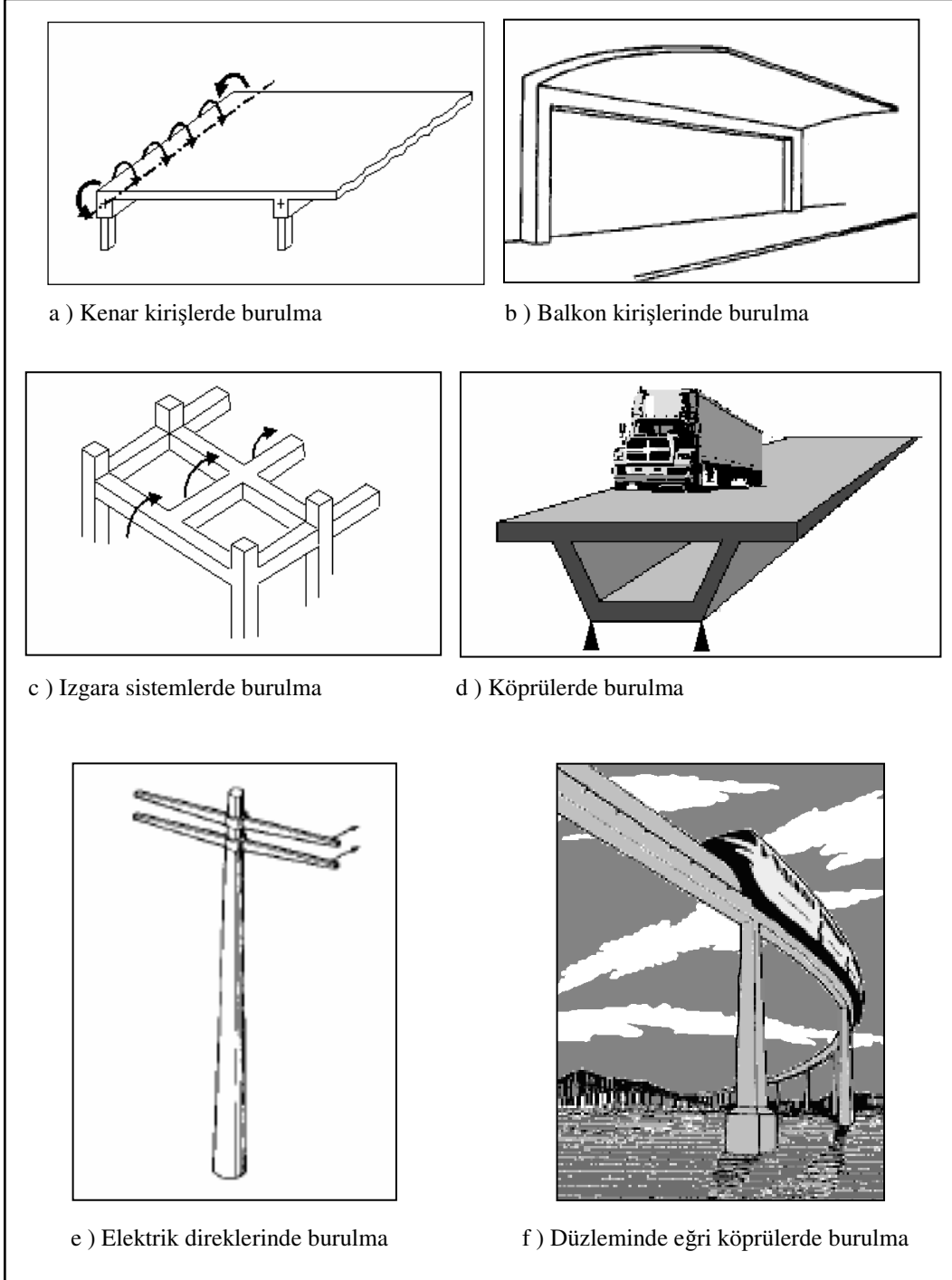
Yüksek performanslı betonların teknik literatürde bazen yüksek dayanımlı beton olarak adlandırıldığı bilinmektedir. Ancak bu betonların basınç ve çekme dayanımları yüksek olduğu gibi, geleneksel betona göre daha dayanıklı da olduklarından, bu çalışmada yüksek dayanımlı beton yerine *yüksek performanslı beton* deyimini tercih edilmiştir [12, 13].

### 1.3. Burulma Momentinin Tanımı ve Burulma Hakkında Genel Bilgiler

Enkesit düzleminde bulunan kuvvet çifti ile yüklü bir çubukta meydana gelen basit mukavemet hali, başka bir ifade ile bir çubukta sıfırdan farklı tek kesit etkisinin burulma momenti olması, *Burulma Momenti Hali* olarak tanımlanmaktadır [15]. Pratikte karşılaşılan yüklemelerin çoğunda burulma momenti, eğilme momenti, kesme kuvveti, hatta normal kuvvetle beraber bulunmaktadır. Burulma momenti nadiren bir elemana yalnız başına etkimektedir. Ancak kompleks burulma davranışlarının öğrenilebilmesi için basit burulma halinin bilinmesi ilk temel adımı oluşturmaktadır.

Yapı sistemlerinin geometrisinden veya yüklerin simetrik olmayan yayılışlarından dolayı yekpare (monolitik) betonarme yapılarda, yapı elemanlarının büyük bir çoğunluğu az veya çok burulma momentine maruzdurlar [16, 17]. Ancak burulma momentinin mertebesi diğer kesit etkilerinin yanında küçüktür. Pratikte burulma hesabına en çok kenar kirişler, merdiven ve balkon kirişleri gibi elemanlarda rastlanır. Ayrıca, ızgara sistemlerde, düzleminde eğri köprülerde, köşe kolonlarda, kenar ve balkon kirişlerinde burulma, sistemin ayrılmaz parçasıdır (Şekil 1). Hesabı yapılan elemana etkileyen burulma momentinin saptanması, bunun diğer elemanlara dağılışı, betonarmenin yekpare özeliği ve doğrusal elastik olmayan davranışı yüzünden son derece karmaşık ve kesin çözümü olanaksız bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Elemana gelen burulma momenti doğru olarak saptanabilse bile, kesit mukavemetinin tam olarak hesaplanabilmesi zordur [16, 17].

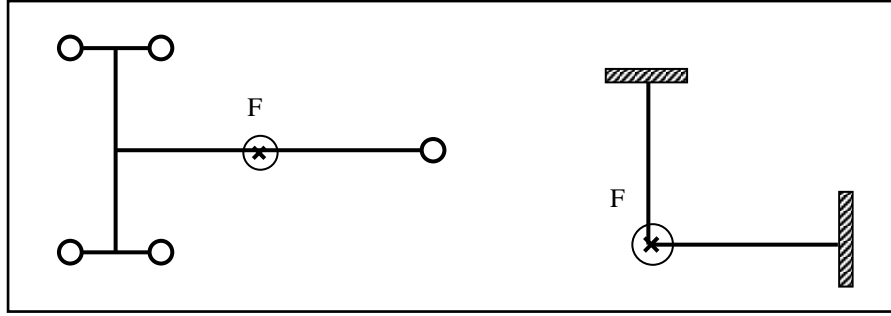
Burulma tarihte zaman zaman önemle dikkate alınarak, şartnamelere bu nedenle ağır hükümler konulurken, zaman zaman da burulmanın fazla önemli olmadığı kanısıyla şartnamelerdeki burulma ile ilgili olan hükümler yumuşatılmıştır. Bu iki ekstrem arasında sürekli gidilip gelinmiştir. Buna da yapılmış olan burulma hesaplarının pratikteki uygulamalar ile çelişkili olması neden olmuştur [16,17].



Şekil 1. Burulma etkisine maruz bazı yapılar [18]

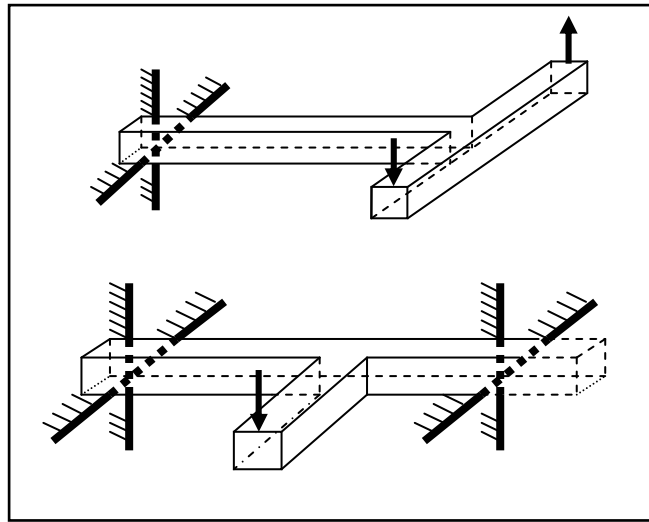
Bilindiği gibi yapı elemanları burulma momenti yanında genellikle eğilme momenti ve kesme kuvveti etkisinde de bulunurlar. Burulma etkisinin yalnız başına çıktığı duruma ender olarak rastlanır. Yapı elemanlarında ortaya çıkan burulma uygunluk burulması ve denge burulması olarak iki bölümde incelenebilir [2, 16, 17].

Burulma momentinin belirlenmesinde denge denklemlerinin yeterli olmadığı, bunun yanında elemanlarının şekildeğişirmelerinin de gerekli olduğu burulma türü uygunluk burulması olarak tanımlanmaktadır. Bu statik bakımdan belirsiz burulma etkisi olarak da isimlendirilir. Bu tür burulma momentinin ihmal edilmesi taşıyıcı sistemde çatlamalara ve etkilerin yeniden dağılarak dengenin oluşmasına neden olur [2, 16, 17, 19]. Şekil 2. de uygunluk burulmasının oluşabileceği sistemlere bazı örnekler verilmiştir.



Şekil 2. Uygunluk burulması

Statik bakımdan belirli burulma etkisi olarak da isimlendirilen denge burulması etkisinde, burulma momenti dış kuvvetlerden denge denklemleri kullanılarak belirlenebilir. Bu tür burulma momentinin ihmal edilmesi taşıyıcı sistemde dengenin sağlanamamasına sebep olabilir [2]. Bu nedenle tasarımda muhakkak göz önüne alınmalıdır. Şekil 3 'de denge burulmasının oluşabileceği sistemlere örnekler verilmiştir..



Şekil 3. Denge Burulması

### 1.3.1. Burulma Momenti Hesaplamalarında Dikkate Alınan Yaklaşımlar

#### 1.3.1.1. Elastisitede Burulma

Bu yaklaşımda, burulmanın meydana gelebilmesi için elemanın yalnız enkesit düzlemleri içerisinde bulunan kuvvet çiftleri ile yüklü bulunması gerekir. Aksi halde çubukta burulma momentinden başka diğer kesit zorlarının bazıları daha bulunabilir ki, böyle haller artık basit mukavemet hali olarak tanımlanmazlar. Pratikte karşılaşılan yüklemelerin çoğunda burulma momenti, gerçekten, eğilme momenti, kesme kuvveti hatta normal kuvvetle beraber bulunursa da bu haller bileşik mukavemet halleri içersine girer. Ender de olsa pratikte basit burulma momenti hali mevcuttur [15].

Aslında statikçe belirsiz bir problem olan gerilme yayılışı problemi, çubuğun yük altındaki şekil değiştirme biçimi hesaba katılmadan çözülemez. Ancak kesin çözüm yolları elastisite teorisinde belirtilen, aksenal kuvvet halinde olduğu gibi, çubuğun şekil değiştirme biçimi hakkında deneysel ve gözlemsel verilere dayanarak yapılan varsayımlar kullanarak yaklaşık olarak çözülebilir [15]. Bu yolla kesin veya yaklaşık çözüm, ancak daire, daire halkası ve ince kenarlı kapalı tüp enkesitli prizmatik çubuklar için belirlenebilir. Bunların dışında olan çubuklarda analitik yolla, yaklaşık olarak dahi, bir çözüm bulma olanağı mevcut değildir [15].

#### 1.3.1.2. Coulomb Burulması

Daire ve daire halkası enkesitli prizmatik çubukların burulma problemi ilk defa Fransız bilgini Coulomb tarafından çözülmüştür; bu nedenle bu tür burulmaya çoğu kere Coulomb burulması adı verilmektedir [15, 20, 21]. Coulomb, burulma momenti ile yüklü daire ve daire halkalı çubukların şekil değiştirme üzerinde yaptığı gözlemlere dayanarak bu tür çubukların şekil değiştirme üzerinde aşağıda belirtilen varsayımları yapmıştır [15, 20, 21].

- a) Burulmadan evvel düzlem olan çubuk enkesitleri burulmadan sonra da düzlem kalırlar.
- b) Enkesitlerin yaptıkları şekil değiştirme hareketi çubuk eksenine etrafındaki bir katı cismin dönme hareketidir.
- c) Enkesitlerin burulma esnasında çubuk eksenine etrafında yaptıkları dönme açıları, çubuğun sabit burulma momenti ile yüklü olması halinde, bu enkesitlerin çubuk eksenine üzerindeki herhangi bir noktadan olan uzaklıkları ile orantılıdır.

### 1.3.1.3. Elastisitede Dairesel Kesitli Olmayan Çubukların Burulması

Dairesel enkesitli olmayan çubukların, burulma esnasındaki şekildeğiştirmesinde, Coloumb burulmasında sözü edilen varsayımlardan birincisi geçerli değildir. Böyle çubuklarda düzlem kesitler burulmadan sonra düzlem kalmayıp çarpılırlar. Bu çarpılma sonucu artık ikinci varsayım geçerli olmaz, yani kesitler burulma şekildeğiştirmesinde bir katı cisim dönme hareketi yapmazlar [15, 20, 21].

### 1.3.1.4. Burulmada Membran Benzeşimi

Burulma ile yakından uzaktan ilgisi olmayan bir deliğin üzerine gerilmiş bulunan çok ince bir zarın (membran) bir tarafındaki farklı hava basıncı sonucu delik üzerinde kubbeleşerek oluşturduğu yüzeyin bulunması probleminin diferansiyel denklemi ve sınır şartları, burulmanınki ile tamamen aynıdır. Oluşan bu yüzeyden aşağıda maddeler halinde verilen benzerliklerden yararlanılmaktadır [22, 23].

- Herhangi bir noktadaki kayma gerilmesi, membranın aynı noktasındaki eğimi ile orantılıdır ve doğrultusu o noktadan geçen eş yükseklik eğrisine teğettir (yani en büyük eğim doğrultusuna diktir).

- Membranın altında kalan hacmin iki katı, delik biçimli enkesitin taşıdığı burulma momenti ile orantılıdır.

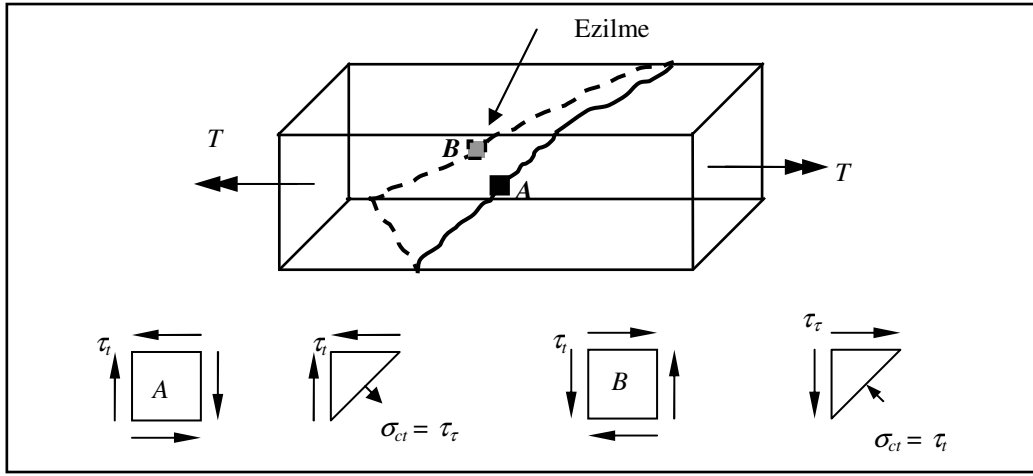
## 1.4. Betonarmenin Burulma Etkisi Altındaki Davranışı

Betonarme elemanların burulma hesabında, burulma momentinin belirlenmesi ve enkesitin taşıyabileceği burulma momentinin hesabı olmak üzere başlıca iki aşama vardır. Bu aşamalarda burulma momentini saptanmasında çatlamaı ihmal eden doğrusal-elastik bir yöntem kullanmak çok yanıltıcı sonuçlar verebilir. Çünkü, burulma çatlamaı, eğilme ve kesme çatlamaından farklı olarak, rijitliği büyük ölçüde değiştirmekte ve oluşan uyum ihmal edilemeyecek büyüklüklere ulaşmaktadır. Bu nedenle burulma momenti hesaplanırken, burulma çatlamaı mutlaka dikkate alınmalıdır [2, 16, 17].

Burulma momenti betonarme yapı elemanlarına çoğunlukla eğilme momenti ve kesme kuvveti ile birlikte etkimektedir. Basit burulma ise çok nadir olarak görülen akademik bir

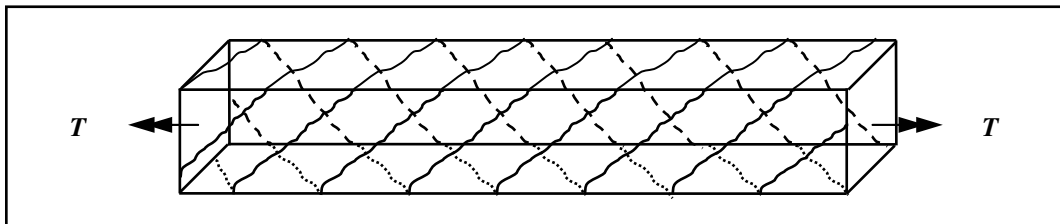
konu olmakla birlikte, çeşitli etkiler altındaki elemanların davranışlarının incelenebilmesi için bu elemanların basit burulma altındaki davranışının bilinmesi gerekmektedir [16, 17].

Dikdörtgen enkesitli, donatısız bir beton kiriş, basit burulma altında, ilk çatlamanın oluşması ile son derece ani ve gevrek bir biçimde kırılmaktadır. Şekil 4 'den de görüldüğü gibi çatlaklar kirişin üç yüzünde asal çekme gerilmelerine ( $\sigma_{ct}$ ) dik yönde oluşurken, dördüncü yüzde ezilme oluşmaktadır. Bu ezilme yaklaşık olarak asal basınç gerilmelerine dik yöndedir [16, 17].



Şekil 4. Burulma momentine maruz dikdörtgen enkesitli donatısız bir kirişin kırılması

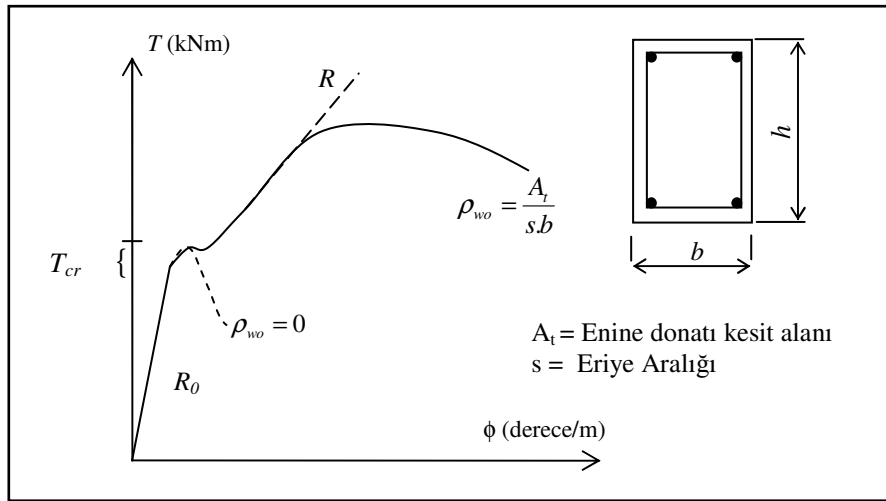
Kirişe yerleştirilen boyuna donatı, donatısız kirişin gösterdiği davranışı değiştirmemektedir. Ancak, enine donatı ve boyuna donatı birlikte kullanıldığında, davranış değişmekte ve kiriş ilk çatlakların oluşmasıyla kırılmamaktadır. Şekil 5. de gösterildiği gibi, kırılma konumuna ulaşılmadan asal çekme gerilmelerine dik yönde çok sayıda çatlak oluşmaktadır. Enine donatı ve boyuna donatının varlığı, burulmadaki taşıma gücünü de büyük ölçüde artırmaktadır [16, 17].



Şekil 5. Burulma momentine maruz dikdörtgen enkesitli donatılı bir kirişin çatlaması

Boyuna donatı kullanılmadan, salt enine donatı ile donatılmış kirişler de tıpkı donatısız kirişler gibi davranmaktadır. Bu enine donatının tek başına etkili olmadığını, burulma için mutlaka boyuna donatı ile birlikte kullanılması gerektiğini göstermektedir. Betonarme kirişlerde burulma çatlaklarının oluşması ile deney elemanlarının boyu uzamaya başlar ve birim boydaki uzama ihmal edilemeyecek büyüklüklere ulaşır ( $\epsilon_x=1.5 \times 10^{-3}$ ). Birim boydaki bu uzama ile boyuna donatıdaki birim uzama birbirleriyle özdeştir. Bu da boyuna donatının önemini ortaya koymaktadır [16, 17].

Burulma momenti-birim dönme açısı ( $T-\phi$ ) eğrilerinin eğimi, betonarme elemanların burulma rijitliğini göstermektedir (Şekil 6). Bu şekilden de görüldüğü gibi, burulma çatlama düzeyine kadar davranış doğrusaldır. Eğrinin bu doğrusal bölümü burulma donatısı dışında diğer tüm özellikleri özdeş olan elemanlar için özdeştir. Bu yüzden bazı araştırmacılar tarafından burulma çatlama öncesindeki burulma rijitliğinin donatıdan bağımsız olduğu sonucuna varılmıştır [2, 17]. Literatürde yapılmış olan diğer deneyler bu eğimin, kesme kuvveti ve eğilme momentinden de fazla etkilenmediğini,  $T-\phi$  eğrisinin çatlama kadar doğrusal kalan bu parçasının eğiminin (burulma rijitliği), elastisite teorisine göre hesaplanabileceğini göstermiştir [17].



Şekil 6. Basit burulma etkisindeki betonarme kirişlerde, burulma-birim dönme açısı ilişkisinin şematik gösterilmesi [17]

Çatlama kadar burulma rijitliği ( $R_0$ ),  $b$ ; dikdörtgen enkesitin kısa kenarını,  $h$ ; uzun kenarını,  $\beta$ ;  $h/b$  oranına bağlı bir katsayıyı (betonarmede  $\beta$  yaklaşık 3 alınabilir),  $G$  kayma modülünü göstermek üzere;

$$R_0 = \frac{T}{\phi} = G \sum \beta b^3 h \quad (1)$$

bağıntısı ile hesaplanabilmektedir. Burada tablalı enkesitlerde, enkesit dikdörtgenlere ayrılarak hesapların yapılabileceğini belirtmek uygun olmaktadır [16].

Betonarme elemana burulma momenti uygulandığında, burulma çatlama oluşuncaya kadar enine donatı ve boyuna donatıdaki birim şekildeğiştirmeler ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Burulma çatlama oluşmasıyla donatıdaki birim deformasyonlar birden artar ve dolayısıyla donatı etkili olmaya başlar. Burulma çatlama oluşması ile  $T-\phi$  eğrisinin eğimi (burulma rijitliği) önemli ölçüde azalmaktadır. Şekil 6 'da  $R$  olarak gösterilen çatlak sonrası eğim, burulma donatısına bağlı olarak değişmektedir [16,17].

Burulma çatlaklarının oluşmasıyla enkesit rijitliği yaklaşık olarak çatlama öncesi rijitliğinin 1/10-1/30 'u arasında değiştiği belirtilmiştir [16,17]. Burulma rijitliğinde gözlenen bu çapta bir azalma sonucu, enkesitin hemen hemen sabit kalan burulma momenti altında dönerek, zorlamaları diğer elemanlara aktarmaktadır. Bu durumda sistemde oluşacak uyum olayı ihmal edilemeyecek kadar önemlidir [16-17].

## 1.5. Çatlama Öncesi Burulma Teorileri

### 1.5.1. Elastik Teori

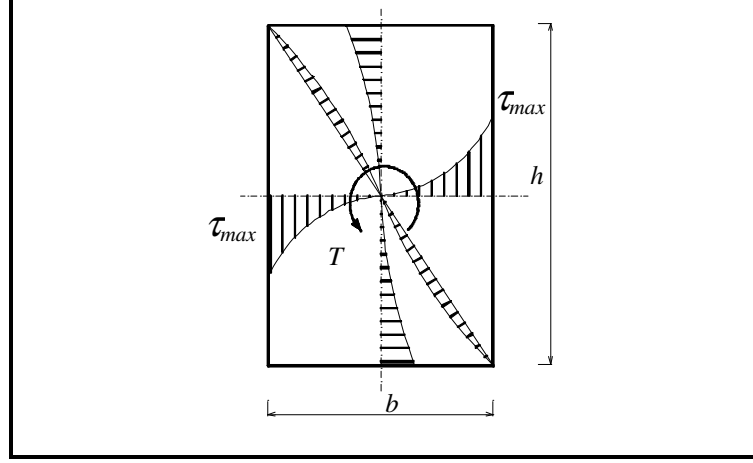
Burulma etkisindeki betonarme elemanlarda oluşan kayma gerilmeleri önceleri, elastisite teorisine göre hesaplanıyordu. Bu teoriye göre bir dikdörtgen enkesitteki gerilme dağılımı Şekil 7 'de verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi enkesitteki en büyük kayma gerilmesi uzun kenarın orta noktasında meydana gelmektedir.  $\tau_{max}$  ve  $T$  sırasıyla maksimum kayma gerilmesi ile burulma momentini göstermek üzere; dikdörtgen enkesitlerdeki en büyük kayma gerilmesi ile rölatif burulma açısı, dikdörtgenin kenar uzunlukları oranlarına bağlı katsayılar cinsinden (2) ve (3) nolu bağıntılarda verilmiştir [15].

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



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

Bu bağıntılarda  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları,  $h/b$  oranına bağlı olarak Çizelge 1 'de verilen değerleri almaktadırlar [11].



Şekil 7. Elastik teoriye göre basit burulma etkisindeki dikdörtgen enkesitlerde kayma gerilmesi dağılımı [15]

Çizelge 1. Dikdörtgen enkesitli çubukların burulmasına ait en büyük gerilme ve rölatif burulma açısını belirleyen katsayılar [15].

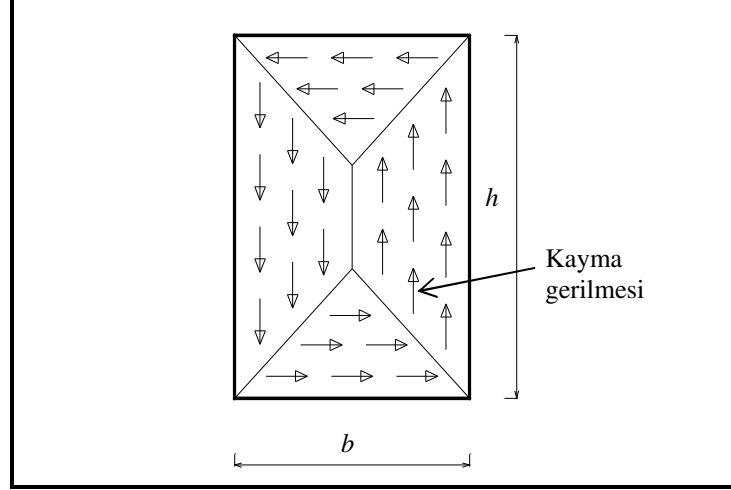
$h/b$	1.00	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	4.00	6.00	8.00	10.00	$\infty$
$\alpha$	0.208	0.231	0.239	0.246	0.258	0.267	0.282	0.299	0.307	0.313	0.33
$\beta$	0.141	0.196	0.214	0.229	0.249	0.263	0.281	0.299	0.307	0.313	0.33

### 1.5.2. Plastik Teori

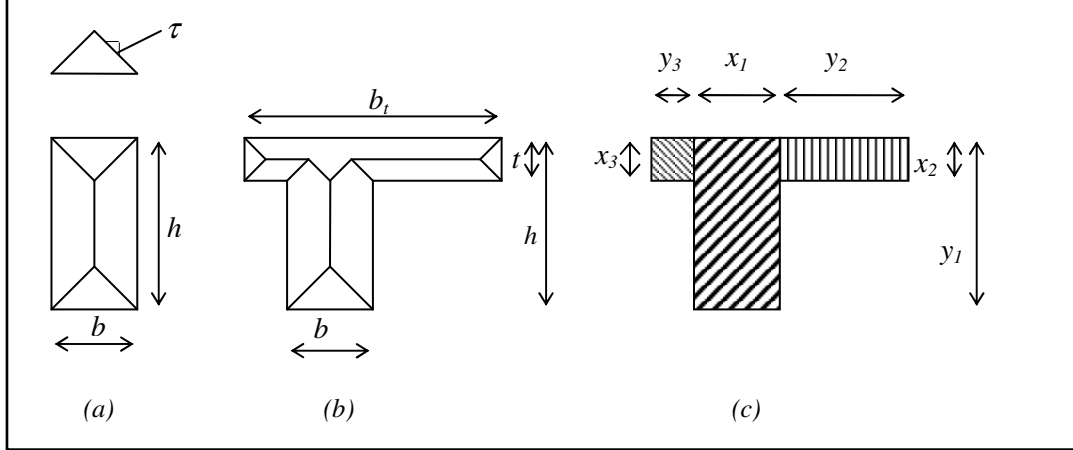
Yapılan deneysel araştırmalarda [1], enkesit içerisinde kayma gerilmelerinin sabit kaldığının ortaya çıkması, burulma etkisindeki geleneksel betonarme elemanlar için elastisite teorisi yerine plastisite teorisinin daha iyi sonuçlar verebileceğini göstermiştir. Plastisite teorisine göre burulma altında oluşan gerilme dağılımı Şekil 8 'de verilmiştir.

Plastisite teorisine göre çıkarılacak denklemleri “kum tümseği analojisi” ‘inden elde etmek en kolay yoldur. Yatay vaziyette tutulan enkesit üzerine dökülen kumun aldığı biçim ile plastisite teorisindeki gerilme fonksiyonunun benzerliğini temel alan bu analogide, kum

tümseğinin eğimi, kayma gerilmesine eşit kabul edilmiştir (Şekil 9). Bu durumda tümseğin hacmi, enkesitin taşıyabileceği burulma momentinin yarısına eşit olur [1, 21, 22].



Şekil 8. Plastik teoriye göre basit burulma etkisindeki dikdörtgen enkesitlerde kayma gerilmesi dağılımı [1, 21, 22]



Şekil 9. Kum tümseği analojisi ve enkesitin dikdörtgenlere bölünmesi [1, 16, 21, 22]

Şekil 9 (a) ve (b) 'de gösterilen dikdörtgen ve tablalı enkesitler için kum tümseği analojisi kullanılarak çıkarılan denklemler,  $t$ ; tabla kalınlığını göstermek üzere, sırasıyla 4 ve 5 numaralı bağıntılarla verilmiştir.

$$T = \frac{1}{2} b^2 \left( h - \frac{1}{3} b \right) \tau \quad (4)$$

$$T = \frac{\tau}{2} \left[ b^2 \left( h - \frac{b}{3} \right) + t^2 (b_u - b) \right] \quad (5)$$

Tablalı enkesitler için daha yaklaşık bir denklem, enkesit Şekil 9(c) 'deki gibi dikdörtgen alanlara bölünürse;

$$T = \frac{1}{2} \sum x_i^2 \left( y_i - \frac{x_i}{3} \right) \tau \quad (6)$$

bağıntısı elde edilmektedir.

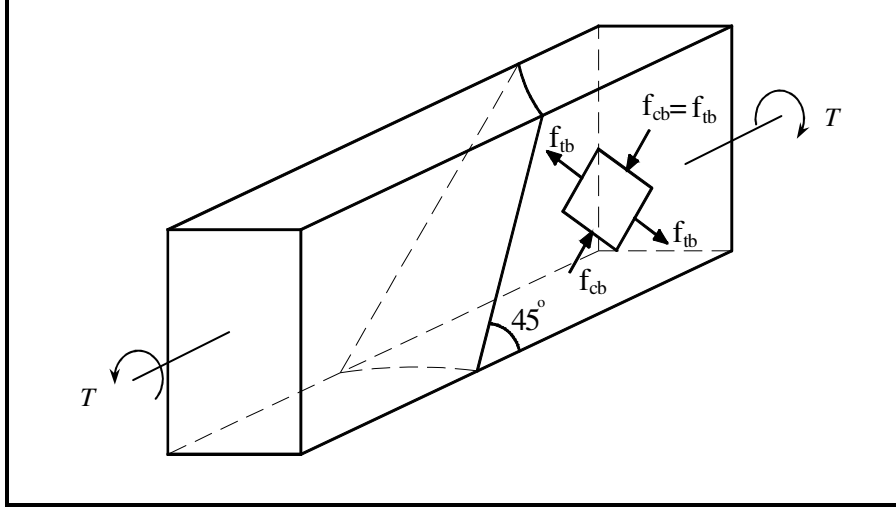
Kirişin davranışını ve rijitliğini büyük ölçüde değiştiren burulma çatlamaının doğru olarak hesaplanması çok önemlidir. Plastisite teorisinin geçerli olduğu varsayımıyla, çatlama neden olan burulma momenti  $T_{cr}$ , (4), (5), (6) bağıntılarında  $\tau$  yerine betonun çekme dayanımı konularak hesaplanabilmektedir. Basit burulmada asal çekme, kayma gerilmesine eşit olmaktadır. Literatürde daha önce basit burulma altındaki elemanlar üzerinde yapılmış olan çalışmalarda betonun tek eksenli çekme dayanımı olan  $\tau_{cr} = 0.35\sqrt{f_{ck}}$  değerinin burulma için bir alt sınır oluşturduğu ortaya konulmuştur. Bu alt sınır temel alınır ve  $0.35\sqrt{f_{ck}}$  yerine  $f_{ctk}$  yazılırsa, çatlama için (7) numaralı bağıntı elde edilmektedir [1,13].

$$T_{cr} = \frac{1}{2} \sum x_i^2 \left( y_i - \frac{x_i}{3} \right) f_{ctk} \quad (7)$$

### 1.5.3. 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 [24, 25] basit burulma etkisindeki beton kirişlerin kırılmasına eğilme momentinin neden olduğunu ileri sürmüşlerdir. Bu teoriye göre beton elemandaki ilk çatlama kirişin 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 10 'da gösterildiği gibi beton eleman kırılır.



Şekil 10. Yanal eğilme teorisine göre beton bir elemanın kırılma yüzeyi [24]

Hsu [16, 24, 25] yapmış olduğu gözlemler sonucunda kırılmanın kirişin kenar yüzüne paralel ve kiriş eksenine ile yaklaşık 45 derece açı yapan bir enkesitin eğilmesi ile gerçekleştiğini öne sürmüştür (Şekil 11). Hsu [16, 24, 25] bu teoriye göre betonun çatlama burulmasının;  $f_r$  ; betonun kırılma dayanımını göstermek üzere;

$$T_{sb} = \left( \frac{b^2 h}{3} \right) (0.85 f_r) \quad (8)$$

ifadesi ile hesaplanabileceğini belirtmiştir.

Hesaplamlarda ve deneylerde çoğu zaman beton basınç dayanımı ( $f_c'$ ) kullanıldığından Hsu [16, 24, 25] (8) numaralı denklemi  $f_c'$  cinsinden;

$$T_{sb} = 6(b^2 + 10)h \left( \sqrt[3]{f_c'} \right) \quad (9)$$

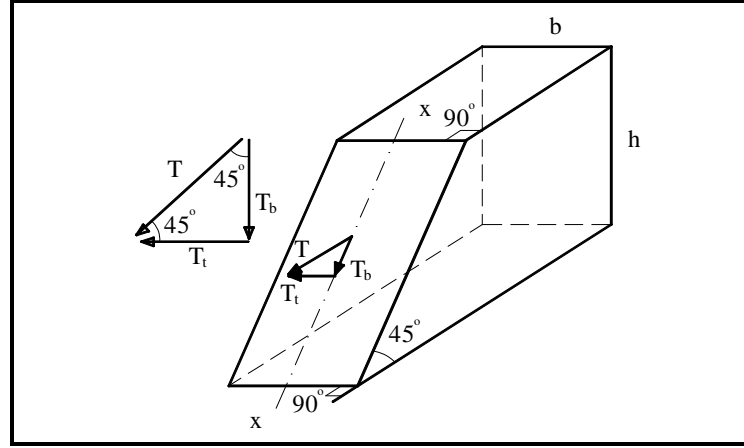
$$T_{sb} = \left( \frac{x^2 y}{3} \right) (0.85) \left( 21 \left( 1 + \frac{10}{x^2} \right) \left( \sqrt[3]{f_c'} \right) \right) \quad (10)$$

$$T_{sb} = \left( \frac{x^2 y}{3} \right) (0.85) (7.5 \sqrt{f'_c}) \quad (11)$$

ifadeleri ile vermiştir. (8) numaralı bağıntıyı Hasnat ve Akhtaruzzaman [24, 26] betonun yarma dayanımı ( $f_{sp}$ ) cinsinden;

$$T_{sb} = \left( \frac{b^2 h}{3} \right) f_{sp} \quad (12)$$

olarak önermişlerdir.



Şekil 11. Yanal eğilme teorisine göre kırılma eksenini ve burulmanın eğilme bileşenleri

#### 1.5.4. ACI 318-99 'daki Yaklaşım

Betonarme enkesitler için uzay kafes benzeşimini benimseyen ACI 318-99 [24, 27] 'da çatlamanın asal çekme gerilmelerinin  $4\sqrt{f'_c}$  düzeyine ulaşarak meydana geldiği kabul edilerek, çatlama düzeyindeki burulma momenti;  $A_c$ ; elemanın enkesit alanını,  $P_c$ ; eleman enkesitinin çevre uzunluğunu ve  $f'_c$ ; beton basınç dayanımını, göstermek üzere;

$$T_{cr} = 4\sqrt{f'_c} \frac{(A_c)^2}{P_c} \quad (13)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır [24].

## 1.6. Çatlama Sonrası Burulma Teorileri

Daha öncede belirtildiği gibi çatlama öncesi betonarme bir enkesitteki donatının eleman rijitliğine önemli bir etkisi olmadığı kabul edilmektedir. Benzer şekilde boyuna ve enine donatının da yalnız başlarına kullanımının beton kapasitesine çok az bir katkı sağladığı, oysa boyuna ve enine donatının uygun şekilde kullanımı İLE nihai burulma kapasitesinin oldukça arttığı belirtilmektedir [1, 2, 16, 17]. Çatlama sonrası beton rijitliği önemli bir miktarda azalsa da enine ve boyuna donatının birlikte kullanımından dolayı toplam burulma kapasitesi artmaktadır. Çatlama sonrası davranış için uzay kafes analogisi, yanal eğilme teorisi ve diyagonal basınç alanı teorisi olmak üzere üç ana teori literatürde mevcuttur.

### 1.6.1. Betonarme Elemanlarda Yanal Eğilme Teorisi

Önceleri beton elemanlar için önerilmiş olan bu teori daha sonraları geliştirilerek betonarme elemanlar için de kullanılmıştır. Betonarme elemanlar için geliştirilen ve Şekil 12 'de görülen yanal eğilme teorisine göre; burulma dayanımı enine donatılardaki eksenel kuvvetlerden, betondaki kayma+basınç kuvvetlerinden ve boyuna donatıda oluşan kuvvetlerden oluşmaktadır [16, 20, 21].

Betonarme enkesitler için geliştirilen teoriye göre burulma momenti,  $A_t$ ; kayma+basınç bölgesindeki boyuna donatı alanını,  $f_{yl}$ ; boyuna donatının akma dayanımını,  $f_{yv}$ ; enine donatıların akma dayanımını,  $s$ ; enine donatı aralığını,  $x_1$ ; enine donatının kısa kolunun uzunluğunu,  $y_1$ ; enine donatının uzun kolunun uzunluğunu göstermek üzere;

$$m = \frac{2A_t s}{2A_t(x_1 + y_1)} \quad (14)$$

$$\alpha_t = \sqrt{m} \frac{f_{yl}}{f_{yv}} \left( 1 + 0.2 \frac{y_1}{x_1} \right) \leq 1.6 \quad (15)$$

ve

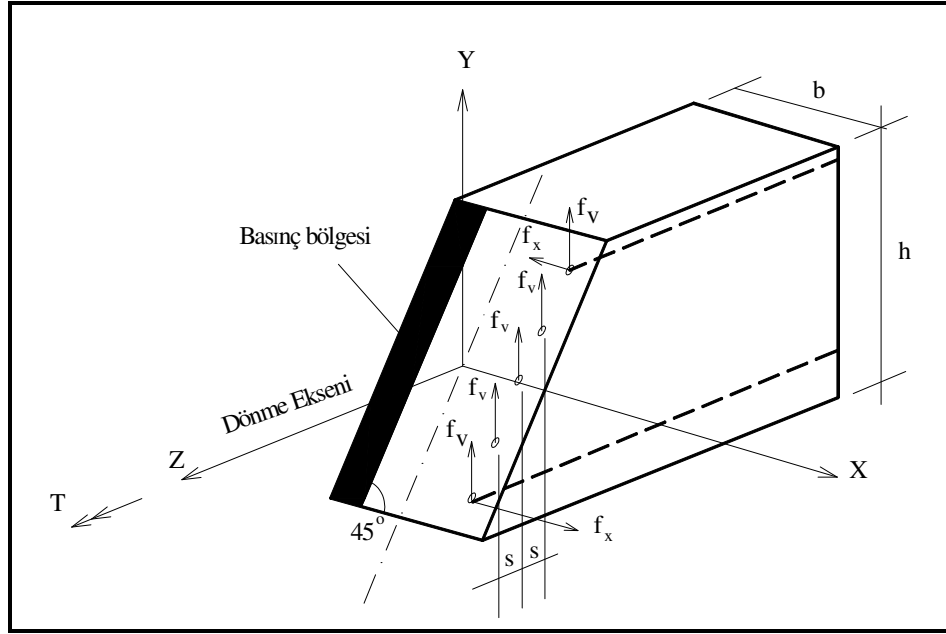
$$T = 0.8(\sqrt{f_c})b^2h + \alpha_t \frac{x_1 y_1 A_t f_{yv}}{s} \quad (16)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

ACI 318-89 [11] bu teori için (18) nolu denklemi daha basit bir ifade ile;

$$\alpha_t = 0.66 + 0.33 x_1 / y_1 \leq 1.5 \quad (17)$$

şeklinde önermektedir.



Şekil 12. Betonarme elemanlar için yanal eğilme teorisi [24]

### 1.6.2. Uzay Kafes Benzeşimi

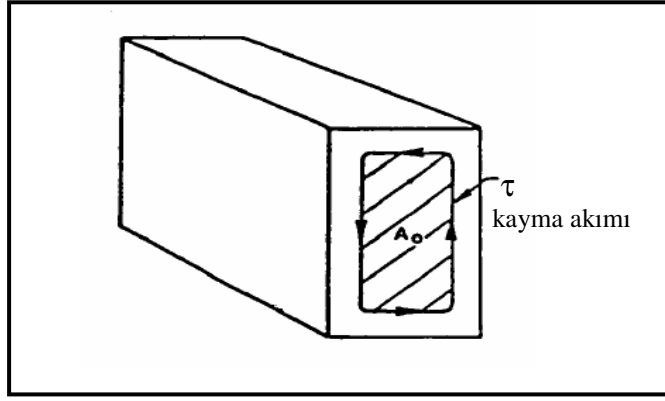
Boyuna ve enine donatısı bulunan bir betonarme elemanın kapasitesini hesaplamak için bir çok fiziksel ve matematiksel model önerilmiştir. Bunlardan ilki 1929 yılında Rausch tarafından geliştirilen Uzay Kafes Kiriş modelidir. Şekil 13. de gösterilen bu modelde donatı çekme elemanlarını, asal basınç yönündeki beton ise, basınç elemanlarını oluşturmaktadır [16, 17, 24]. Bu yaklaşımda beton veya betonarme elemanların merkezindeki bölgenin çatlama sonrası burulma dayanımına katkısının olmadığı





### 1.6.3. Diyagonal Basınç Alanı Teorisi

Bu teoriye göre burulma momentinin, kirişi spiral gibi saran diyagonal beton basınç gerilmeleri ile taşıdığı ve bu gerilmelerin tanjant bileşeninin enkesitte kayma akımı oluşturduğu kabul edilir (Şekil 14). Bu teoride burulma momentindeki denge şartlarının eğilmedeki denge şartlarıyla benzer olduğu belirtilmiştir. Bu teoride, boyuna ve enine donatılar ile betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi kullanılarak denge ve uygunluk şartlarının sağlanmasıyla çözümlene yapılmaktadır [18, 28].



Şekil 14. Basınç alanı teorisine göre kayma akımı [18, 28]

Bu teoride,  $A_0$  ; kayma gerilmesi akımı içinde kalan alanı,  $\tau$ , kirişin çevresindeki her bir birim uzunluktaki kayma gerilmesini, göstermek üzere burulma momenti;

$$T = 2A_0\tau \quad (21)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Bu bağıntıdaki  $\tau$  kayma gerilmesi,  $A_l$ ; boyuna donatının alanını,  $f_{yl}$ ; boyuna donatının akma dayanımını,  $A_t$ ; enine donatının alanını,  $f_{yt}$ ; enine donatının akma dayanımını,  $s$ ; enine donatı aralığını,  $P_o$ ; kayma gerilmesi akımının olduğu çevre uzunluğunu göstermek üzere,

$$\tau = \sqrt{\frac{A_l f_{yl} A_t f_{yt}}{P_o s}} \quad (22)$$

bağıntısı ile belirlenir.

### 1.7. Literatürde Burulma ile İlgili Yapılmış Olan Bazı Çalışmalar

Hsu [25] donatısız dikdörtgen enkesitlere sahip beton elemanlardaki burulma ile ilgili olarak gerçekleştirdiği çalışmada, bazı elemanların basit burulma etkisinde boyuna eksenle 45 derece açı yaparak kenar yüzlerinde oluşan eğilme nedeniyle kırıldığı sonucuna vararak, bu kırılma mekanizmasını temel alan nihai burulma momentinin hesaplanabilmesi için yeni bağıntılar önermiştir. Yazar bu bağıntıların geçerliliğini toplam 65 kiriş üzerinde yapılmış olan burulma deneyleri ile kanıtlamıştır.

Kirk ve Lash [29], basit burulma ve eğilmeli burulma etkisine maruz beton ve betonarme T kirişlerin davranışını araştırmışlardır. Deneysel çalışmalara bağlı olarak, T kirişlerin çatlaması ve nihai yük kapasiteleri için mevcut olan eğilme-burulma etkileşimine benzer dairesel etkileşim eğrilerini elde etmişlerdir. Bu eğrilerden eğilme etkisinin kirişin burulma kapasitesini azalttığı sonucuna varmışlardır.

Mitchell [18], diyagonal basınç alanı teorisi olarak bilinen teoriyi tanıtarak, betonarme enkesitlerin basit burulma etkisindeki davranışlarını bu teori ile açıklamaya çalışmıştır. Burulma etkisindeki enkesitlerin dönme açılarını ve taşıyabilecekleri burulma momenti için bağıntılarda geliştirmiştir. Yazar çalışmasında kirişteki burulma momentini eğilme altındaki kirişin taşıdığı eğilme momentine benzer şekilde elde etmiştir. Bu amaçla dikdörtgen beton basınç bloğu parametrelerini burulma için belirleyerek söz konusu bağıntıları elde etmiştir.

Karlson vd. [30], uzun süreli burulma etkisine maruz betonarme elemanlardaki çatlaklar üzerine teorik ve deneysel olarak çalışmalar yapmışlardır. Betondaki sünme etkilerini de dikkate alabilmek için elastik bölgedeki burulma rijitliğini ifade eden bir eşitlik bu çalışmada yeniden düzenlenmiştir.

Onsaongo [28], basit burulma etkisindeki simetrik donatılı enkesitlerin davranışını tahmin edebilmek için oluşturulan basınç teorisini, ayrı ayrı ve birlikte burulma, eğilme ve eksenel yüklere maruz betonarme kirişlerin çatlama sonrası davranışını elde etmek için genişleterek teorik olarak elde ettiği sonuçları deneylerle kıyaslamış ve geliştirdiği teorinin söz konusu etkiler için geçerliliğini ispatlamıştır.

Mitchell ve Collins [31], öngerilmelinin betonarme kirişlerin burulma davranışı üzerine etkisini araştırmışlardır. Yazarlar deneye tabi tuttıkları tüm kirişlerde eşit miktarda enine donatı ve değişik miktarlarda boyuna donatı kullanmışlardır. Sonuç olarak gözlenen davranışın diyagonal basınç alanı teorisiyle tahmin edilebileceği görüşü belirtilmiştir.

Narayanan ve Karem-Palanjian [32], çelik liflerin geleneksel betonarme kirişlerin burulma davranışına etkilerini araştırmışlardır. Yazarlar yaptıkları çalışmalarda enine donatı ile birlikte uygun etkileşim oranlarında çelik lif kullanılmasının betonarme kirişlerin burulma kapasitesini % 60 'lara varan oranlarda artırabildiğini belirtmişlerdir.

Selby [33], üç boyutlu betonarme katı (solid) elemanların lineer olmayan sonlu eleman analizi için yapmış olduğu çalışmaları anlatarak, değiştirilmiş basınç alanı teorisini kullanarak geliştirdiği kesin olmayan üç boyutlu formülasyondan bahsetmiştir. Yazar yapmış olduğu analizleri, geliştirmiş olduğu bağıntıları ve ilişkileri burulma, eğilme ve eğilmeli burulma deney sonuçları ile karşılaştırmıştır.

Wafa vd. [34], aksel olarak öngerilmeye maruz olan ve olmayan lifli ve liffsiz betonarme kirişleri burulma etkisine maruz bırakmışlardır. Yazarlar yaptıkları çalışmanın sonucunda %1 oranına kadar çelik lif kullanımının burulma dayanımında bir artış sağlamadığı, artan lif oranlarıyla birlikte burulma dayanımının arttığı sonucuna varmışlardır.

Rahal [35], çalışmasında, daha önce burulma, kayma ve eğilme etkilerini kapsayan değiştirilmiş basınç alanı teorisini, ayrı ayrı ve kombine bir şekilde çift eksenli kayma, çift eksenli eğilme, burulma ve aksel yüklere maruz dikdörtgen enkesitler için çatlama öncesi ve çatlama sonrası davranışlarının tahmini için geliştirmiştir. Yazar geliştirdiği modeli bazı yapı yönetmeliklerinde önerilen bağıntularla birlikte deneysel sonuçlarla karşılaştırmıştır.

Rasmussen ve Baker [36], basit burulma etkisine maruz geleneksel betonlar ile yüksek dayanımlı betonların davranışlarını karşılaştıran bir çalışma yapmışlardır. Yapılan deneylerde yüksek dayanımlı betonların geleneksel betonlara göre daha yüksek burulma kapasitesine, daha yüksek burulma rijitliğine, daha küçük çatlak genişliğine ve daha küçük donatı gerilmesine sahip oldukları ortaya çıkmıştır.

Ramaswamy vd. [37], betonarme eğilme ve burulma elemanlarının sonlu eleman analizinde katmanlanma işlemleri adlı araştırmayı gerçekleştirmişlerdir. Her bir katmanlanma yaklaşımının birincil avantaj ve dezavantajlarını önemle vurgulamışlardır.

Murtha-Smith [38], burulma rijitliği için, düşey plak, çapraz plak ve kutu şeklindeki I enkesitlerin enkesit rijitleştiricilerini tanıtarak kiriş enkesitinin, iki yanı ayrı ayrı veya komple olmak üzere enkesit rijitleştiricileri ile rijitleştirilmiş ve bu değişik kombinasyonlar içinde optimum kombinasyondan söz etmiştir. Daha sonra rijitleştirici kombinasyonları mekanik olarak incelemiş, tasarım parametrelerini gözden geçirmiştir. Ayrıca enkesit

rijitleştiricilerinin I enkesitli kirişlerin yanal eğilmeli-burulma burkulmasında enkesit kapasitesine kayda değer katkısı olduğunu belirtmiştir.

Wafa vd. [39], ondört öngerilmeli yüksek dayanımlı kirişin davranışını incelemek için bu kirişlere burulma uygulamışlardır. Bu deneylerde; beton basınç dayanımı, kiriş enkesit boyutları, öngerilme düzeyi, burulma donatısının miktarı değişken olarak belirlenmiştir. Yapılan çalışmada alan sabit olmak koşuluyla üç farklı enkesit, boyut etkisini anlamak için kullanılmış, farklı beton basınç dayanımındaki kirişler ve farklı düzeyde öngerilmeye maruz bırakılmıştır. Deney sonuçları, burulma momenti ve dönme ilişkisinin yaklaşık olarak çatlamaya kadar lineer, çatlamadan sonra ise lineer olmadığını, beton dayanımı ve boyut oranının yüklemenin burulma dayanımına ve rijitliğine etki ettiğini göstermiştir.

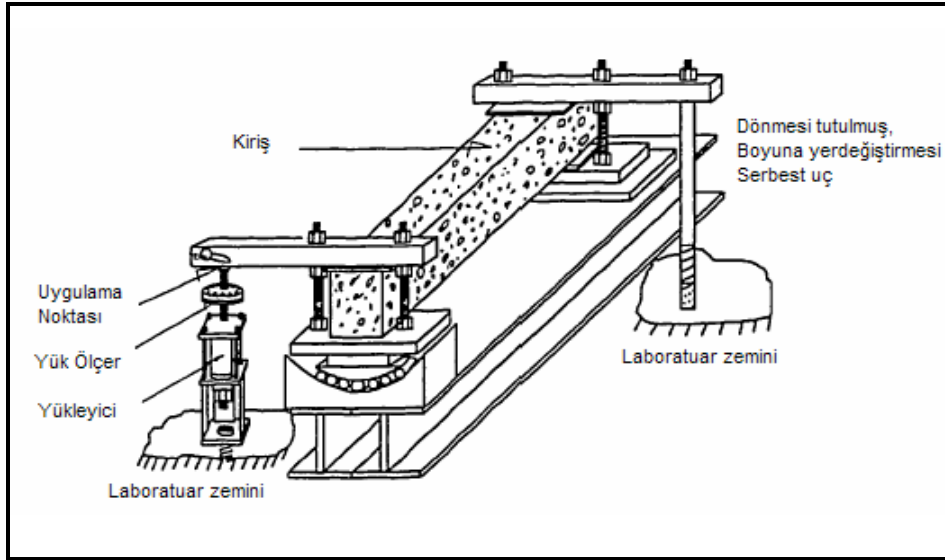
Şimdiye kadar aksenal yük, eğilme, kayma ve burulma gibi dört temel etki için bir çok teorinin önerildiğini belirten Hsu [40], betonarme elemanlar için şimdiye kadar önerilmiş teorilerin birleştirilmesi ile elde edilebilen bir birleşik teorinin olması gerektiğini belirterek bu amaçla yaptığı çalışmada beton basınç diyagonallerinin eğim açısını temel alan birleşik bir teori önermiştir. Bu öneriyi yaparken malzeme mekaniğinin üç ana prensibi olan gerilme eşitliği, şekildeğiştirme uygunluğu ve malzemenin özelliklerini temel aldığını belirtmektedir. Ayrıca bu çalışmada, bütün rasyonel betonarme teorilerinin birleşmeye doğru gittiği belirtilmiştir.

Kozonis [41], basit burulma etkisindeki kirişlerin davranışını araştırmıştır. Bunun için değişik enine donatı aralığına sahip altı betonarme kiriş kırılıncaya kadar yüklemeye maruz bırakılmıştır. Yük, dönme açısı, donatı şekildeğiştirmeleri kayıt edilmiş, kiriş davranışını tanımlayan metotlar karşılaştırılarak, burulma kapasitesi için bir eşitlik önerilmiştir. Yine deneysel çalışma kapsamında önceden hasar görmüş üç tane betonarme kiriş harici çelik bantlarla onarılmış ve deneyleri yapılmıştır. Dayanım, rijitlik, onarılmış kirişlerdeki çeliğin şekildeğiştirmesi elde edilmiş, onarılmış ve onarılmamış kirişler birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Yazar, harici çelik bantlar ile onarım yapılmasının, burulma kapasitesi ile azalan rijitliği artırdığı ve donatıdaki gerilme düzeyini azalttığı, sonucuna varmışlardır.

Wang ve Hsu [42] basit burulma etkisindeki betonarme kirişlerin burulma dayanımının tahmini için limit analiz metodunu kullanmışlardır. Bu metodun beton için değiştirilmiş Coulomb-Mohr kırılma kriterini kullanarak ve betonun akmadan sonraki plastik davranışını kırılma yüzeyi ile ilişkilendirdiğini belirten yazarlar, kırılma kriteri ile ilgili olan akma çizgileri boyunca enerji dağılımı için üst sınır teoremi kadar iyi olan genelleştirilmiş bağıntıları bu çalışmada kullandıklarını da vurgulamışlardır. Yazarlar

ayrıca, basit burulmaya maruz betonarme kirişlerin nihai dayanımının, enerji dağılım oranı ve nihai durumda izin verilebilir kırılma mekanizmasına bağlı olan iş eşitlikleri ile tahmin edilebildiğini, teorik burulma dayanımı ile deneysel sonuçları karşılaştırarak kanıtlamışlardır.

Koutchoukali ve Belarbi [43], beş tane birebir ölçekli kirişi basit burulmaya maruz bıraktıkları çalışmalarında temel değişken parametre olarak beton dayanımını kullanmışlardır. Normal ve yüksek dayanım sınıfları arasında üretilen betonarme kirişlerin tümüne aynı donatı düzenini uygulamışlardır. Yazarlar, sundukları yayında burulma deneylerine tabi tuttukları betonarme elemanlara ait donatı düzeni, karışım oranları, beton dayanımları, şekildeğiştirme ve dönme açıları ve Şekil 15 'de görülen deney düzeneği hakkında detaylı bilgi verdikten sonra, deneylerden elde edilen bilgiler ışığında çatlama sebebiyet veren burulma momenti ve dönme miktarı, kirişlerin çatlama davranışları, çatlama ve nihai burulma momenti değerleri üzerinde yaptıkları irdelemeleri grafiklerle vermişlerdir. Sonuç olarak kirişlerin nihai burulma kapasitelerinin beton dayanımından bağımsız olduğunu belirlemişler, bununla birlikte beton dayanımının artması kiriş davranışını sünekten gevreğe doğru değiştirdiğini tespit etmişlerdir. Yine çalışmanın diğer bir sonucu olarak ACI 318-95 [44] yapı yönetmeliğinde verilen minimum donatı oranının yetersiz olduğu ve bu donatı oranlarının beton dayanımı ile ilişkilendirilmesinin gerektiğini ortaya koymuşlardır.



Şekil 15. Koutchoukali ve Belarbi' nin basit burulma deneylerini gerçekleştirdikleri düzenek [43]

Csikos ve Hegedus [45], betonarme kirişlerin burulması adlı çalışmalarında, betonarme elemanların analizi için kullanılan önemli metotları tanıtmışlardır. Bu metotları kullanarak elde ettikleri sonuçları onbeş beton ve betonarme kiriş üzerinde yaptıkları basit burulma deneylerinden elde ettikleri sonuçlarla ve bazı yapı şartnamelerinde önerilen hesap yöntemleri ile karşılaştırmışlardır.

Hsu [46], kayma analizi ve kayma tasarımı için şimdiye kadar literatürde yer almış olan yöntemleri sayıp bu yöntemlerin yetersiz kaldığı noktaları belirtmiştir. Eksik kalan bu kısımlar için literatürde verilen yöntemleri birleştirerek kayma analizi ve kayma tasarımı için yeni bir yaklaşımda bulunmuş, örneklerle vermiş olduğu yaklaşımın tutarlılığını deneylerle test etmiştir.

Taşdemir vd. [47], bu çalışmada yüksek dayanımlı beton, geleneksel beton ve hafif betonların gerilme şekildeğiştirme ilişkisini gösteren grafiklerde gerilmenin en üst noktada olduğu andaki şekildeğiştirme miktarını üç fazlı kompozit model olarak tanımlanan bir yaklaşımla elde etmeye çalışmışlardır. Çalışmada son olarak basınç, çekme, eğilme ve burulma deneylerinden elde edilen sonuçlarla önerilen üç fazlı kompozit modelden elde etmiş oldukları sonuçları karşılaştırmışlardır.

Koutchoukali [48], basit burulma etkisindeki betonarme kirişlerin doğrusal olmayan davranışını araştırmıştır. Bu çalışmada yumuşatılmış kafes modelinin burulma etkisindeki betonarme kirişlerin davranışının tahmini için iyi model olduğu altı çizilerek belirtilmiştir.

Mobasher [49], sargılı betonların basit kayma gerilmesi altındaki davranışlarını saptamaya çalışarak, deney numunelerinin kayma modülü ve nihai burulma momentlerini teorik olarak hesaplamış ve deney sonuçları ile karşılaştırmıştır. Yazar deneylerden elde ettiği şekildeğiştirmeleri ve burulma momentini, kayma şekildeğiştirmesi ve kayma gerilmesine dönüştürerek grafiklerle vermiştir.

Ritchie ve Leever [50], elastik kirişlerin dinamik ve üniform olmayan burulması üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarını sundukları ilk makalede elastik kirişlerin dinamik ve üniform olmayan burulması için bazı diferansiyel denklemlerin elde edilişi gösterilmiştir.

Ritchie ve Leever [51], çalışmalarını sundukları ilk makalelerinde dikdörtgen kirişlerin dinamik burulması için diferansiyel eşitliklerin elde edilişini vermişlerdir. Bu makalede ise elde ettikleri diferansiyel denklemleri, burulma deneyleri için kullanmışlardır. Bu deneylerde düzlem boyunca çatlak ilerlemesini de gözlemişlerdir. Sonuç olarak kullanılan eşitliklerin geçerliliği hakkında bilgi vermişlerdir.

Helwig ve Yura [52], kolon enkesitlerinin farklı noktalarına yerleştirilmiş enine kuşaklar ile burulma etkisinden kaynaklanan burkulma davranışının sonlu elemanlarla analizini yapmışlardır. Bu analizlerin sonucu olarak, kuşakların enkesitte bulunduğu yerin burulma etkisinden kaynaklanan burkulma üzerinde önemli derecede etkili olduğu ortaya konulmuştur. Yazarlar bu tür burkulmanın kontrolü amacıyla kullanılan kuşakların dayanım ve rijitliği için bazı eşitlikler geliştirmişlerdir. Ayrıca çalışmada kuşak kullanımı için bazı önerilerde bulunulmuştur.

Maeck ve Roeck [53], dinamik eğilme ve burulma rijitliklerini modal eğri ve burulma oranlarından belirlemeye çalışmışlardır. Bunun için yazarlar altı metre uzunluğundaki beton kirişleri artan statik yüklemeye maruz bırakarak bu kirişler üzerinde çatlak oluşumunu gözlemişlerdir. Her statik yüklemeden sonra kirişler dinamik deneylere tabi tutulmuş, modal parametrelerdeki değişimlerin kirişlerde oluşan hasardan kaynaklandığı belirtilmiştir. Bu çalışmada hasar yerinin ve yoğunluğunun tahminine çalışılmıştır. Bu tahminde, oluşan modal deplasmanların ölçülmesi ile elde edilen rijitlik kullanılmıştır. Eğilme modları yardımıyla dinamik eğilme rijitliği, burulma modları yardımıyla da dinamik burulma rijitliği elde edilmiştir.

Leu ve Lee [54], dikdörtgen betonarme elemanlar için tasarım diyagramlarını geliştirmişlerdir. Bu diyagramlar dayanım ve normalize edilmiş mod diyagramlarından oluşmaktadır. Dikdörtgen betonarme bir enkesitte normalize edilmiş mod diyagramı enkesitin kırılma modunu elde etmek için, dayanım diyagramları ise dayanımı bulmak için kullanılmaktadır. Bu diyagramlar belirlenmiş iki donatı indeksi için çizdirilmiştir. Bu indekslere, tasarım diyagramlarının enkesit boyutları, donatının akma dayanımı ve beton basınç dayanımından bağımsız olduğunu göstermek için çalışmada ayrıca açıklama ihtiyacı duyulmuştur. Kırılma modu ve burulma dayanımının tahmininde önerilen tasarım diyagramlarının doğruluğu, yumuşatılmış kafes benzeşimi adı verilen model ile kıyaslanmıştır. Tasarım diyagramları tasarım yapan mühendisler için yumuşatılmış kafes benzeşimine kıyasla hesaplama yeterliliği için daha etkili olduğu belirtilmiştir.

Trahair ve Teh [55], burulma etkisindeki yapısal elemanların elastik eğilme burkulmaları ve burulma elemanlarındaki ikinci mertebe momentleri üzerinde çalışmışlardır. Yazarlar bu çalışmada bazı literatür çalışmalarını gözden geçirdikten sonra tahmini elastik burkulma için enerji metodundan bahsetmişlerdir. Bu metod burkulmuş bir eleman için diferansiyel denge eşitliklerini geliştirmek için kullanılmış ve sonuç olarak

tipik yapısal çelik elemanlarda burulma ile oluşan ikinci merteb momentleri ve narinlik oranının çok küçük olduğu ve bunların ihmal edilebileceği sonucuna varmışlardır.

Karayannis [56], çatlak boyunca beton elemanların davranışını incelediği bu çalışmada artan burulma etkisinde beton davranışı için geliştirilmiş bir analitik model verilmektedir. Bu modelin çatlak oluşum bölgesindeki davranış için normal gerilme ve çatlak genişliği olarak bilinen bünyesel ilişkilerin kullanıldığı özel bir sayısal tekniğe dayandığı belirtilmiştir. Çatlak oluşum bölgesindeki genişlik; malzeme özelliğine bağlı olarak düşünülmüş ve analitik ve deneysel veri arasında kalacak şekilde tahmin edilmiştir. Bu metodun enkesit şekli ile sınırlı olmadığı çünkü bu analizin sayısal haritalama içerdiği vurgulanmıştır. Önerilen analizin objektifliği ağ gözü yoğunluğu ile ilişkili olarak bu çalışmada sınırlanmıştır. Önerilen yaklaşım eğilme, kesme ve eksenel yüklerle kombine bir biçimde burulma etkisine maruz betonarme elemanlara da uygulanabilir olduğu belirtilmiştir. Bu makalede bahsedilen analitik modelin geçerliliği; deneysel olarak elde edilen davranış eğrileri ve nihai burulma değerleri ile tahmin edilenler arasındaki geniş bir karşılaştırmanın yapıldığı ikinci bir makalede gösterilmiştir.

Karayannis ve Chalioris [57], burulma etkisindeki beton için çatlak oluşum analizinin deneysel olarak geçerliliğini araştırmışlardır. Daha önceden analitik olarak tahmin edilen davranış eğrileri ile deneysel olarak elde edilen davranış eğrilerinin karşılaştırılması ile elde edilen analitik modelin geçerliliği bu çalışmada ortaya konulmaya çalışılmıştır. Geniş kapsamlı parametrik çalışmaları temel alan bu yaklaşımın geçerliliğini kanıtlama girişimleri içerisinde, literatürde mevcut çalışmalardan derlenen deneysel bilgi verisi ve yürütülen bir dizi basit burulma deneylerinden elde edilen veriler kullanılmıştır. Tahmin edilen ve ölçülen verilerin karşılaştırılması sonucu önerilen yaklaşımların basit burulma etkisindeki beton elemanların davranışını çok iyi bir şekilde temsil ettiğini ve eğilme, kesme ve eksenel yük ile birlikte burulma etkisine maruz dikdörtgen olmayan elemanlar için tatmin edici sonuçlar verdiği öne sürülmüştür.

Hsu, Wang [58], tekrarlı eğilme ve burulma yüklemelerine maruz kompozit betonarme elemanların elastik olmayan davranışını deneysel olarak araştırmışlardır. Farklı enkesit özelliklerine sahip üç yapı çeliğinden yapılmış olan ondört kompozit betonarme eleman farklı eğilme ve burulma deneylerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar; orta büyüklükteki burulma etkisinde kompozit betonarme elemanların nihai eğilme kapasitesinde belirgin bir şekilde azalma olduğunu göstermiştir. Elde edilen deneysel bulgular ışığında, burulma



etkisinin söz konusu elemanlar üzerindeki etkisi değerlendirilmiş ve eğilme ve burulma arasında basit bir etkileşim eğrisi önerilmiştir.

Brabie [59], burulma momentinin dairesel olmayan enkesite sahip çubukların geometrisine etkilerini araştırmıştır. Kırılmadan sonra, burulmayı malzemenin kompleks olan deformasyon mekanizmasının belirlediğini, ve bu mekanizmanın çubuğun ilk geometrisini değiştirdiğini belirten yazar, aksenal doğrultuda çubukta büzülme ve sarmal olarak çarpılma meydana geldiğini, eksene dik doğrultuda ise enkesitin başlangıç şeklini kaybettiğini dolayısıyla çubuk eksenlerinin kaydığını ve durumun oldukça karmaşık bir hal aldığını da ifade etmiştir.

Li vd. [60], herhangi bir enkesite ve, farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerle donatılmış betonarme elemanların burulma rijitliğini konu alan bir çalışma yapmışlardır. Farklı özelliklere sahip elemanların birleşim yerlerindeki deformasyon ve gerilmelerden elde edilen sınır şartları kullanılarak burulma fonksiyonu sayısal olarak potansiyel teorisinin ikinci değer probleminden elde edileceği belirtilmiştir. Daha sonra aynı yöntemle birkaç örnek çözülmüş ve betonarmenin beton ve çelikten oluşan kompozit eleman gibi analiz edilmesi gerektiği, aksi takdirde büyük hataların elde edileceği vurgulanmıştır. Betonarme veya diğer kompozit elemanlar için bahsedilen yaklaşımın geçerliliği üzerinde durularak, kule ayakları, köprüler ve diğer komplike yapılarda bahsedilen yaklaşımın kontrol amaçlı olarak kullanılabileceği öne sürülmüştür.

Fu ve Tang [61], çok gözlü öngerilmeli beton kutu enkesitlerin burulma analizinde yumuşatılmış kafes teorisini kullanmışlardır. Bu şekilde yapılmış olan yapılardaki burulma probleminin çözümü için bir algoritma öneren yazarlar, yumuşatılmış kafes teorisini temel alan bir bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Bu bilgisayar programı yardımıyla tek gözlü ve çok gözlü kutu enkesitli yapıların analizini yaparak daha önceden yapılmış olan deneysel ve teorik çalışmalarla kıyaslamışlardır.

Panchacharam, ve Belarbi [62], lifli polimer kompozitler ile harici olarak güçlendirilmiş betonarme kirişlerin burulma davranışını ve performansını araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmada lif düzeni, güçlendirilmiş kiriş yüzeyi, kanca etkisi gibi değişkenler göz önünde tutulmuştur. Deney sonuçları; lifli polimer ile yapılan harici sargılamanın, nihai burulma ve çatlama kapasitesini belirgin bir şekilde artırdığını göstermiştir.

Kamalodeen ve Sharma [63], birleşik eğilme, kayma ve burulma etkisindeki çelik lifli dikdörtgen beton elemanlar üzerinde araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada; şartnamelerde henüz yer almamış olan veya yeni yeni yer almaya başlamış çelik lifli

dikdörtgen beton elemanlar için analiz yöntemi ve formülasyon önerilmiştir. Bunun için çelik lifli dikdörtgen elemanlara birleşik eğilme, kayma ve burulma etkileri ayrı ayrı ve kombine bir şekilde uygulanmış elde edilen deneysel bulgular, çalışmada önerilen formülasyon ve literatürdeki diğer önerilen bağıntılarla karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Daha önce önerilen eşitliklerden elde edilen sonuçlara kıyasla bu çalışmada önerilen eşitliklerle yapılan hesaplamalar deneysel sonuçlara daha yakın olarak elde edilmiştir.

Zhang [24], burulma etkisine maruz geleneksel ve yüksek dayanımlı betonarme kirişlerin doğrusal olmayan davranışlarının tahmini için bir analitik metot geliştirmeye çalışmıştır. Bunun içinde sonlu eleman metodunu kullanmıştır. Literatürde verilen deneysel ve teorik sonuçları bu çalışmada elde ettiği sonuçlarla karşılaştıran yazar ayrıca önemli değişkenlerin analizi için istatistiksel bir metot kullanmış ve dikdörtgen kesitlerin burulma kapasitesinin tahmini için bazı eşitlikler elde etmiştir.

Reagen [64], prizmatik çubukların sınırlı burulması üzerinde çalışmıştır. Yazar sonlu uzunluktaki herhangi bir geometrik şekildeki kiriş enkesitindeki sınırlandırılmış burulmadan kaynaklanan üç boyutlu gerilme ve şekildeğişirmeleri elde etmek için bir formül geliştirmiştir. Bu çalışmada ayrıca prizmatik çubukların gerilme ve gerilme bileşikleri arasındaki ilişki araştırılmıştır.

Lee ve Barr [65] şantiye şartlarındaki gibi karıştırma, sıkıştırma ve kür şartları uygulanarak hazırlanmış çelik lifli betonarme elemanlar üzerinde yaptıkları çalışmalarını makalelerinde rapor etmişlerdir. Yazarlar beş metre uzunluğundaki çelik lifli beton numuneler kullanarak, hem çekme ve basınç gibi dayanım parametreleri hem de kırılma parametreleri üzerine araştırmalar yapmışlardır. Burulma deneylerinde farklı çelik lif düzenleri için çekme gerilmelerinde açık farklılıklar gözlenmiştir. Kırılma karakteristiklerini elde etmek için üretilen çentikli kirişlerin eğilme deneylerinde çentiksiz kirişlerden çok daha stabil oldukları gözlenmiştir. Bu yüzden çentikli kiriş geometrisinin stabilite ve güvenilirlik açısından en iyi kiriş geometrisi olduğu kanısına varılmıştır. Şantiye koşullarında ve laboratuvar koşullarında hazırlanmış çelik lifli beton numuneler deneylerde benzer karakteristikler sergilemişlerdir. Bu iki seri numunelerin dayanım ve kırılma karakteristiklerinde değişiklikler gözlenmiştir.

Ghobarah vd. [66], betonarme kirişlerin burulma dayanımını artırmak amacıyla cam lifli ve karbon lifli polimerleri dış sargılama olarak kullanmışlardır. Bu çalışmada onbir adet betonarme kirişi burulma deneylerinde test etmişlerdir. Ayrıca deneylerin doğruluğunu kontrol etmek için sekiz kirişi daha burulma deneylerine tabi tutmuşlardır.

Karbon ve cam liflerini farklı şekillerde kirişlere sararak burulma deneylerini yapmışlar, yük, dönme açısı ve şekildeğişimleri kaydetmişlerdir. Etkili sargılamanın tamamen polimer ile sargılama olduğu da yazarlar tarafından belirtilmiştir.

Wu ve Genin [67], yeni bir gerilme analiz yöntemi olan kuvvet akımı fonksiyonu metodunu tanıtmışlar, sıvı akımı fonksiyonu ile kuvvet akımı fonksiyonu arasında bir genel ilişki kurmuşlardır. Benzer bir ilişkiyi de hava basıncı fonksiyonu ve kuvvet akımı fonksiyonu arasında kurmuşlardır. Bu metot ortasında yuvarlak bir delik olan plağa etkileyen basit gerilme ve burulma problemleri gibi klasik elastisite problemlerinde kullanılmaktadır.

Mendis [68], yaptığı çalışmada; yüksek dayanımlı beton elemanların tarihsel gelişimi, şartnamelerdeki tanımları, rötne, sünme, gerilme şekildeğiştirme modelleri, eşdeğer dikdörtgen gerilme modeli, yangına karşı dayanımı, eğilme etkisindeki sehim ve süneklikleri, kayma, zımbalama burulma dayanımları, aderans ve kancalama hakkında genel bilgiler vermiş, yüksek dayanımlı beton kolonların tasarımından, ince (zayıf) kolonlardan, yüksek dayanımlı beton duvarlardan, çarpma dayanımından ve yüksek dayanımlı yapıların sismik tasarımından bahsetmiştir. Ayrıca bu çalışmada yüksek dayanımlı betonlar hakkındaki bilgilerin azlığından ve yüksek dayanımlı beton enkesitlerin hesabında hala geleneksel beton için geliştirilmiş eşitliklerin kullanıldığını, yüksek dayanımlı beton için yeni çalışmalara ihtiyaç olduğunu belirtmiştir.

Sapountzakis ve Mokos [69, 70], sınır elemanlar metodu ile çok malzemeli herhangi bir enkesite sahip kompozit elemanların üniform olmayan burulması üzerine bir araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada kullanılan malzemelerin elastisite modülleri, kayma modülleri birbirlerinden farklı olup bu malzemelerin birbirlerine sıkıca kenetlendiği varsayılmış ve kenarları genel sınır şartları ile tutulmuş elemana yayılı veya geliş güzel burulma momenti etki ettirmiştir. Daha sonra çarpılma önlenmesi kabulü ile Saint-Venant kayma gerilmesi (burulmadan kaynaklanan) ve normal gerilmeleri hesaplayarak, iki sınır değeri problemini, sınır elemanlar metodu kullanılarak formüle etmiş ve çözmüşlerdir. Yazarlar çarpılma ve burulma sabitlerini herhangi bir şekildeki enkesitin alanı üzerinde Gauss yöntemi kullanarak hesaplamış ve yapılan çalışmaların doğruluğunu birkaç sayısal örnekle göstermişlerdir.

Li vd. [71], çok eksenli gerilmeye maruz gevrek yapıdaki beton elemanların kırılmasını tahmin edebilmek için beton elemanları farklı şekillerdeki çatlaklara sahip olarak modellemişlerdir. Beton elemanların kırılma olasılığını elde etmek için yeni bir olasılık

dağılım fonksiyonu da önermişlerdir. Eğilme ve burulma deneyleri sonucunda önerdikleri çatlak modelini diğer modellerle karşılaştırmışlardır.

Thanoon vd. [72] burulmanın üç boyutlu betonarme eleman etkileşimine nüfuzu, konulu bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma kapsamında bir üç boyutlu betonarme bina sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiştir. Bu modellemede kolon-kiriş ve döşeme olmak üzere iki tip eleman tanımlanmıştır. Üç boyutlu binanın analizi için rijitliği de göz önünde bulunduran ve sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan bir program geliştirilmiştir. Kolon kiriş uçlarında üç boyutlu özel mafsallar oluşturularak elastik olmayan modellemeler yapılmıştır. Eş zamanlı tek eksenli eğilme, burulma ve eksenel yük etkilerine maruz betonarme enkesitler için bir kırılma yüzeyi geliştirilmiştir. Plastisite teorisi ile bütünleştirilmiş olan kırılma yüzeyi, analiz boyunca elastik olarak davranış gösterdiği kabul edilen döşeme plaklara sahip üç boyutlu problemlerin elastik olmayan analizi için kullanışlı bir yöntem geliştirmede kullanılmıştır. Bu elastik olmayan yöntem, betonarme kiriş veya kolonların rijitliklerindeki azalmanın ve ardışık olarak plastik mafsal oluşumunun tahmininde kullanılabileceği belirtilmiştir. Yazarlar betonarme elemanlardaki elastik olmayan davranışı anlamak için burulma etkisindeki üç boyutlu olarak modellenmiş basit bir binanın analizini yapmışlardır. Sonuç olarak, tanımlanan kırılma yüzeyindeki burulmanın, burulma yükü altındaki betonarme elemanların kırılma yükünün tahmininde ve elastik olmayan davranışı üzerinde kayda değer bir rol oynadığı belirtilmiştir.

Phatak ve Dhonde [73], betonarme kirişlerin nihai burulma dayanımlarını elde etmek için bir boyutsal analiz metodu kullanmışlardır. Yazarlar kullandıkları metodu, tanıttıktan sonra söz konusu model ile elde etmiş oldukları sonuçları deneysel ve limit analiz yöntemiyle elde ettiği sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak boyutsal yöntemin kolay kullanılabilir olduğu ve yeteri kadar doğru sonuç verdiği belirtilmiştir.

Rahmanian [74], eksenel kuvvet, burulma, eğilme ve kayma etkilerine maruz üç boyutlu betonarme sistemlerin lineer olmayan davranışını araştırmak amacıyla rijitlik metodunu temel alan yeni bir analiz metodu geliştirmiştir. Yazar eksenel kuvvet ve eğilme etkisindeki elemanlarda bu analiz yönteminin; malzeme özelliklerini, uygunluk ve denge şartlarını dikkate alarak analiz yaptığını, burulma analizi için enkesitin burulma dönme ilişkisini çoklu-doğrusal eğriler olarak enkesitin çatlamış ve çatlamamış olması, donatının akmış veya akmamış olması durumlarına bağlı olarak ayrı ayrı modellediğini belirtmiştir. Göçmenin tahmini amacıyla lineer olmayan analizlerden elde etmiş olduğu çeşitli

kombinasyonlardaki etkilerin değerlerini kullanmıştır. Son olarak önerdiği yöntem ile yapmış olduğu analiz sonuçlarını deney sonuçları ile karşılaştırmıştır.

Powanusorn [75], betonarme elemanlardaki enine sargılamanın kayma performansına etkisini araştırmıştır. Değiştirilmiş basınç alanı teorisini bu tür elemanlara uygulamak için geliştirerek elde etmiş olduğu sonuçları, deneysel ve sonlu elemanlar yöntemini kullanarak elde etmiş olduğu sonuçlarla karşılaştırmıştır. Sonuç olarak sargılamanın kayma dayanımını artırdığını ve geliştirmiş olduğu yöntemin dayanım için iyi sonuç verdiğini ancak çatlama sonrası rijitlik için olması gerekenden daha büyük sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

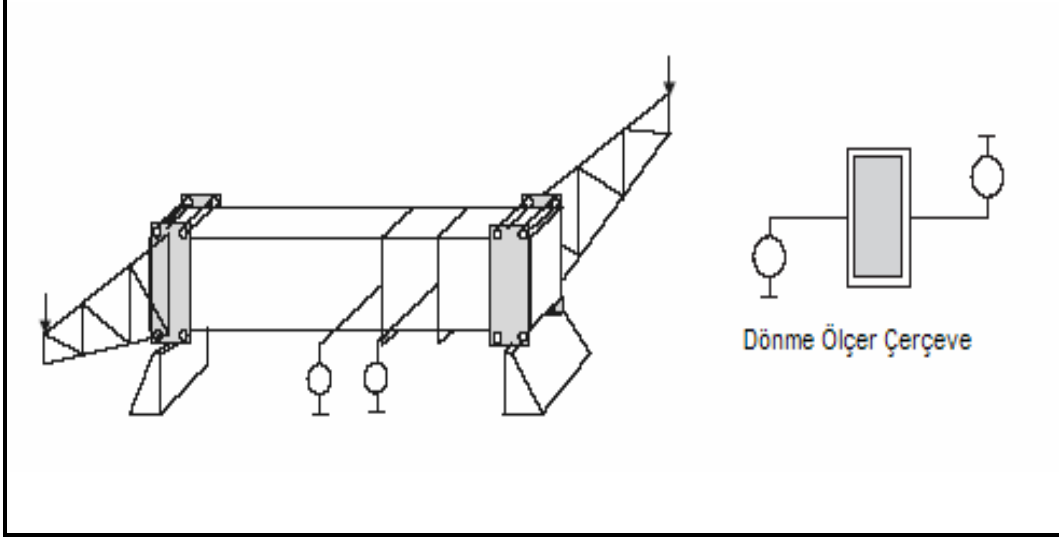
Subramaniam vd. [76], burulma etkisine maruz beton elemanlar üzerinde kararsızlık (instability) analizi ve deneylerini yapmışlardır. Kontrollü ve kontrolsüz burulma deneylerinde beton elemanların davranışını anlamak ve kararsızlık analizini yapabilmek için özel olarak tasarlanmış deney ekipmanları kullanılmıştır. Burulma etkisine maruz beton elemanlarda ana çatlak oluşumu ve gelişiminin analizi yapılmıştır.

Pajari [77] iki tane 200 mm ve iki tane 400 mm kalınlığındaki içi yuvarlak delikli plaklar üzerinde basit burulma deneylerini gerçekleştirerek bu plakların burulma davranışını araştırmıştır. Bu deneylerden elde etmiş olduğu burulma rijitliği değerlerini, temel hesap yöntemleri ile hesapladığı burulma rijitliği ile karşılaştırmıştır.

Colotti ve Spadea [78], çeşitli yüklere maruz betonarme elemanların çatlak kontrolü için analitik bir model önermişlerdir. Yumuşatılmış uzay kafes teorisini temel alarak oluşturdukları modeli, ayrı ayrı ve farklı kombinasyonlarda eğilmeye, kaymaya ve burulmaya maruz betonarme elemanlarda çatlak genişliğini belirlemede kullanmışlardır. Asal çekme gerilmelerinin hesaplanması ve uygun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin kabulü ile denge ve uygunluk şartları uygulanan modelde, iteratif işlemler ile çatlak genişliğini elde ederek grafiklerle vermişlerdir.

Rao ve Seshu [79], çelik lifli betonarme elemanlardaki burulma konulu çalışmalarına istinaden yayınladıkları makalede, 100x200x2000 mm boyutlarında farklı hacimsel oranlarda çelik lif içeren betonarme elemanlar üzerinde yaptıkları basit burulma deneyleri hakkında bilgiler vermişlerdir. Deney elemanlarının beton karışım oranlarını, hacimsel çelik lif oranlarını, dolayısıyla beton dayanımlarını değiştirerek bunlara karşılık küp basınç dayanımını, yarma dayanımını aynı tabloda vermişlerdir. Yine Şekil 16 'da görülen deney düzeneği üzerinde gerçekleştirdikleri deneylerin sonucu olarak eleman yüzeyindeki çatlakların yerini, elemanların burulma dayanımını, eksenel dönme miktarlarını, burulma

rijitliklerini, tablo ve grafikler halinde vermiş ve burulma dayanımının tahmini için yarı ampirik bir ifade önermişlerdir. Daha sonra önerilen yarı ampirik ifadeyi deneysel sonuçlarla, elastik ve plastik burulma teorilerinde verilen bağıntılarla karşılaştırarak, ve söz konusu ifadenin makul sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.



Şekil 16. Rao ve Seshu 'nun basit burulma deneylerinin gerçekleştirdikleri düzenek [79]

Jing ve Grünberg [80] birlikte ve ayrı ayrı eğilme, kayma ve burulma etkilerine maruz karbon lifleri ile güçlendirilmiş betonarme kutu kirişlerin burulma davranışını araştırmak amacıyla yeni bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Bu matematiksel modelin temelinde diyagonal basınç alanı teorisi olduğunu belirten yazarlar, problemin çözümünde malzeme özellikleri, deformasyon durumu, denge ve uygunluk şartlarını göz önüne alarak otuzyedinci denklem elde etmişlerdir. Diyagonal basınç çubuklardaki gerilmenin üniform olduğu ve beton ile karbon lifler arasında mükemmel bir eğilme davranışının olduğunu kabul ettikleri çalışmada yapmış oldukları statik analiz ile oluşturdukları matematiksel modelin deneylerle uyum içinde olduğunu göstermişlerdir.

Trahair [81], ilave boyuna kayma gerilmesi meydana getiren ince cidarlı açık elastik kesitlerin büyük miktarda dönmesi ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Yazar çalışmasında, dar kesitli dikdörtgen kirişlerin davranışını analiz ederek diğer genel enkesitli elastik kirişler için bu analiz yöntemini geliştirmiştir. Lineer olmayan dar Wagner enkesitleri için lineer olmayan burulmayı tanımlamış, ve bunun ile ilgili olarak bir bilgisayar programı

geliştirmiştir. Bu program ile yaygın enkesit özelliklerine sahip kirişleri çeşitli yük kombinasyonlar için analiz etmiş ve sayısal örneklerle karşılaştırmıştır.

Kayal [82], çalışmasında farklı düzeylerdeki eğilme ve burulma momentlerine maruz T enkesitli betonarme köprü ızgaralara kirişlerinin nihai burulma kapasitelerinin doğru olarak elde edilmesini olanaklı kılan plastik dönme kapasitesinin belirlenmesi için yanal eğilme ve uzay kafes teorilerini temel alan analitik yöntemler geliştirmiştir. Daha sonra yazar geliştirdiği bu yöntemlerin geçerliliğini deney sonuçlarıyla kanıtlamaya çalışmıştır.

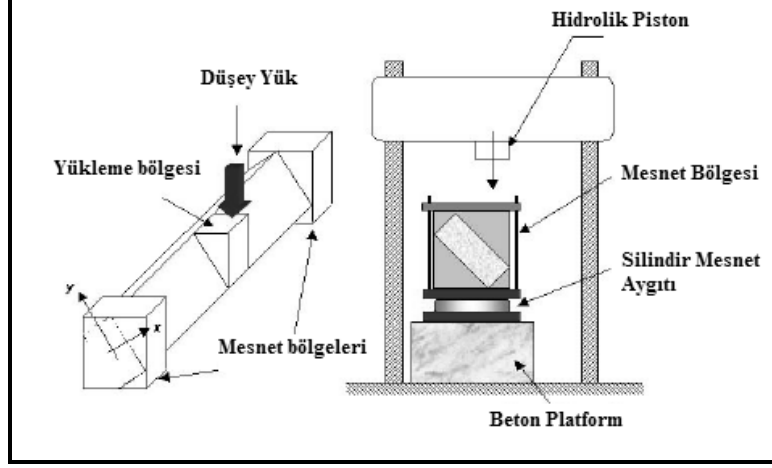
Khaoo ve Sharifian [83], farklı beton dayanımının çelik lifli hafif beton elemanların basit burulma etkisindeki davranışları üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmaya çalışmışlardır. Yazarlar yaptıkları deneylerde, beton basınç dayanımını, çelik lif hacmini ve lif görünüm oranını değişken olarak almışlardır. Ayrıca bu çalışmada burulma dayanımının belirlenmesi için bir yöntem geliştirilmiş ve bu yöntemin deney sonuçları ile uyumluluğu ortaya konularak, sonuç olarak deney değişkenlerinin burulma dayanımına etkilerinden söz edilmiştir.

Miki ve Niwa [84], betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının kaymaya karşı direnimini ifade etmek için kullanılan geleneksel iki boyutlu kafes modelini üç boyutlu kafes model olarak genişletmeye çalışmışlardır. Betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının burulma ve çift eksenli yüklemeler altındaki davranışlarını üç boyutlu kafes model yöntemiyle açıklamışlardır. Basit burulmaya ve tekrarlı burulma ve eğilme momentlerinin değişik kombinasyonlarındaki etkilere maruz betonarme kolon ve kirişler üzerinde yapılan deneyler ile statik analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca iki yönlü sismik yüklemeye maruz betonarme kolonların dinamik analizi de bu çalışmada ele alınmıştır. Son olarak üç boyutlu yüklemeler altındaki yapısal betonarme elemanların davranışlarının tahmini için üç boyutlu kafes modelin uygulanabilir olduğu, analitik ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak verilmiştir.

Chaisomphob vd. [85], iki ucundan ankastre mesnetli olan kirişi Şekil 17 'deki burulma momenti ve çift eksenli kayma gerilmesine maruz bırakarak uygulanan yükün dış merkezliliğinin ve açısının değişiminin deney elemanlarının davranışına etkisini incelemiştir. Elde edilen deneysel verileri bazı yapı şartnameleri ile de karşılaştırmışlardır.

Massa and Barbero [86], burulma, kesme ve eksenel yükler altındaki ince cidarlı kompozit kirişlerin analizi için basit bir yöntem geliştirmişlerdir. Yazarlar geliştirdikleri yöntemi geniş bir şekilde açıklayarak bu yöntemler ile sözkonusu yükleme durumları için

göçme tahmininde bulunmuşlar ve bu tahminleri daha önceden yapılmış olan deneysel çalışmalar ile karşılaştırmalı olarak çalışmalarında vermişlerdir.



Şekil 17. Çift eksenli kayma gerilmesi ve burulma düzeneği [85].

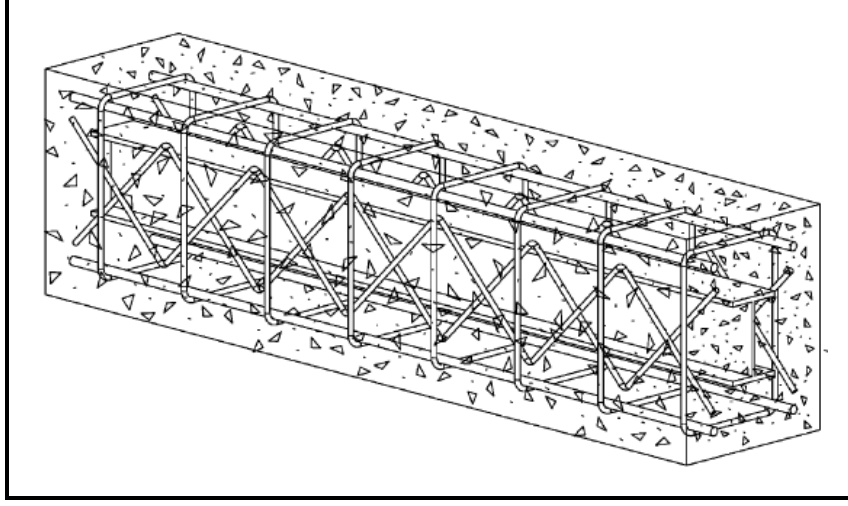
Tirasit and Kawashima [87], tekrarlı eğilme ve burulma etkilerini farklı kombinasyonlarda betonarme kolonlara uygulayarak bu elemanların elastik olmayan davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Bu amaçla yedi adet betonarme kolonu sabit aksenal kuvvet olmadan ve sabit aksenal kuvvet ile birlikte tek eksenli tekrarlı eğilme, tekrarlı eğilme ve burulma, tekrarlı burulma etkilerine maruz bırakarak test etmişlerdir. Yazarlar sonuç olarak dönme-yerdeğiştirme oranı olarak tanımladıkları bir parametrenin artmasıyla betonarme kolonların eğilme kapasitelerinin azaldığını ve eğilmede plastikleşmeden sonra göçmenin meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Hsu vd. [88], kompozit ve normal betonarme elemanların iki yan yüzünü Şekil 18 'deki gibi farklı şekilde donatarak bu şekilde üretilen betonarme ve betonarme kompozit elemanların basit eğilme ve burulma momenti etkisindeki davranışlarını araştırmışlardır. Yazarlar deneysel olarak gerçekleştirdikleri çalışmanın sonucunda kompozit ve normal betonarme elemanlarda Şekil 18 'deki gibi donatı kullanmanın bu elemanların burulma rijitliğini artırdığını belirtmişlerdir.

Salom vd. [89], basit burulma etkisindeki karbon lifli kompozit tabakalarla betonarme kirişlerin burulma dayanımlarını artırmayı amaçladıkları çalışmalarında 6 adet parapet kirişi imal ederek bu kirişler üzerinde burulma deneyleri yapmışlardır. Deney kirişlerinde üç farklı tip kompozit tabaka uygulanmıştır. Deney sonuçları bu uygulamanın parapet



kirişlerinin dayanımını artırdığını göstermiştir. Bu çalışmada ayrıca kompozit tabakalarının burulma dayanımına katkısını hesaplayabilmek için bir eşitlik geliştirilmiştir.



Şekil 18. Kiriş kenar yüzlerine yerleştirilmiş olan farklı donatılar [88].

Chen vd. [90], burulma momenti etkisindeki kare enkesitli kutu betonarme kirişlere boyuna doğrultuda kablo sensörleri yerleştirmişlerdir. Betonarme kirişlere tekrarlı burulma momenti etki ettirilen deneysel çalışmada kablo sensörler ile kirişte oluşan çatlakların yerinin saptanmasına çalışılmıştır.

Deifalla ve Ghobarah [91], çalışmalarında polimer lifler kullanarak burulma dayanımı artırılan betonlar için herhangi bir analitik model olmadığını belirtmişlerdir. Bu amaçla, burulma momentine maruz polimer liflerle güçlendirilmiş betonarme kirişler için basitleştirilmiş bir model önererek bu modelin geçerliliğini sayısal olarak kanıtlamaya çalışmışlardır. Önerilen modelin farklı kırılma modlarını içeren değişik parametrelerin etkilerini dikkate aldığını belirten yazarlar modelin geçerliliğini daha önce yapılmış olan deneysel dotalarla doğrulamışlardır. Ayrıca mevcut tasarım yöntemleri ile karşılaştırılan modelin kiriş dayanımını ve davranışını daha doğru tahmin ettiği de bu çalışmada belirtilmiştir.

Grene [92], tekrarlı burulma momenti ve burulma momentinin diğer etkilerle birlikte kombine yükler altındaki betonarme kirişlerde, rijitlik azalışı, ters diyagonal çatlakların oluşması, kayma akım bölgesi parametreleri, betonun yumuşaması, ezilmesi gibi

karakteristikleri belirlemeye çalıştığı araştırmasında, söz konusu yükler altındaki elemanların yük-yerdeğiştirme ilişkisinin tahmini için bir analitik model de önermiştir.

Egretzberger vd. [93], eğilme ve burulma momentlerinden kaynaklanan yerdeğiştirmelere sahip silikon konsol kiriş üzerinde meydana gelen gerilmeleri belirlemek amacıyla bir matematiksel model önermişlerdir. Yazarlar daha sonra bu modeli sonlu eleman analizi ile karşılaştırarak geçerliliğini kanıtlamaya çalışmışlardır.

Han vd. [94], beton doldurulmuş ince cidarlı tüplerin basit burulma altındaki davranışlarını sonlu eleman yöntemiyle analiz ederek, elde ettiği sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Daha sonra kompozit enkesitlerin burulma momenti altındaki şekildeğiştirmelerini ve nihai burulma momentini tahmin etmek için teorik model geliştirmişlerdir.

Hii ve Al-Mahaidi [95] fotogrametri tekniği kullanarak karbon lifle güçlendirilmiş dolu ve kutu enkesitlerin burulma davranışlarını araştırmışlardır. Karbon lifli polimerler ile kutu ve dolu enkesitleri dışardan sararak güçlendirmeye çalışmışlardır. Bu yöntemin kolay uygulanabilir olduğunu belirten yazarlar, karbon lif ile güçlendirmenin numunelerin davranışlarını değiştirmedeği, çatlak genişliğini azalttığı ve agrega aderansını artırdığı sonucuna varmışlardır.

Mazars vd. [96], kayma ve burulma etkisindeki elemanları çok lifli kiriş adı verilen eleman tipi ile modelleyerek, bu eleman tipinin kullanılabilir olup olmadığını araştırmışlardır. Bu amaçla söz konusu eleman tipi ile betonarme kolon ve U şeklinde bir duvar modelleyerek analiz yapmışlar ve analiz sonuçlarını mevcut tasarım yöntemleriyle kıyaslamışlardır.

Mo ve Fan [97], kompozit beton kutu kirişlerin üzerinde bir dizi burulma deneyleri yaparak, bu deney sonuçlarına bağlı olarak analitik bir model geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu modeli çalışmalarında ayrıntılı şekilde açıklayan yazarlar, önerdikleri yöntemi bazı yönetmeliklerle karşılaştırmışlardır.

Rao ve Seshu [98], basit burulma etkisine maruz çelik lifli beton elemanların, burulma momenti-dönme ilişkilerine ait bir analitik model önermişlerdir. Burulma momenti ile dönme açısının değişimini tahmin etmek için önerilen modelde betonun yumuşama etkisi dikkate alınmıştır.

Rao ve Seshu [99], bu çalışmalarında boyuna ve enine donatı ile basitçe donatılmış çelik lifli betonların burulma momenti etkisindeki davranışlarını araştırmışlardır. Yazarlar, yalnızca boyuna veya yalnızca enine donatı kullanımının çelik lifli betonun burulma

dayanımını artırmadığını, yalnızca sünekliliğini artırdığını ve çelik lif kullanımının da çatlama dayanımını artırdığını sonuç olarak belirtmişlerdir.

## 1.8. Bazı Standartlarda Burulma Etkisi ile İlgili Öneriler

### 1.8.1. EuroCode-2

Eurocode 2 [100] şartnamesinde burulma etkisindeki enkesitler için ince cidarlı tüp benzeşimi yaklaşımıyla burulma hesaplamaları için öneriler sunulmuştur (Şekil 19). 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,  $T_{ed}$  ; 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,  $A$  ; enkesitin toplam alanını,  $u$  ; enkesitin en dış çevresini,  $z_i$  ; cidar kenar uzunluğunu göstermek üzere,

$$t_{ef,i} = A/u \quad (23)$$

$$\tau_{t,i} = \frac{V_{sd,i}}{t_{ef,i} z_i} \quad (24)$$

$$T_{ed} = 2 \tau_{t,i} t_{ef,i} A_k \quad (25)$$

bağıntılarını önermektedir. Burulma için gerekli boyuna donatının hesaplanması için ise,  $u_k$ ;  $A_k$  alanının çevresini,  $f_{yl}$  ; boyuna donatının akma gerilmesini,  $\theta$  ; beton basınç çubuklarının boyuna eksenle yapmış olduğu açığı göstermek üzere; boyuna donatı alanı  $A_{sl}$  ;

$$A_{sl} = \frac{T_{ed} u_k}{2 A_k f_{yl}} \cot \theta \quad (26)$$

bağıntısı önerilmektedir. Enkesitteki burulma momentinin güvenle taşınabilmesi için,  $T_{ed} \leq T_{Rd1}$  ve  $T_{ed} \leq T_{Rd2}$  olması gerekir. Burada  $T_{Rd1}$  burulma sırasında ortaya çıkan beton basınç çubukları tarafından taşınabilecek en büyük burulma momentini ve  $T_{Rd2}$  donatı tarafından karşılanabilecek en büyük burulma momentini göstermek üzere,  $\nu = 0.7 - \frac{f_{ck}}{200} \geq 0.5$  olarak tanımlanmış ve

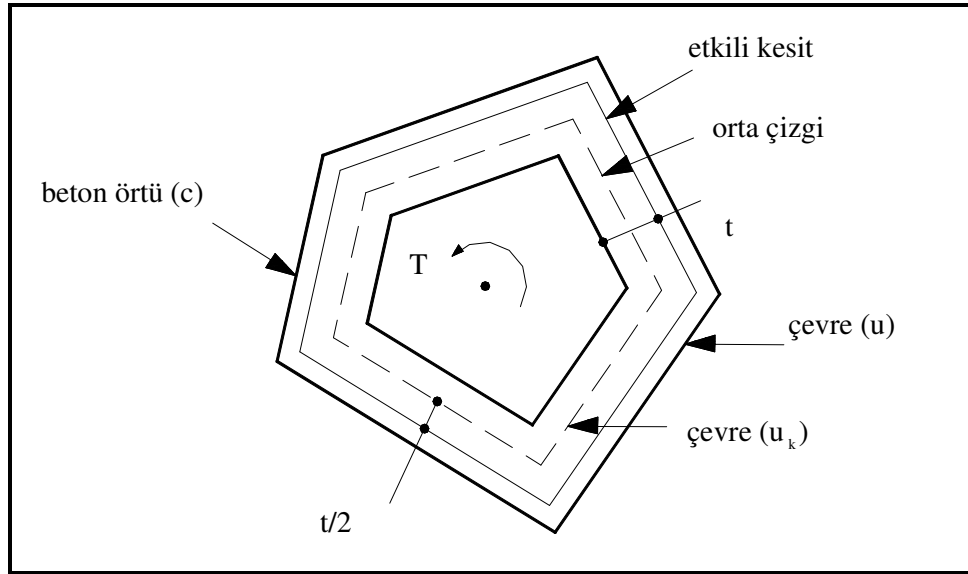
$$T_{Rd1} = 1.4 \nu f_{cd} t A_k \sin \theta \cos \theta \quad (27)$$

$$T_{Rd2} = \frac{2 A_k f_{ywd} A_{sw} \cot \theta}{s} \quad (28)$$

bağıntıları önerilmiştir. Eğer donatısı belli bir enkesit söz konusu ise Eurocode2;

$$T_{Rd2} = 2 A_k \sqrt{\left( \frac{A_{sw} f_{ywd}}{s} \right)} \sqrt{\left( \frac{A_{sl} f_{yld}}{u_k} \right)} \quad (29)$$

bağıntısı ile donatının taşıyabileceği burulma momentinin hesaplanabileceğini belirtmiştir.



Şekil 19. Eurocode-2 de burulma momentini hesabı için önerilen ince cidarlı enkesit [100]

### 1.8.2. ACI 318-1995

ACI 318-95 [44] yapı yönetmeliğinde basit burulma etkisindeki dikdörtgen bir enkesitin çatlama momenti MPa ve mm birimleri cinsinden,  $A_c$  ; enkesitin tüm alanını,  $P_c$  ; enkesitin tüm çevre uzunluğunu, göstermek üzere;

$$T_{cr} = 0.33 \sqrt{f_c} \frac{A_c^2}{P_c} \quad (30)$$

hesaplanması gerektiği önerilirken, burulma momentinin,  $A_l$  ; boyuna donatı alanını,  $A_t$  ; enine donatının bir kolunun alanını,  $f_{yl}$  ; boyuna donatının akma dayanımını,  $f_{yv}$  ; enine donatının akma dayanımını,  $A_o$  ; kayma akımının meydana geldiği tüm alanı,  $A_{oh}$  ; enine donatının orta ekseninin içinde kalan alanı,  $P_h$  ; enine donatının boyuna eksenin içinde kalan alanın çevre uzunluğunu göstermek üzere;

$$\cot \theta = \sqrt{\frac{A_l f_{yl} s}{A_t f_{yv} P_h}} \quad (31)$$

$$T = \frac{2 A_t f_{yv} A_o}{s} \cot \theta \quad (32)$$

bağıntılarıyla hesaplanabileceği önerilmiştir. Enkesitte oluşan burulma momentinin  $\phi = 0.85$  olmak üzere  $T_u \leq \phi T$  koşulunu sağlaması gerektiği bu şartnamede belirtilmiştir. Minimum enine donatı alanının;

$$A_{t(\min)} = 0.41 \frac{\sqrt{f_c}}{f_{yv}} \frac{A_c}{P_c} s \quad (33)$$

bağıntısıyla, minimum boyuna donatı alanının ise;

$$A_{l(\min)} = 0.66 \frac{\sqrt{f_c}}{f_{yl}} A_c - \frac{A_t}{s} P_h \frac{f_{yv}}{f_{yl}} \quad (34)$$

bağıntısıyla hesaplanabileceği de bu şartnamede belirtilmiştir. ACI 318-95 [44], çatlak genişliğini sınırlandırabilmek amacıyla enkesitte oluşabilecek maksimum burulma momentinin,

$$T_{\max} = 1.41 \sqrt{f_c} \frac{A_{0h}^2}{P_h} \quad (35)$$

bağıntısıyla hesaplanan değeri geçmemesi gerektiğini de belirtmiştir.

### 1.8.3. TS 500-(2000)

Bu şartnamede [101], S dikdörtgen enkesitler için,

$$S = \frac{b_w^2 h}{3} \quad (36)$$

olarak, tablalı enkesitler için;

$$S = \frac{1}{3} \sum x_i^2 y_i \quad (37)$$

olarak, dairesel veya dış bükey çok kenarlı enkesitler için

$$S = \frac{\pi D^3}{12} \quad (38)$$

olarak tanımlanmakta ve Şekil 20 'de gösterilen kutu enkesitlerde,

$$h_e \geq \frac{1}{5} x \quad \text{için,} \quad S = \frac{1}{3} x^2 y \quad (39)$$

$$h_e \leq \frac{1}{5} x \quad \text{için} \quad S = 2 b_k h_k h_e \quad (40)$$

olmak üzere burulmada çatlama momentinin;

$$T_{cr} = 1.35 f_{ctd} S \quad (41)$$

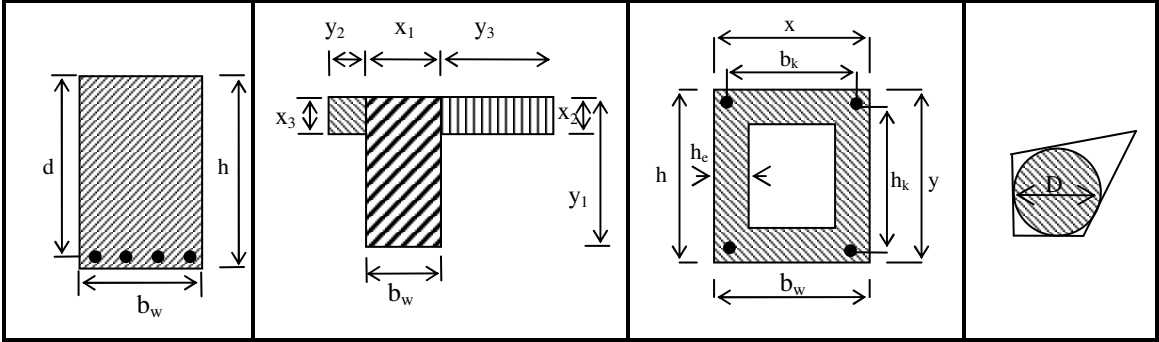
bağıntısıyla hesaplanması önerilmektedir. TS 500 minimum enine donatının,  $A_e = b_k h_k$  olmak üzere;

$$A_t = \frac{T_{cr} s}{2 A_e f_{ywd}} \quad (42)$$

bağıntısı ile ve minimum boyuna donatının ise  $u_e = 2(b_k + h_k)$  olmak üzere;

$$A_{sl} = \frac{A_{ot}}{s} u_e \frac{f_{ywd}}{f_{yd}} \quad (43)$$

bağıntısı ile hesaplanabileceğini belirtmektedir.



Şekil 20. Dikdörtgen, tablalı, kutu ve çok kenarlı dış bükey enkesitler [101].

### 1.9. Çalışmanın Amacı

Geleneksel veya yüksek performanslı betonarme kirişlerde, genellikle eğilme momenti ve kesme kuvveti burulma momentinden daha büyük olmaktadır. Ancak kenar kirişler, merdiven, balkon kirişleri, düzleminde eğri köprüler, ızgara sistemler gibi bazı yapı elemanlarında burulma etkisi de ihmal edilemeyecek boyutta olabilmektedir. Bu nedenle

bu tür elemanların burulma etkisindeki davranışlarının da bilinmesi gerekmektedir. Betonarme elemanlarda basit burulma ile ilgili yapılan çalışmaların hemen hepsi geleneksel betonla üretilen betonarme yapı elemanları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Günümüzde hızla gelişen teknolojiye bağlı olarak beton dayanımı da artmakta ve şantiyelerde bile yüksek performanslı betonlar üretilebilmektedir. Literatürde ve bazı yönetmeliklerde burulma ile ilgili verilen bağıntıların yüksek performanslı betonlar için de uygun olup olamayacağını belirlemek de gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmanın temel amacı, farklı enkesit boyutuna sahip farklı enine ve boyuna donatı düzeninde üretilen yüksek performanslı beton ve betonarme kirişlerin basit burulma etkisindeki davranışlarının incelenmesi ve deney sonuçlarına bağlı olarak elde edilen bağıntıların, diğer araştırmacılar tarafından ve/yada yönetmeliklerde önerilen bağıntılarla karşılaştırmalı olarak incelenmesidir. Ayrıca enine donatı şekli ve düzeninin burulma momenti taşıma kapasitesi üzerindeki etkileri de incelenmiştir.



## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Farklı şekilde donatılmış yüksek performanslı betonarme kirişlerin basit burulma momenti etkisindeki davranışlarının deneysel ve teorik olarak incelenmesini amaçlayan çalışmanın bu bölümünde kullanılan malzemeler, deney elemanları ve deney düzeneği ile bu elemanlar üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışma verilmektedir.

### 2.1. Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

#### 2.1.1. Agreganın Özellikleri

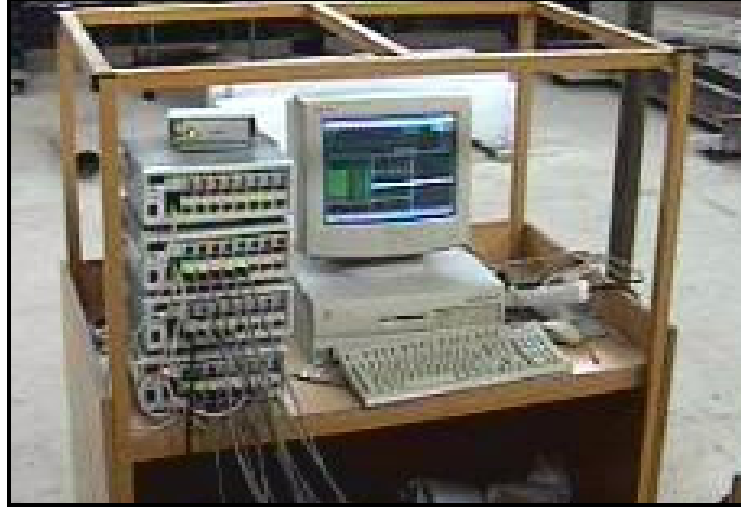
Yüksek performanslı beton üretiminde, Trabzon-Maçka-Meryemana yöresinden temin edilen kalker agregası kullanılmıştır. Maksimum tane boyutu 16 mm olan bu agregaların ince ve iri kısımları üzerinde TS 1097-6 [102] ve TS 3529 [103] 'a uygun olarak belirlenen fiziksel özellikleri Çizelge 2 'de, agreganın üretiminde kullanılan kayalardan alınan 75 mm çapında 150 mm yüksekliğindeki karot numuneler üzerinde belirlenen basınç dayanımı, deneyler esnasında karot numunelere enine ve boyuna doğrultuda yapıştırılan birimşekildeğiştirme ölçerleri (strain gauge) yardımıyla belirlenen elastisite modülü ve poisson oranı Çizelge 3 'de verilmiştir. Deneylerde 32 kanallı saniyede 8 'er veri toplama kapasitesine sahip TDG CODA marka veri toplama sistemi kullanılmıştır (Şekil 21).

Çizelge 2. Agreganın fiziksel özellikleri

Agrega tane boyutu	Gevşek birim kütle ( $\text{kg/m}^3$ )	Özgül kütle ( $\text{kg/m}^3$ )		Su emme (%)
		Kuru	Doygun	
İri (>4mm)	1415	2645	2660	0.43
İnce (<4mm)	1467	2630	2650	0.55

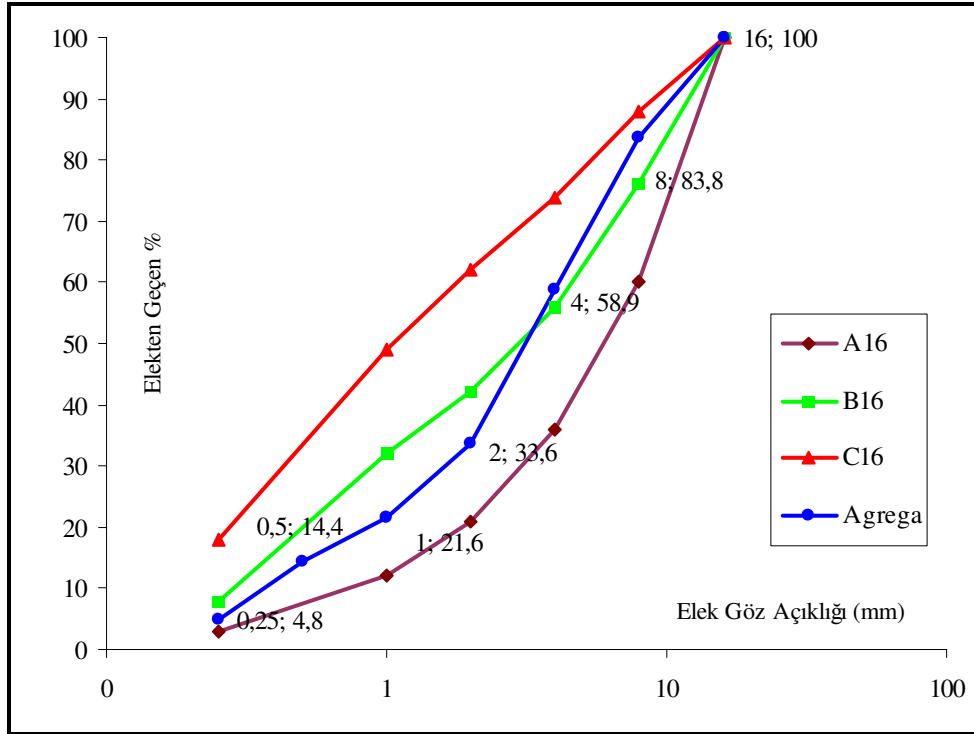
Çizelge 3. Agreganın mekanik özellikleri

Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	Poisson oranı
78	46000	0.17



Şekil 21. TDG CODA marka veri toplama sistemi

Bu agregalar üzerinde TS 1226 ISO 3310-2 [104] ve TS 1227 ISO 3310-1 [105] 'de belirtilen özelliklere sahip elek sistemi ile TS 706 EN 12620 [106] 'ye göre tane dağılımı deneyi yapılmış ve sınır eğrileri ile birlikte agrega granülometrisi Şekil 22 'de verilmiştir. Bu şekil yardımıyla belirlenen ve beton üretiminde kullanılacak agrega granülometrik birleşimi ise Çizelge 4 'de verilmektedir.



Şekil 22. Beton karışımına giren agrega granülometrisi

Çizelge 4. Agrega granülometrik bileşimi

Granülometrik sınıflar	Toplam kütle (%)
0-0.25	4.8
0.25-0.50 mm	9.6
0.50-1.00mm	7.2
1.00-2.00mm	12
2.00-4.00mm	25.3
4.00-8.00mm	24.9
8.00-16.00 mm	16.2

### 2.1.2. Çimento, Su, Mineral ve Kimyasal Katkı Maddelerinin Özellikleri

Yüksek performanslı beton üretimlerinde Ünye Çimento Fabrikası tarafından üretilen CEM-I (PÇ 42,5 R) tipi çimento kullanılmıştır. Bu çimentonun fabrikası tarafından belirlenen bazı fiziksel ve mekanik özellikleri, Çizelge 5 de verilmiştir.

### 2.1.3. Karışım Suyu Özellikleri

Beton üretiminde, agrega doyma suyu ve beton karma suyu olarak içme suyu kullanılmıştır.

### 2.1.4. Mineral ve Kimyasal Katkı Maddelerinin Özellikleri

Yüksek performanslı beton üretiminde mineral katkı maddesi olarak silis dumanı (mikro silis) kullanılmıştır. Mineral katkı maddesinin yaklaşık kimyasal bileşimi Çizelge 6 'da verilmiştir.

Beton üretiminde kimyasal katkı maddesi olarak ASTM C-494 F tipi süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

Çizelge 5. Beton üretiminde kullanılan çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

FİZİKSEL ÖZELİKLER		
Özgül kütle (g/cm <sup>3</sup> )		3.10
Blaine özgül yüzey (cm <sup>2</sup> /g)		3666
200µ elek üstünde kalan (%)		0.00
90µ elek üstünde kalan (%)		1.1
Priz süresi (saat)	Başlangıç:	2:30
(Vicat İndisi)	Bitiş:	4:00
Toplam hacim genişlemesi (mm)		1.0
MEKANİK ÖZELİKLER		
2.gün	Eğilme dayanımı (MPa)	5.6
	Basınç dayanımı (MPa)	28.9
7.gün	Eğilme dayanımı (MPa)	7.3
	Basınç dayanımı (MPa)	43.6
28.gün	Eğilme dayanımı (MPa)	8.5
	Basınç dayanımı (MPa)	52.9

Çizelge 6. Silis dumanının yaklaşık kimyasal bileşimi

Bileşen	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO <sub>3</sub>	MgO <sub>3</sub>	CrO <sub>3</sub>	Kızdırma kaybı	Serbest karbon
Kütlece(%)	75.0-86.0	1.2-2.5	1.5-4.5	1.0-2.0	4.0-7.0	1.5-4.0	1.0-3.5	1.0-1.5

### 2.1.5. Donatı Özellikleri

Yüksek performanslı betonarme kirişlerin basit burulma etkisindeki davranışlarının incelenmesi amacıyla üretilen deney numunelerinde çapları 8 mm, 12 mm ve 14 mm olan nervürlü donatılar kullanılmıştır. Bu donatılar üzerinde TS 138 EN 10002-1 [107] ve TS 708 [108] 'e uygun olarak 600 kN kapasiteli Losenhausewerk marka universal deney aleti (Şekil 23) yardımıyla merkezi çekme deneyi gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 7 'de verilmiştir.



Şekil 23. Üniversal deney aleti

Çizelge 7. Deney kirişlerinde kullanılan nervürlü donatıların bazı mekanik özellikleri

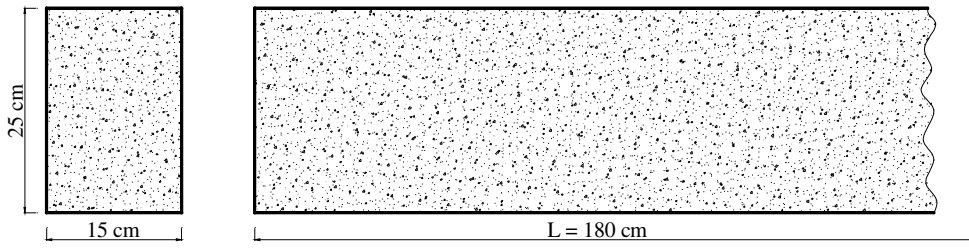

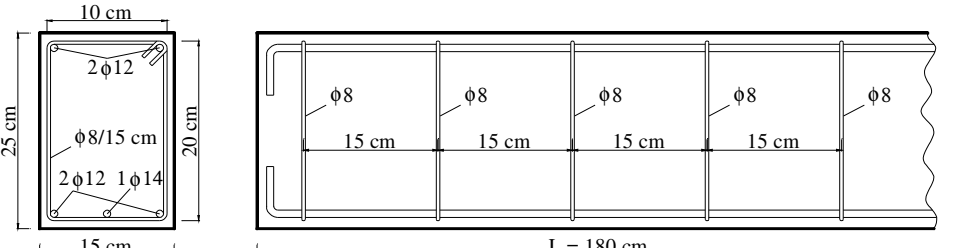

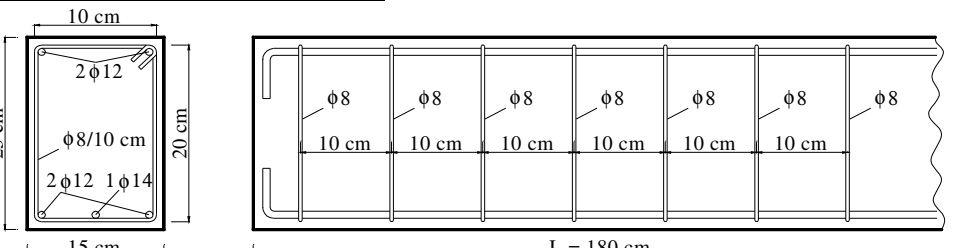
Anma çapı (mm)	Ortalama akma dayanımı (MPa)	Ortalama çekme dayanımı (MPa)	Ortalama kopma birim uzaması ( $\epsilon_{su}$ %)
$\phi 8$	496	615	23
$\phi 12$	486	600	26
$\phi 14$	431	537	20

## 2.2. Deney Numuneleri ve Üretimi


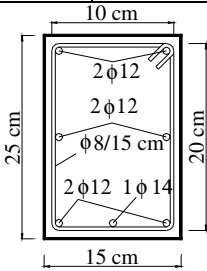
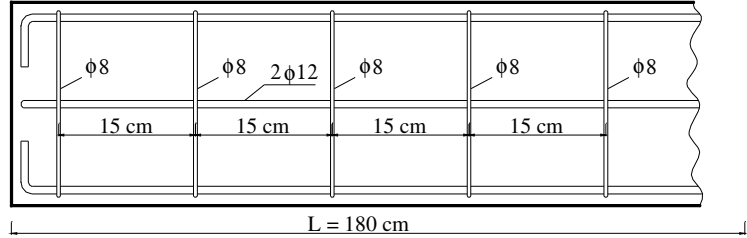

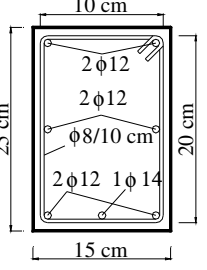
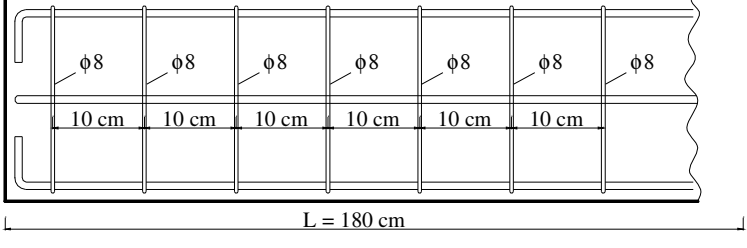

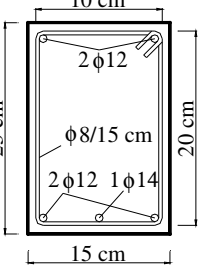
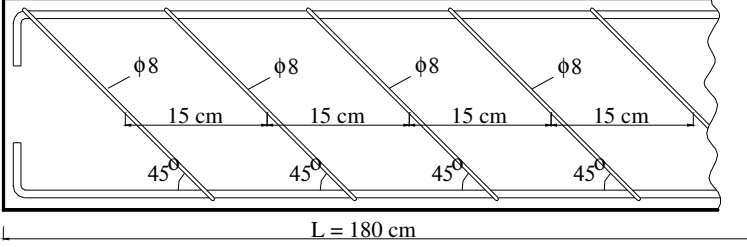
### 2.2.1. Deney Numuneleri

Yüksek performanslı betonarme kirişlerin burulma etkisindeki davranışlarının incelenmesi için enkesit boyutları 150mm x 250mm ve 150mm x 300mm olan 1800 mm uzunluğunda iki seri (T1 ve T2 serileri) deney numuneleri kullanılmıştır. Her bir seride biri donatısız olmak üzere onüç farklı donatı düzeni kullanılmıştır. Bu kirişlerin detayları ve donatı planları Çizelge 8 'de verilmiştir.


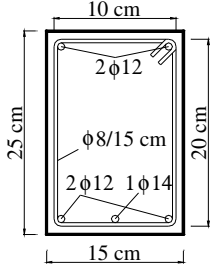
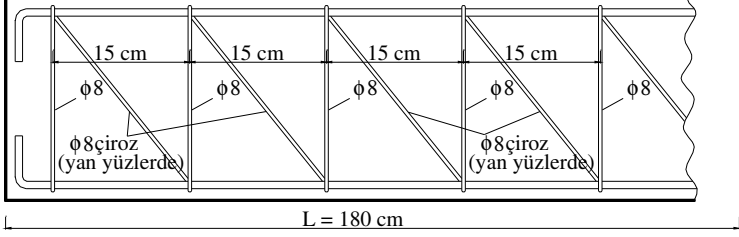

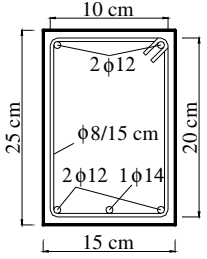
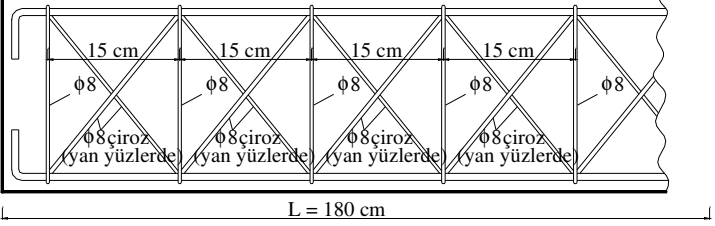

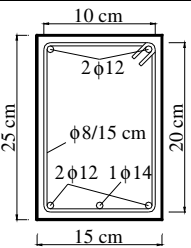
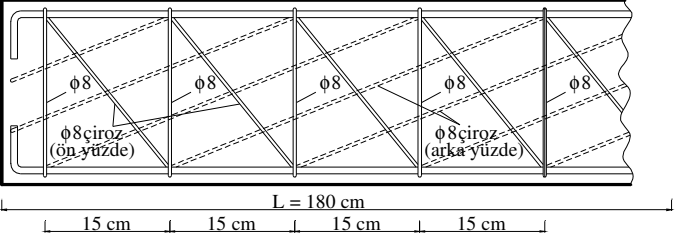
Çizelge 8. Burulma deneyleri için üretilen kirişlerin donatı düzenleri

<b>Kiriş Adı</b>		<b>T1B1</b>	Donatısız beton kiriş	
Montaj Donatısı		Yok		
Asal Çekme Donatısı		Yok		
Gövde Donatısı		Yok		
Etriye		Yok		
Donatı Açıklaması	Donatısız			
				
<b>Kiriş Adı</b>		<b>T1B2</b>		
Montaj Donatısı		2 $\phi 12$		
Asal Çekme Donatısı		2 $\phi 12$ + 1 $\phi 14$		
Gövde Donatısı		Yok		
Etriye Aralığı		150 mm		
Donatı Açıklaması	150 mm etriye aralığına sahip normal donatı kul.			
				
<b>Kiriş Adı</b>		<b>T1B3</b>		
Montaj Donatısı		2 $\phi 12$		
Asal Çekme Donatısı		2 $\phi 12$ + 1 $\phi 14$		
Gövde Donatısı		Yok		
Etriye Aralığı		100 mm		
Özel Donatı Açıklaması	100 mm etriye aralığına sahip normal donatı kul.			
				

Çizelge 8 'in devamı


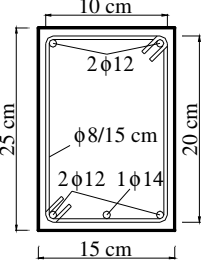
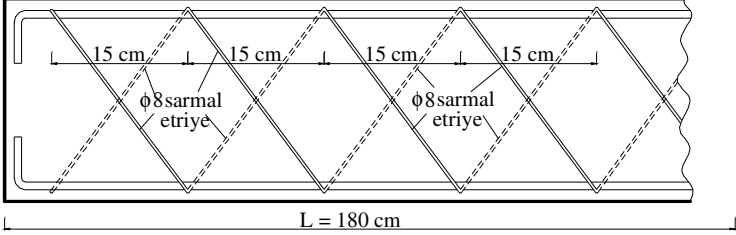

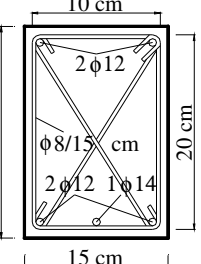
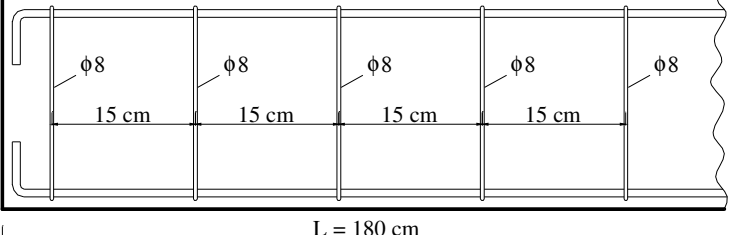

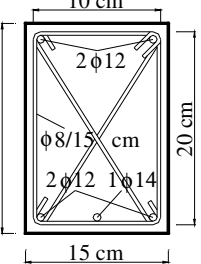
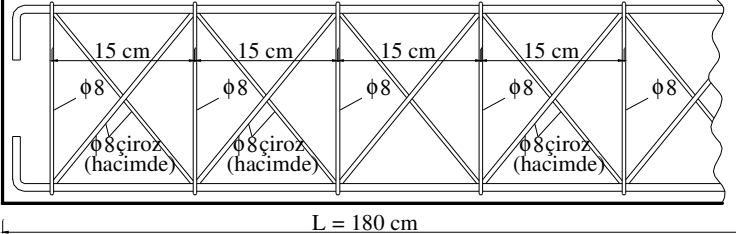
<b>Kiriş Adı</b>	<b>T1B4</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi 12$	
Asal Çekme Donatısı	2 $\phi 12$ +1 $\phi 14$	
Gövde Donatısı	2 $\phi 12$	
Etriye Aralığı	150 mm	
Özel Donatı Açıklaması	Gövde donatısı ile 150 mm aralıklı etriye kull.	
		
<b>Kiriş Adı</b>	<b>T1B5</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi 12$	
Asal Çekme Donatısı	2 $\phi 12$ +1 $\phi 14$	
Gövde Donatısı	2 $\phi 12$	
Etriye Aralığı	100 mm	
Özel Donatı Açıklaması	Gövde donatısı ile 100 mm aralıklı etriye kull.	
		
<b>Kiriş Adı</b>	<b>T1B6</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi 12$	
Asal Çekme Donatısı	2 $\phi 12$ +1 $\phi 14$	
Gövde Donatısı	Yok	
Etriye Aralığı	150 mm	
Özel Donatı Açıklaması	45 derece açılı etriye kul.	
		

Çizelge 8 'in devamı


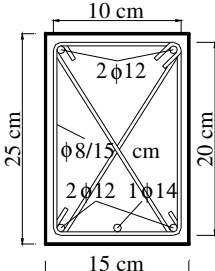
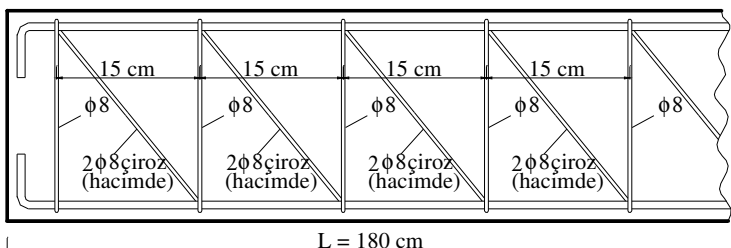
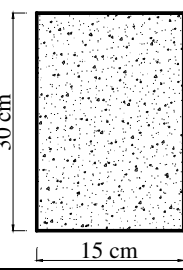
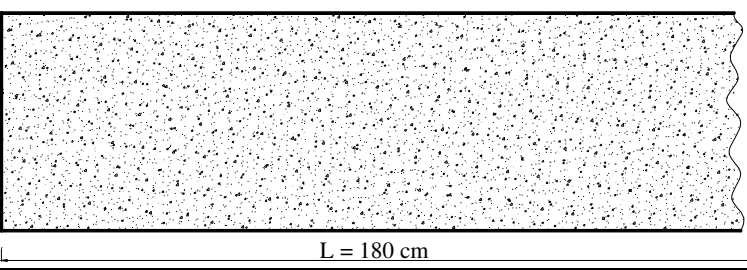

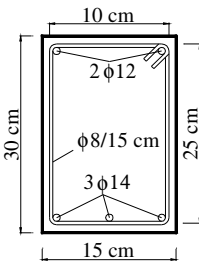
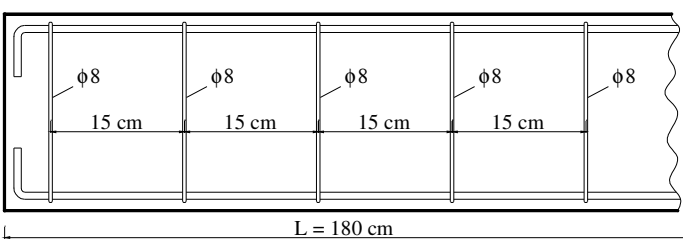
<b>Kiriş Adı</b>	<b>T1B7</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi 12$	
Asal Çekme Donatısı	2 $\phi 12$ +1 $\phi 14$	
Gövde Donatısı	Yok	
Etriye Aralığı	150 mm	
Özel Donatı Açıklaması	Etriyeler arasında tek doğrultuda diyagonal kl.	
		
<b>Kiriş Adı</b>	<b>T1B8</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi 12$	
Asal Çekme Donatısı	2 $\phi 12$ +1 $\phi 14$	
Gövde Donatısı	Yok	
Etriye Aralığı	150 mm	
Özel Donatı Açıklaması	Etriyeler arasında çift doğrultuda diyagonal kl.	
		
<b>Kiriş Adı</b>	<b>T1B9</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi 12$	
Asal Çekme Donatısı	2 $\phi 12$ +1 $\phi 14$	
Gövde Donatısı	Yok	
Etriye Aralığı	150 mm	
Özel Donatı Açıklaması	Etriyeler arasında detaydaki diyagonal kul.	
		




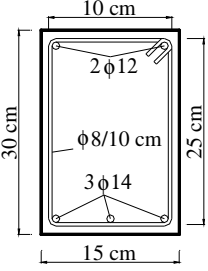
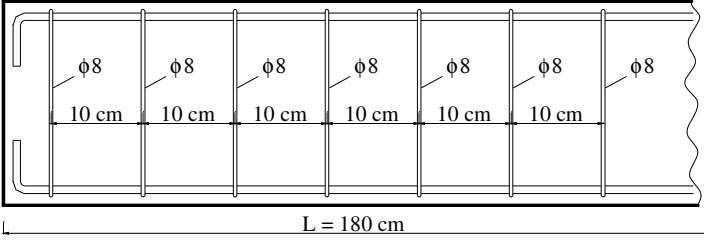

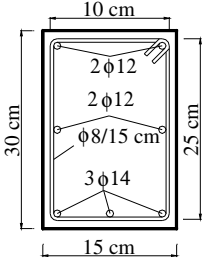
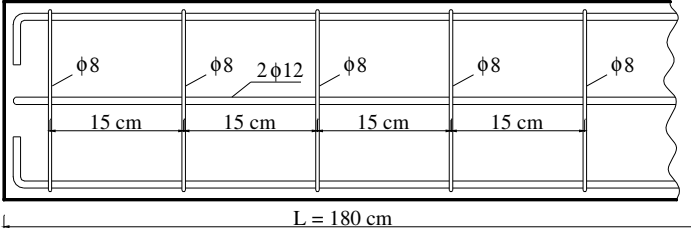

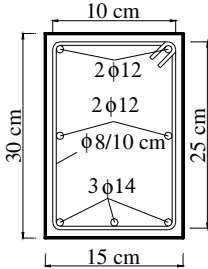
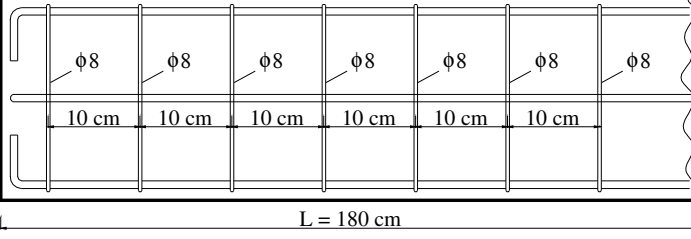
Çizelge 8 'in devamı

<b>Kiriş Adı</b>	<b>T1B10</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi 12$	
Asal Çekme Donatısı	2 $\phi 12$ + 1 $\phi 14$	
Gövde Donatısı	Yok	
S. Etriye Aralığı	150 mm	
Özel Donatı Açıklaması	Sarmal etriye kullanımı	
		
<b>Kiriş Adı</b>	<b>T1B11</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi 12$	
Asal Çekme Donatısı	2 $\phi 12$ + 1 $\phi 14$	
Gövde Donatısı	Yok	
Etriye Aralığı	150 mm	
Özel Donatı Açıklaması	Etriye kesitinde çift diyagonal kullanımı.	
		
<b>Kiriş Adı</b>	<b>T1B12</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi 12$	
Asal Çekme Donatısı	2 $\phi 12$ + 1 $\phi 14$	
Gövde Donatısı	Yok	
Etriye Aralığı	150 mm	
Özel Donatı Açıklaması	Etriyeler arasında hacimsel diyagonal kul.	
		


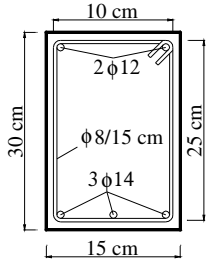
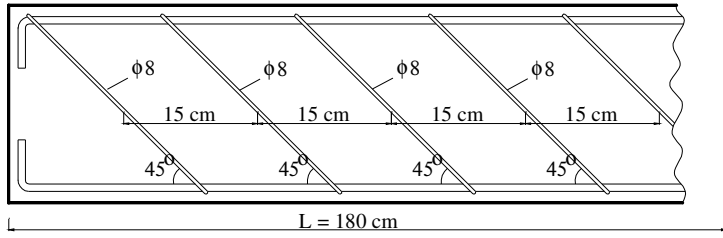

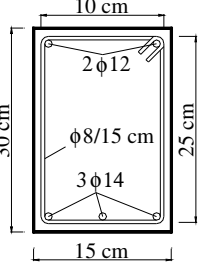
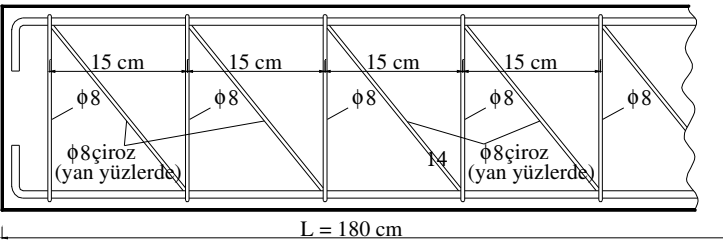

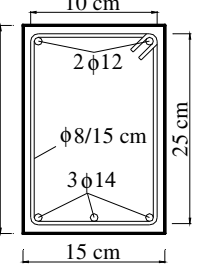
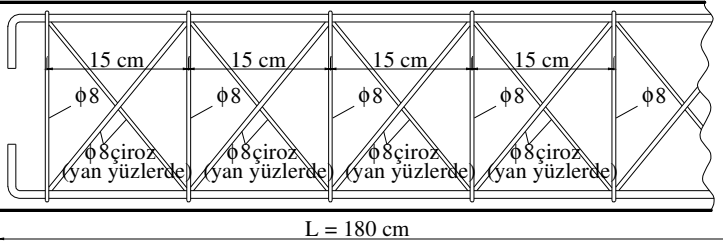
Çizelge 8 'in devamı

<b>Kiriş Adı</b>	<b>T1B13</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi 12$	
Asal Çekme Donatısı	2 $\phi 12$ +1 $\phi 14$	
Gövde Donatısı	Yok	
S. Etriye Aralığı	150 mm	
Özel Donatı Açıklaması	Etriyeler arasında hacimsel diyagonal kul.	
		L = 180 cm
<b>Kiriş Adı</b>	<b>T2B1</b>	<p style="text-align: center;">Donatısız beton kiriş</p>
Montaj Donatısı	Yok	
Asal Çekme Donatısı	Yok	
Gövde Donatısı	Yok	
Etriye Aralığı	Yok	
Özel Donatı Açıklaması		
		L = 180 cm
<b>Kiriş Adı</b>	<b>T2B2</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi 12$	
Asal Çekme Donatısı	3 $\phi 14$	
Gövde Donatısı	Yok	
Etriye Aralığı	150 mm	
Özel Donatı Açıklaması	150 mm etriye aralığına sahip normal donatı kul.	
		L = 180 cm


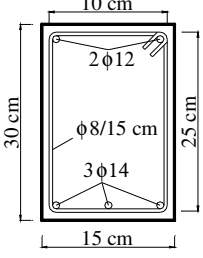
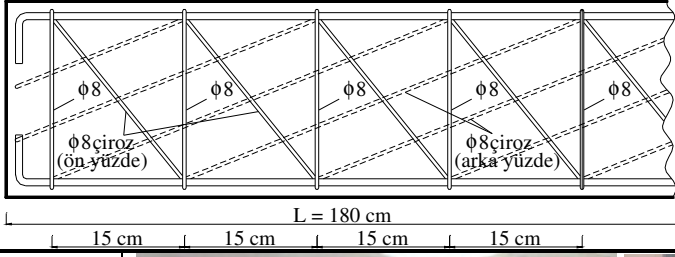

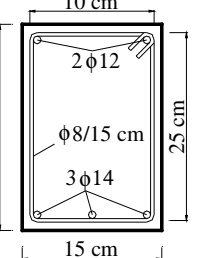
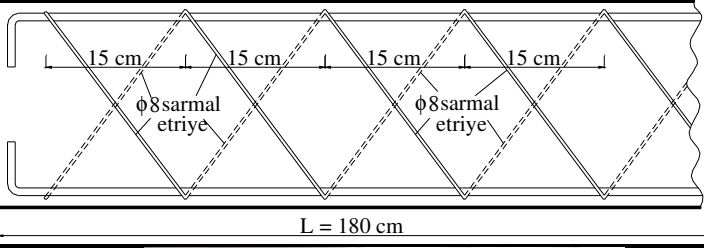

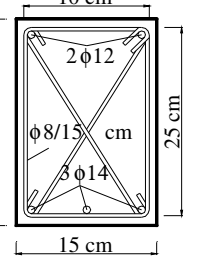
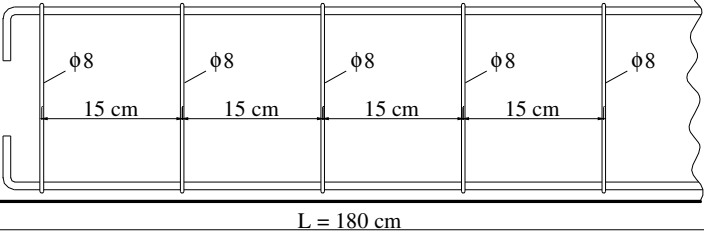
Çizelge 8 'in devamı

<b>Kiriş Adı</b>	<b>T2B3</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi$ 12	
Asal Çekme Donatısı	3 $\phi$ 14	
Gövde Donatısı	Yok	
Etriye Aralığı	100 mm	
Özel Donatı Açıklaması	100 mm etriye aralığına sahip normal donatı kul.	
		
<b>Kiriş Adı</b>	<b>T2B4</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi$ 12	
Asal Çekme Donatısı	3 $\phi$ 14	
Gövde Donatısı	2 $\phi$ 12	
Etriye Aralığı	150 mm	
Donatı Açıklaması	Gövde donatısı ile 150 mm aralıklı etriye kull.	
		
<b>Kiriş Adı</b>	<b>T2B5</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi$ 12	
Asal Çekme Donatısı	3 $\phi$ 14	
Gövde Donatısı	2 $\phi$ 12	
Etriye Aralığı	100 mm	
Donatı Açıklaması	Gövde donatısı ile 100 mm aralıklı etriye kull.	
		

Çizelge 8 'in devamı


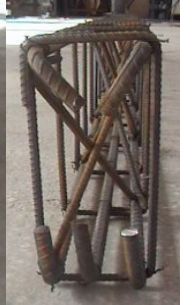
<b>Kiriş Adı</b>	<b>T2B6</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi 12$	
Asal Çekme Donatısı	3 $\phi 14$	
Gövde Donatısı	Yok	
Etriye Aralığı	150 mm	
Özel Donatı Açıklaması	45 derece açılı etriye kul.	
		
<b>Kiriş Adı</b>	<b>T2B7</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi 12$	
Asal Çekme Donatısı	3 $\phi 14$	
Gövde Donatısı	Yok	
Etriye Aralığı	150 mm	
Özel Donatı Açıklaması	Etriyeler arasında tek doğrultuda diyagonal kl.	
		
<b>Kiriş Adı</b>	<b>T2B8</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi 12$	
Asal Çekme Donatısı	3 $\phi 14$	
Gövde Donatısı	Yok	
Etriye Aralığı	150 mm	
Özel Donatı Açıklaması	Etriyeler arasında çift doğrultuda diyagonal kl.	
		

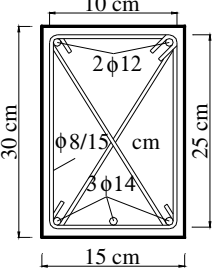
Çizelge 8 'in devamı

<b>Kiriş Adı</b>	<b>T2B9</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi 12$	
Asal Çekme Donatısı	3 $\phi 14$	
Gövde Donatısı	Yok	
Etriye Aralığı	150 mm	
Özel Donatı Açıklaması	Etriyeler arasında detaydaki diyagonal kul.	
		
		L = 180 cm
<b>Kiriş Adı</b>	<b>T2B10</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi 12$	
Asal Çekme Donatısı	3 $\phi 14$	
Gövde Donatısı	Yok	
S. Etriye Aralığı	150 mm	
Özel Donatı Açıklaması	Sarmal etriye kullanımı	
		
		L = 180 cm
<b>Kiriş Adı</b>	<b>T2B11</b>	
Montaj Donatısı	2 $\phi 12$	
Asal Çekme Donatısı	3 $\phi 14$	
Gövde Donatısı	Yok	
Etriye Aralığı	150 mm	
Özel Donatı Açıklaması	Etriye kesitinde çift diyagonal kullanımı.	
		
		L = 180 cm

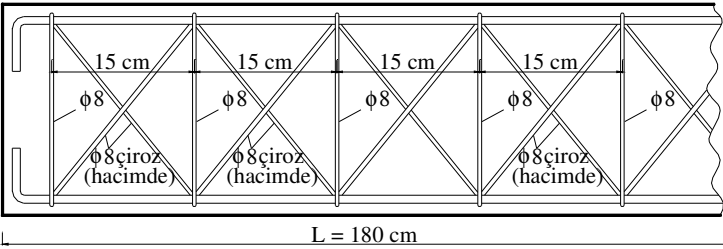
Çizelge 8 'in devamı

Kiriş Adı		T2B12
Montaj Donatısı		2 $\phi 12$
Asal Çekme Donatısı		3 $\phi 14$
Gövde Donatısı		Yok
Etriye Aralığı		150 mm
Özel Donatı Açıklaması	Etriyeler arasında hacimsel diyagonal kul.	


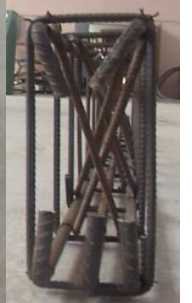


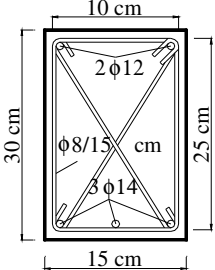
10 cm  
30 cm  
2  $\phi 12$   
 $\phi 8/15$  cm  
3  $\phi 14$   
15 cm



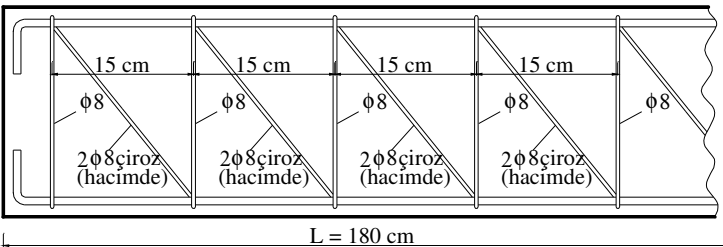
15 cm  
 $\phi 8$   
 $\phi 8$  ciroz (hacimde)  
L = 180 cm

Kiriş Adı		T2B13
Montaj Donatısı		2 $\phi 12$
Asal Çekme Donatısı		3 $\phi 14$
Gövde Donatısı		Yok
S. Etriye Aralığı		150 mm
Özel Donatı Açıklaması	Etriyeler arasında hacimsel diyagonal kul.	



10 cm  
30 cm  
2  $\phi 12$   
 $\phi 8/15$  cm  
3  $\phi 14$   
15 cm



15 cm  
 $\phi 8$   
2  $\phi 8$  ciroz (hacimde)  
L = 180 cm

### 2.2.2. Beton Üretimi, Yerleştirilmesi ve Kürü

Yüksek performanslı beton üretiminde maksimum agrega tane boyutu 16 mm olan ve agrega granülmétrik bileşimi Çizelge 2' de verilen agrega kullanılmıştır. Su/çimento oranı 0.3 alınarak yapılan karışım hesaplarında mutlak hacim yöntemi kullanılmıştır [109]. Bu yöntemle göre  $W_c$ ,  $W_w$ ,  $V_w$ ,  $V_h$  sırasıyla yerine konmuş, 1 m<sup>3</sup> betondaki çimento kütleini (kg/m<sup>3</sup>), agrega kütleini (kg/m<sup>3</sup>), su hacmini (dm<sup>3</sup>), hapsedilmiş hava miktarını (dm<sup>3</sup>),  $\gamma_c$  ve  $\gamma_a$  ise sırasıyla çimento ve agreganın (DKY) özgül kütleini (kg/dm<sup>3</sup>) göstermek üzere mutlak agrega hacmi;

$$\frac{W_a}{\gamma_a} = 1000 - \left( \frac{W_c}{\gamma_c} + V_w + V_h \right) \quad (44)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Bu agreganın  $i$  adet ayrı agrega sınıfından meydana geldiği ve  $\beta_i$  ile  $\gamma_{ai}$  'nin sırasıyla her bir tane sınıfının kütlece oranı ile birim kütlelerini gösterdiği dikkate alındığında toplam agrega kütlesi (44) bağıntısı yerine;

$$\sum \left( \frac{\beta_i \times W_a}{\gamma_{ai}} \right) = 1000 - \left( \frac{W_c}{\gamma_c} + V_w + V_h \right) \quad (45)$$

bağıntısı ile daha hassas bir şekilde belirlenebilmektedir.

Bu şekilde belirlenen agrega kütlesi doymun kuru yüzeyli agrega kütlesidir. Bundan doğal nemdeki agrega kütlesine geçmek için;  $SE$  ve  $DN$  sırası ile agreganın kütlece su emme ve doğal nem oranlarını göstermek üzere;

$$DS = (SE - DN) \times W_a \quad (46)$$

bağıntısı ile belirlenen doyma suyu miktarını ( $\text{kg/m}^3$ ), (44) bağıntısı ile belirlenen  $W_a$  değerinden çıkartmak gerekmektedir. Agreganın kütlesi (45) bağıntısıyla hazırlandığı takdirde, doyma suyunun da buna bağlı olarak her bir agrega tane sınıfı için hazırlanması dolayısıyla da toplam doyma suyu miktarının,

$$DS = \sum [(SE)_i - (DN)_i] \times W_{ai} \quad (47)$$

bağıntısı ile hesaplanması gerekmektedir.

Yukarıda belirtilen esaslar doğrultusunda hazırlanan yüksek performanslı beton bileşimi Çizelge 9 'da verilmektedir.

Kalıplarına donatısı yerleştirilerek hazırlanan deney numunelerine, Kul Hazır Beton San.Ltd. Şti.'ne ait beton santralinde, yukarıdaki karışım oranlarına uygun, gözetim altında üretilen beton üç aşamada yerleştirilmiştir. Her aşamada daldırma tipi vibratör kullanılarak betonların kalıplarına iyice yerleştirilmesi sağlanmıştır. Tek harmanda üretilen beton

numunelerinin basınç dayanımlarının tespiti amacıyla oniki Adet 150 mm çapında 300 mm yüksekliğinde standart silindir numuneler alınmıştır.

Çizelge 9. Yüksek performanslı beton bileşimi

S/Ç	Su (kg/m <sup>3</sup> )	Çimento (kg/m <sup>3</sup> )	Toplam agrega (kg/m <sup>3</sup> )	Doyma suyu (kg/m <sup>3</sup> )	Silis dumanı (kg/m <sup>3</sup> )	Süper akışkanlaştırıcı (kg/m <sup>3</sup> )
0.30	150	500	1565	16.08	50	22

Deney numuneleri priz alırken oluşan rötrenin zararlı olmaması için, beton dökümünden yaklaşık üç saat sonra su tutucu ıslak çuvallar ile örtülmüştür. Deney numuneleri ve standart silindir numuneler bir gün laboratuvar ortamında kalıplarda bekletilmiştir. Bir gün sonra kalıplarından çıkarılan standart silindir numuneler sıcaklığı  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  olan kür havuzunda 28. güne kadar bekletildikten sonra buradan çıkarılarak nemi  $\% 75 \pm \%5$  olan laboratuvar ortamında saklanmışlardır. Burulma deneyine tabi tutulacak beton ve betonarme kiriş numuneleri ise, üç gün sonra yan kalıpları çıkartılarak üzerlerine örtülen su tutucu ıslak çuvallar yardımıyla 28. güne kadar sürekli ıslak kalacak şekilde tutulmuştur. Bu günden sonra deney numuneleri, sıcaklığı  $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  ve bağıl nemi  $\% 75 \pm \%5$  olan laboratuvar ortamında deney anına kadar saklanmışlardır.

Deney numunelerinin sayılarının fazla olması bu nedenle de deneylerinin uzun süre alması nedeniyle, zamanla dayanım değişiminin minimum düzeyde olabilmesini sağlamak amacıyla numunelerin üretimlerinden 45 gün sonra deneylere başlanmıştır. Standart silindir numuneler üzerinde 28. ve 45. günlerde merkezi basınç deneyleri WP300-EN tipinde 3000 kN kapasiteli Şekil 24 'de görülen hidrolik pres kullanılarak, pratik olarak 0.15 MPa/s yükleme hızıyla merkezi basınç deneyleri yapılarak söz konusu betonların ortalama basınç dayanımları belirlenmiş, aradaki dayanım farkı ortalamasının yaklaşık  $\% 1$  olduğu görülerek burulma deneylerinin yapılmasına 45. günden itibaren başlanmıştır. Standart silindir numunelerinin 28 ve 45 günlük basınç dayanımları Çizelge 10 'da verilmiştir. Deneylerde standart silindir beton numunelere boyuna doğrultuda yapıştırılan aktif boyu 120 mm olan birim şekildeğiştirme ölçerler (straining gauge) [110] yardımıyla birim kısaltmaları belirlenmiş ve Şekil 25 'de verilmiştir.

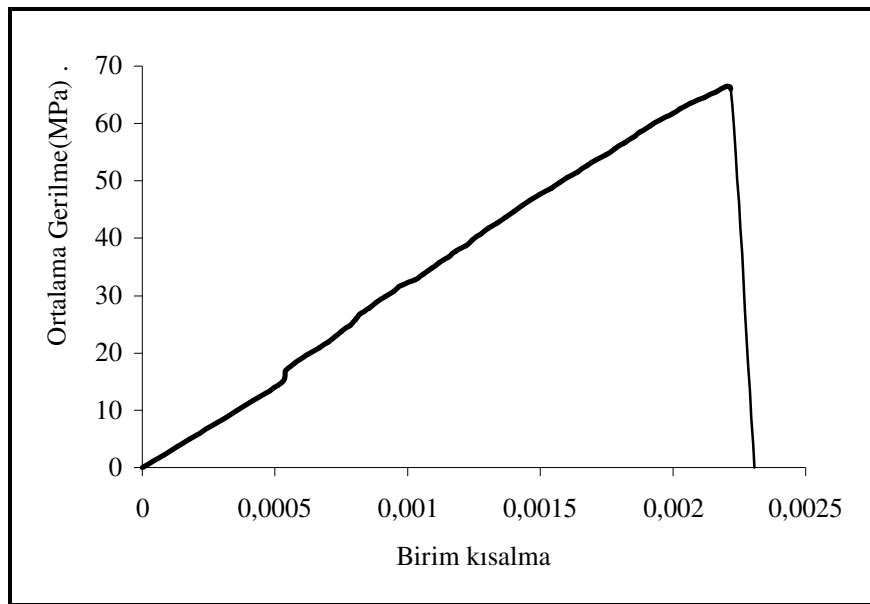




Şekil 24. Hidrolik pres

Çizelge 10. Standart silindir numune dayanımları

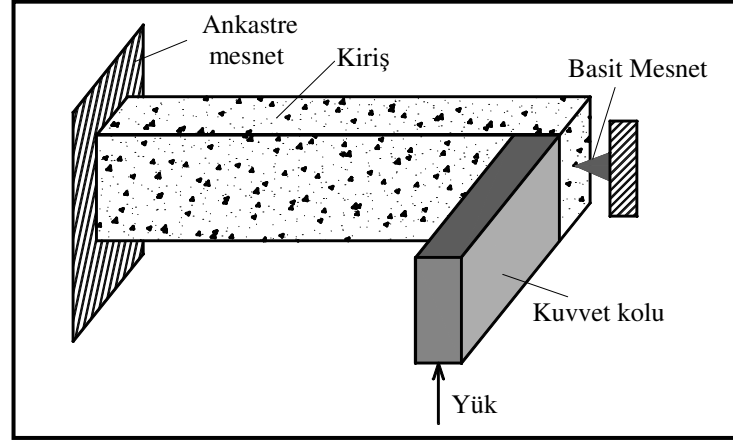
$f_{ck}(28)$	$f_{cm}(28)$	Standart sapma <sub>(28)</sub>	$f_{ck}(45)$	$f_{cm}(45)$	Standart sapma <sub>(28)</sub>	Ortalama dayanım farkı %
66	75.2	7.18	66.6	76.83	7.99	1.11



Şekil 25. Ortalama gerilme-şekildeğiştirme grafiği

### 2.3. Deney Düzenegi ve Burulma Deneyleri

Yüksek performanslı beton ve betonarme kirişlerin basit burulma deneyleri için Şekil 26 'da şematik olarak görülen deney düzenegi hazırlanmıştır. Bu düzenekte deney numunelerine burulma momenti, basit mesnede oturan kiriş ucuna kuvvet kolu yardımıyla uygulanan yük ile etki ettirilmektedir. Deney düzenegi Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı ve Malzeme Laboratuvarı 'nda mevcut olan dayanma duvarı platformuna oturturulmuştur. Bu dayanma duvarının döşeme ve duvarlarında mevcut olan ankraj deliklerine çelik profiller ile, bu çalışma için özel olarak yapılmış olan mesnetler ankre edilerek deney düzenegi hazır hale getirilmiştir (Şekil 27).



Şekil 26. Şematik olarak burulma deney düzenegi



Şekil 27. Burulma deney düzeneginin mesnetleri

Ankastre mesnet ikişer adet L100 'lük ve U200 'lük çelik profiller yardımıyla dayanma yapısının tabanı üzerinde altı adet 32 mm lik cıvata kullanılarak oluşturulmuştur. Deney numunesi destek plakaları ve 16 mm lik altı adet cıvatanın yardımıyla bağlanmıştır (Şekil 28).



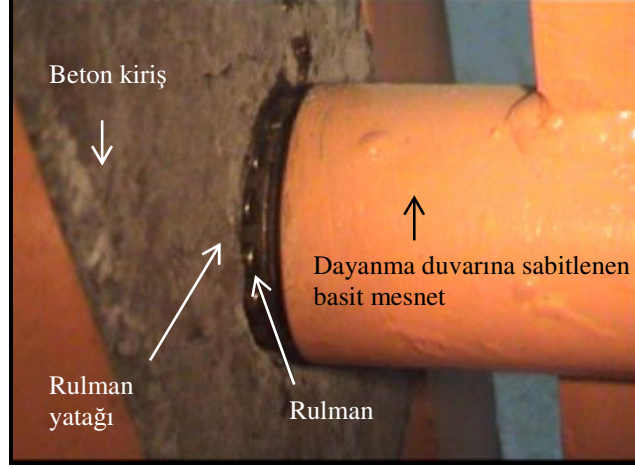
Şekil 28. Kirişin ankastre mesnede cıvatalar ve destek plakaları ile tespiti

Deney numunelerine burulma momenti, kiriş ucuna yerleştirilen bir kolla verilmiştir. Çelik profillerden oluşan bu kuvvet kolu altı adet 16 mm 'lik cıvataların sıkılmasıyla kiriş ucuna bağlanmıştır (Şekil 29).



Şekil 29. Kuvvet kolu düzeneği

Uygulanan burulma momenti nedeniyle kiriş ucunun kendi ekseninde rahatça dönebilmesi için dayanma duvarı yapısına sabitlenen bir rulman mili ile beton dökümü sırasında kalıplara yerleştirilen rulman yatakları arasında bir rulman kullanılmıştır. (Şekil 30). Böylece kirişlerin tam eksenlerine gelecek şekilde oluşturulan bu sistem sayesinde deney numunelerinin basit burulma etkisi altında davranış göstermesi sağlanmıştır.



Şekil 30. Beton veya betonarme kirişlerin basit mesnet detayı

Burulma momentini serbest açıklıkları 1400 mm olan beton veya betonarme kiriş deney numunelerine etki ettirmek amacıyla hazırlanan deney düzeneğine ek olarak, burulma momenti altında kirişlerin dönmelerinin belirlenmesi için Şekil 31 'de görülen bir ölçüm düzeneği hazırlanmıştır.



Şekil 31. Burulma deney düzeneği ve ölçüm çerçevesi

Hazırlanan ölçüm düzeneği üzerine ölçü boyları 150 mm ve 50 mm olan lineer potansiyometrik cetveller (Şekil 32) monte edilmiştir. Beton veya betonarme elemana burulma momenti etki ederken kiriş numunesi kendi ekseninde dönmeye çalışmakta ve kiriş yüzleri buldukları konumdan itibaren bir miktar deplasman yapmaktadır. Bu cetveller deney numunesi etrafında bu dönmeleri okuyacak tarzda yerleştirilmiştir.



Şekil 32. Potansiyometrik cetveller

Kiriş deney numuneleri yan yüzlerine betonun birim uzama ve birim kısalma değerlerini deney boyunca belirleyebilmek amacıyla aktif boyu 120 mm olan şekildeğiştirme ölçerleri (KC-120-120-A1-11 Tipi) yerleştirilmiştir.

Yüksek performanslı betonarme kirişlerin burulma davranışlarının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen bu deney düzeneğine kiriş numuneleri ve ölçüm sistemleri yerleştirildikten sonra 50 ton kapasiteli bir piston ve yükölçer (loadcell) yardımıyla sabit bir yükleme hızında burulma deneyleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 33). Deneyler boyunca uygulanan yük deney numunelerinin şekildeğiştirmeleri veri kayıt sistemi ile kaydedilmiştir.

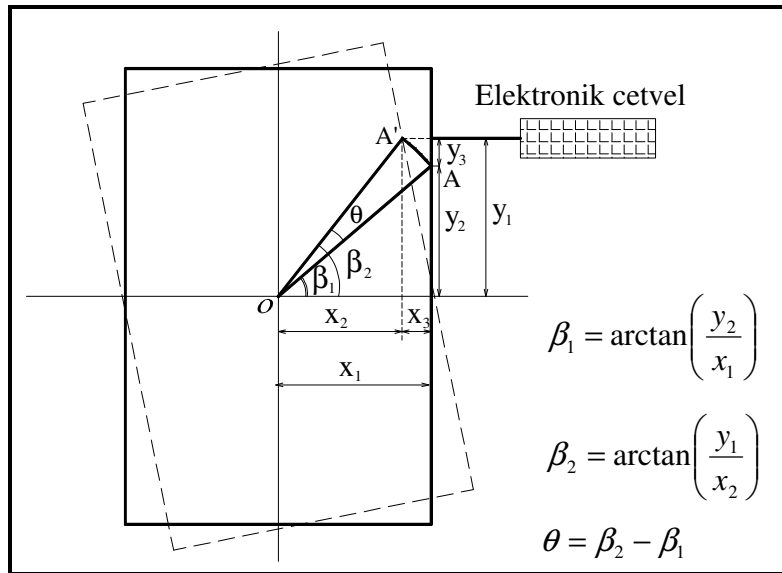


Şekil 33. Piston ve yükölçer (Loadcell)

### 3. BULGULAR VE İRDELEME

#### 3.1. Deneysel Çalışmaların Değerlendirilmesi

Yüksek performanslı betonarme kirişlerin basit burulma etkisindeki davranışlarının incelenmesi için gerçekleştirilen bu çalışma kapsamında üretilen deney numuneleri üzerinde basit burulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler daha öncede belirtildiği gibi bir piston yardımıyla kirişlerin dönerek yük altından kaçmaya başladığı ana kadar yüklemeye devam edilmiştir. Deney numunelerine uygulanan ortalama yük, bu yüke bağlı olarak hesaplanan burulma momentleri ve burulma momenti uygulanan enkesite yerleştirilen lineer potansiyometrik cetveller ile ölçülen yerdeğiştirmeye bağlı olarak, Şekil 34 'deki gibi, hesaplanan burulma momentleri, dönme açıları ve değişim oranları Çizelge 11 'de verilmiştir. Bu çizelgeden görüldüğü gibi en büyük burulma momentini, her iki kiriş serisi için, B5 kirişleri taşımaktadır. Maksimum burulma momentine karşılık gelen dönme açısı yine B5 kirişlerinde en büyük değerini almaktadır.



Şekil 34. Kirişin kendi ekseninde  $\alpha$  açısı kadar dönmesi

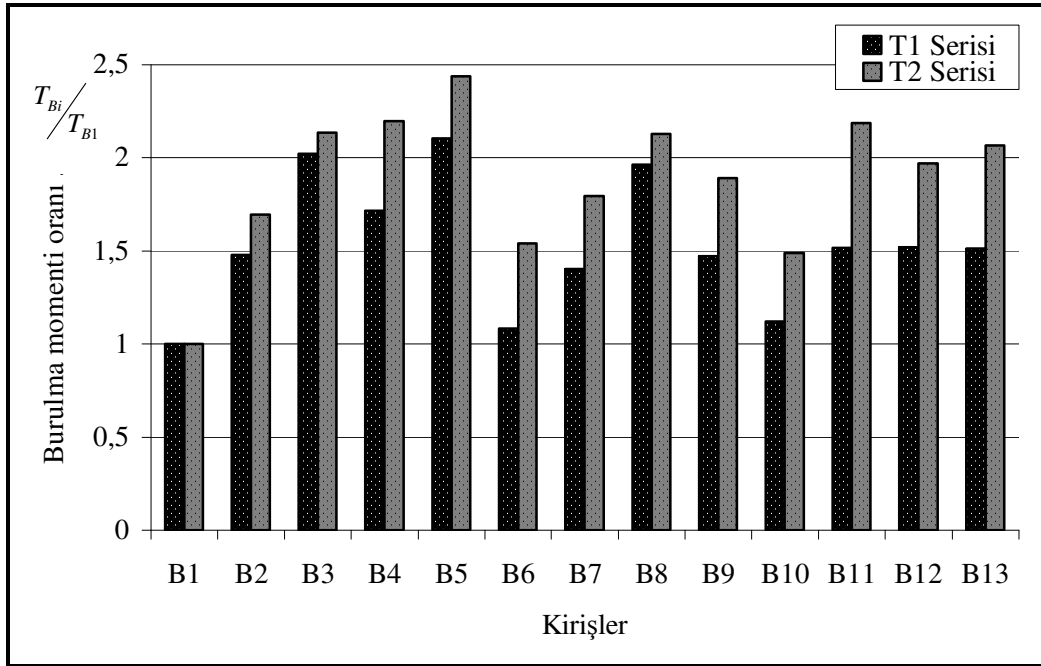
Deney kirişlerinin yüksekliğinin artmasıyla maksimum burulma momentlerinde, donatısız kirişlerde yaklaşık %14 'e varan artış olurken enine ve boyuna donatı düzenlerine bağlı olarak % 64 'e varan oranlarda artış olmuştur. Bununla birlikte maksimum burulma

Çizelge 11. Kirişlere etkiyen burulma momenti, dönme açıları ve değişim oranları

Kiriş Adı	Maksimum burulma momenti (kNm) $T_{m(Ti)}$		Nihai burulma momenti (kNm) $T_n(Ti)$		Seriler arasındaki burulma momenti değişimi (%) $\frac{(T_{m,n(T2)} - T_{m,n(T1)})}{T_{m,n(T1)}}$		Maks. burulma momentine karşılık gelen dönme açısı (derece) $\theta_{m(Ti)}$		Nihai burulma momentine karşılık gelen dönme açısı (derece) $\theta_{n(Ti)}$		Seriler arasındaki dönme açısı değişimi (%) $\frac{(\theta_{m,n(T2)} - \theta_{m,n(T1)})}{\theta_{m,n(T1)}}$		$T_{n(hai(Ti))} / T_{maks(Ti)}$		$\theta_{n(hai(Ti))} / \theta_{maks(Ti)}$	
	T1	T2	T1	T2	$T_m$	$T_n$	T1	T2	T1	T2	$T_m$	$T_n$	T1	T2	T1	T2
B1	6.33	7.19	6.33	7.19	14	14	1.51	0.68	1.51	0.68	-55	-55	1.00	1.00	1.00	1.00
B2	9.36	12.19	6.04	7.18	30	19	6.03	4.21	14.69	10.18	-30	-31	0.65	0.59	2.44	2.42
B3	12.8	15.36	6.8	8.68	20	28	7.89	5.52	19.04	9.02	-30	-53	0.53	0.57	2.41	1.63
B4	10.85	15.8	4.81	7.65	46	59	7.58	5.82	16.78	10.94	-23	-35	0.44	0.48	2.21	1.88
B5	13.31	17.53	7.57	11.69	32	54	9.06	6.74	17.73	10.18	-26	-43	0.57	0.67	1.96	1.51
B6	6.86	11.07	4.90	7.86	61	60	2.66	0.29	7.73	5.00	-89	-35	0.71	0.71	2.91	17.24
B7	8.87	12.91	5.00	8.83	46	77	4.90	3.98	9.84	8.11	-19	-18	0.56	0.68	2.01	2.04
B8	12.41	15.29	5.60	7.82	23	40	5.11	3.78	13.13	10.52	-26	-20	0.45	0.51	2.57	2.78
B9	9.32	13.59	5.75	10.02	46	74	5.49	5.05	11.58	5.77	-8	-50	0.62	0.74	2.11	1.14
B10	7.09	10.7	4.35	6.29	51	45	1.65	1.26	15.03	6.54	-24	-56	0.61	0.59	9.11	5.19
B11	9.59	15.72	7.38	11.61	64	57	7.93	5.03	8.83	7.25	-37	-18	0.77	0.74	1.11	1.44
B12	9.61	14.17	7.47	11.06	47	48	4.74	3.06	7.97	3.13	-35	-61	0.78	0.78	1.68	1.02
B13	9.56	14.86	5.29	7.01	55	33	4.84	2.98	6.29	5.46	-38	-13	0.55	0.47	1.30	1.83

momentine karşılık gelen dönme açıları ise % 90 'lara varan azalmalar meydana gelmiştir. Örneğin donatısız olarak üretilen T1B1 kirişlerinin ortalama burulma momenti 6.33 kNm iken T2B1 kirişlerinin ortalama maksimum burulma momenti 7.19 kNm 'ye çıkmış, bu momentlere karşılık gelen dönme açıları ise sırasıyla 1.51 dereceden 0.68 dereceye düşmüştür. Benzer şekilde en büyük burulma momentini taşıyan T1B5 kirişi 13.31 kNm 'lik burulma momenti taşıırken enkesit boyutları daha büyük olan T2B5 kirişi bu momentten yaklaşık % 32 'lik daha fazla burulma momenti taşımıştır. Ancak en büyük burulma momentini taşıyan B5 kirişlerinin dönme açıları da diğerlerine göre daha büyük olmuştur. Enkesit boyutları 150 x 300 mm olan T2B5 kirişinin dönme açısı, enkesit boyutları 150x250 mm olan T1B5 kirişine göre yaklaşık % 26 oranında daha küçük elde edilmiştir. Kiriş yüksekliğinin artmasıyla (T2 serisi), burulma momentlerinde meydana gelen en büyük artış, B11 kirişlerinde meydana gelmiştir. Bununla birlikte T2B6 kirişinde de % 90 'a varan dönme açısında azalmalar gözlenmiştir. T1B5 kirişlerine göre daha az burulma momenti taşıyan T1B10 kirişlerinin dönme açıları dikkate alındığında, bu kirişlerin daha rijit bir davranış gösterdiği anlaşılmaktadır.

Bu çalışma kapsamında üretilen betonarme kirişler üzerinden elde edilen burulma momentlerinin ( $T_{Bi}$ ), donatısız olarak üretilen T1B1 ve T2B1 kirişlerinin burulma momentlerine ( $T_{B1}$ ) göre oranı ( $T_{Bi}/T_{B1}$ ) Şekil 35 'de verilmiştir.



Şekil 35. T1 ve T2 serisi kirişlerin B1 kirişlerine göre burulma momenti oranları



Bu şekilden görüldüğü gibi, yüksek performanslı betonarme T1 serisi kirişlerin burulma momenti, donatı düzenlerine bağlı olarak, donatısız kirişlerin (B1) taşıdığı burulma momentinin, yaklaşık 2.1 katı kadar olmuştur. T2 Serisi kirişlerde ise donatısız B1 kirişlerininkinin yaklaşık 2.4 katı olmuştur.

Enine donatı aralığı 150 mm olan B2 kirişlerinin burulma momenti, B1 kirişinin taşıdığı burulma momentinin, T1 ve T2 serisi kirişlerde sırasıyla yaklaşık 1.5 ve 1.7 katı olarak elde edilmiştir. Aynı boyuna donatıya sahip ancak enine donatı aralığı 100 mm olan B3 kirişlerinin burulma momenti, B1 kirişlerininkinin T1 serisi için yaklaşık 2 katı, T2 serisi için yaklaşık 2.14 katı olmuştur. Sadece enine donatı aralıkları farklı olan B3 ve B2 kirişlerinde enine donatı aralığını 150 mm ‘den 100 mm ‘ye düşürmek burulma dayanımını donatısız B1 kirişinin burulma momentinin yaklaşık yarısı kadar artırmıştır.

Gövde donatılı 150 mm enine donatı aralığına sahip B4 kirişinin burulma momenti, donatısız B1 kirişinin burulma momentinin T1 serisinde yaklaşık 1.7, T2 serisinde yaklaşık 2.2 katı kadar olmuştur. Başka bir deyişle B2 kirişlerinin sahip olduğu boyuna donatıya gövde donatısı eklenmesi, burulma momentini T1 serisi kirişlerde, B1 kirişinin taşıdığı burulma momentinin yaklaşık 0.16 katı kadar, T2 serisi kirişlerde ise yaklaşık 0.30 katı kadar artırmıştır. Enine donatı sıklaştırması yapılan B3 kirişlerinin taşıdığı burulma momenti, enine donatı sıklaştırması yapılmamış ancak gövde donatısı kullanılan B4 kirişlerinin taşıdığı burulma momentine göre, T1 serisi kirişlerde B1 kirişinin taşıdığı burulma momentinin 0.18 katı kadar fazla iken T2 serisi kirişlerde 0.10 kat kadar az olmuştur. Bu farklılık T1 ve T2 serisi kirişlerinin enkesit boyutlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer bir deyişle T1 serisi kirişlerde sık enine donatı kullanmak, gövde donatısı kullanmaktan daha etkili iken kiriş yüksekliği fazla olan T2 serisi kirişlerde gövde donatısı kullanmanın daha etkili olduğu görülmüştür.

Daha önce de belirtildiği gibi, her iki kiriş serisi için de en büyük burulma momentini B5 kirişleri taşımıştır. Şekil 35 ‘den görüldüğü gibi enine donatı sıklaştırmasıyla birlikte gövde donatısı kullanımı T1 ve T2 serisi kirişlerde B1 kirişinin burulma momentinin sırasıyla yaklaşık 2.0 ve 2.5 katına varan burulma momentinin taşınmasına imkan vermiştir. Enine donatı sıklaştırması, gövde donatısı bulunmayan her iki seri kirişlerdeki burulma momentlerini, B1 kirişlerinin taşıdığı burulma momentlerinin yaklaşık yarısı kadar artırırken, gövde donatılı kirişlerde bu artış, T1 serisi kirişler için 0.23 kat, T2 serisi kirişlerde ise 0.11 kat olarak gerçekleşmiştir. Kısaca, enine donatı sıklaştırmasının burulma momentini artırmakla birlikte, gövde donatılı kirişlerde, gövde donatısı

donatısı bulunmayan kirişler kadar etkili olmadığı görülmüştür.

T1 ve T2 serilerine ait B6 kirişlerinin burulma momentleri, her iki seriye ait B1 kirişlerinin burulma momentlerine göre sırasıyla, % 8 ve % 54 oranında daha fazladır. Bu moment artışı B2, B3, B4 ve B5 kirişlerinde meydana gelen artışın yanında oldukça küçük kalması nedeniyle, B6 serisi kirişlerde uygulanan donatı düzeninin pratikte uygulanabilir olmadığı ortaya çıkmıştır.

B2 kirişlerinde kullanılan donatı düzenine ek olarak kirişin iki yan yüzünde 15 cm aralığındaki enine donatılar arasına tek yönde diyagonal donatılar yerleştirilerek donatı düzeni oluşturulan B7 kirişlerinin (bkz. Çizelge 8) taşıdıkları ortalama burulma momenti, B1 kirişlerinin taşıdığı burulma momentinin T1 serisinde 1.4, T2 serisinde 1.8 katı olmuştur. Kiriş yan yüzlerinde paralel olarak enine donatılar arasına yerleştirilen diyagonal donatı, B2 kirişlerine göre, T1 serisinde burulma momentini B1 kirişlerinin taşıdığı burulma momentinin yaklaşık % 5 oranında azaltırken, T2 serisinde, B1 kirişlerinin taşıdığı burulma momentinin % 6 oranında artırmıştır. Bu farklılık enkesit boyutu küçük olan T1 serisi kirişlerde, bu tür donatı düzeninin etkili olmadığını göstermektedir. Bu donatı düzeninin büyük enkesite sahip kirişler için dayanımda artış meydana getirdiği görülse bile, basit burulma momenti altında donatı düzeni pratikte sıkça kullanılan B3, B4 ve B5 kirişlerinden daha az taşıma gücüne sahip olduğu ve pratikte uygulaması zor olduğu için bu çalışmada önerilmemektedir.

B2 kirişlerinde kullanılan donatı düzenine ek olarak kirişin iki yan yüzünde 15 cm aralığındaki enine donatılar arasına çift yönde diyagonal donatılar yerleştirilerek donatı düzeni oluşturulan B8 kirişlerinin (bkz. Çizelge 8) taşıdıkları ortalama burulma momenti, B1 kirişlerinin taşıdığı burulma momentinin T1 serisinde 1.96, T2 serisinde 2.13 katı olmuştur. Kiriş yan yüzlerinde paralel olarak enine donatılar arasına yerleştirilen diyagonal donatılar, B2 kirişlerine göre, T1 serisinde burulma momentini yaklaşık % 33 oranında, T2 serisinde, % 25 oranında artırmıştır. Kiriş yan yüzlerinde enine donatılar arasına paralel olarak çift yönde diyagonal donatı kullanımı, tek yönde diyagonal kullanmaya göre burulma momentini T1 serisi kirişlerde B1 kirişinin taşıdığı burulma momentinin yaklaşık 0.56 katı kadar, T2 serisi kirişlerde ise B1 kirişinin taşıdığı burulma momentinin 0.33 katı kadar artırmıştır.

B2 kirişlerinin donatı düzenine ek olarak kirişin çekme yüzünde her etriye aralığında bir diyagonal, basınç yüzünde ise üç etriye aralığına bir diyagonal donatı yerleştirilerek hazırlanan B9 kirişleri, B1 kirişlerinin burulma momentinin T1 ve T2 serileri için sırasıyla

1.47 ve 1.89 katı kadar bir burulma momenti taşımışlardır. T1 serisi için B2 kirişleriyle hemen hemen aynı miktarda burulma momenti taşıyan B9 kirişleri, T2 serisi kirişlerde B2 kirişinin taşıdığı burulma momentinin 1.11 katı kadar bir burulma momentini taşımışlardır. Bu çalışmada, B9 kirişleri B3, B4, ve B5 kirişlerinin taşıma gücüne erişemedikleri için bu kirişlerin sahip olduğu donatı düzeninin pratikte uygulanabilir olmadığı görülmüştür.

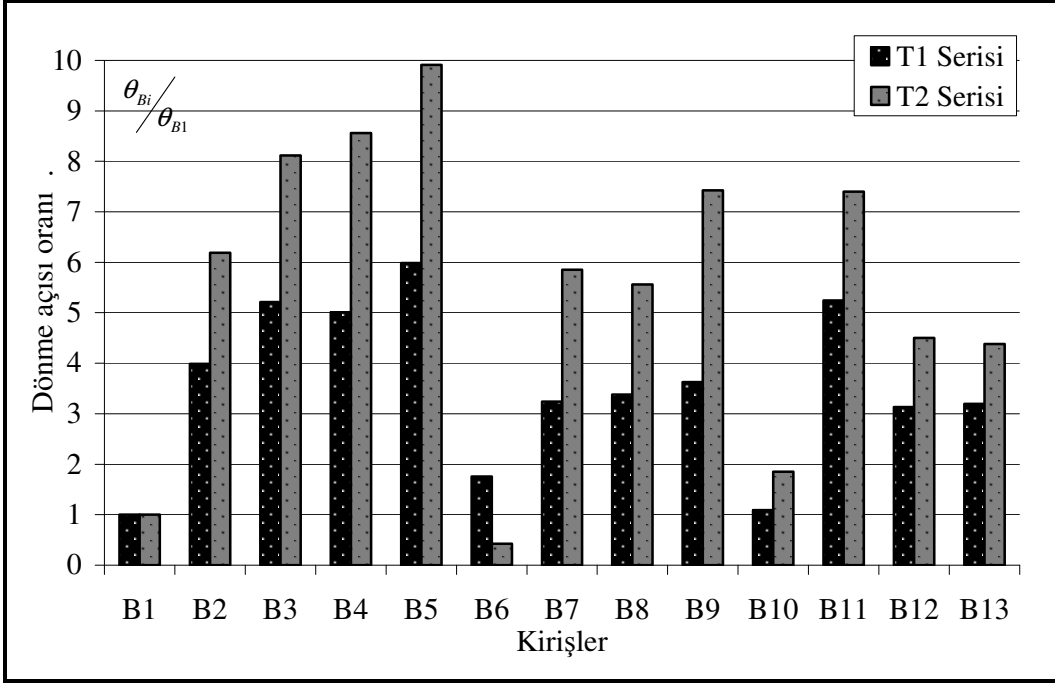
Dikdörtgen diyagonal şeklinde, düşey enine donatı kullanılmadan, enine donatısı düzenlenmiş olan B10 kirişleri (bkz çizelge 8), diğer tüm betonarme kirişlerden daha az burulma momenti taşımışlardır. B1 kirişlerine göre T1 ve T2 serileri için sırasıyla % 12 ve % 49 oranında dayanım artışı sağlamalarına rağmen diğer kirişlere göre bu oran oldukça düşüktür. Bu tür donatıya sahip kirişlerin kullanılmasının burulma momenti açısından pratik bir yararı bulunmamaktadır.

B2 kirişlerinin donatısına ek olarak enkesit içinde, iki doğrultuda diyagonal donatı düzenlemesi ile oluşturulan B11 kirişleri, B1 kirişleriyle taşınan burulma momentinin T1 ve T2 serileri için sırasıyla 1.52 ve 2.19 katı kadar burulma momenti taşımıştır. T1B11 kirişleri, en fazla burulma momenti taşıyan, T1B5 kirişlerinin taşıdıkları burulma momentinin yaklaşık % 72' si oranında , T2B11 kirişleri ise T2B5 kirişlerinin taşıdıkları burulma momentinin % 90'ı oranında bir burulma momenti taşımışlardır.

Betonarme deney kirişlerinde, kiriş boy kesiti boyunca, kirişin bir yan yüzünden diğer yan yüzüne gelecek şekilde 150 mm aralar ile düzenlenmiş etriyeler arasına yerleştirilen hacimsel diyagonal donatıların kullanılmasıyla oluşturulan B12 kirişleri, B1 kirişlerinin taşıdığı burulma momentlerinin T1 serisi kirişlerde, 1.52, T2 serisi kirişlerde 1.97 katı kadar bir burulma momenti taşımışlardır. Bu kirişler, B2 kirişlerine göre T1 ve T2 serileri için sırasıyla yaklaşık % 3 ve % 16 oranlarında daha fazla burulma momenti taşımışlardır.

Betonarme deney kirişlerinde, kiriş boy kesiti boyunca, B2 kirişlerinin donatısına ek olarak bir etriyenin üst köşesinden, diğer etriyenin alt köşesine hacimsel diyagonal donatı bağlanarak oluşturulan B13 kirişleri, B1 kirişinin taşıdığı burulma momentinin T1 serisi kirişlerde 1.51 katı kadar, T2 serisi kirişlerde 2.07 katı kadar burulma momenti taşımışlardır. Hacimsel donatının B13 kirişlerindeki gibi düzenlenmesi, B2 kirişlerine göre, T1 ve T2 serisi kirişler için sırasıyla, yaklaşık % 2 ve % 22 oranlarında, daha fazla burulma momentinin taşınmasına imkan vermiştir.

Basit burulma deneyleri yapılan her iki seri kirişlerin maksimum burulma momentine karşılık gelen dönme açılarının, B1 kirişlerinin maksimum burulma momentine karşılık gelen dönme açısına oranı Şekil 36 'da verilmiştir.

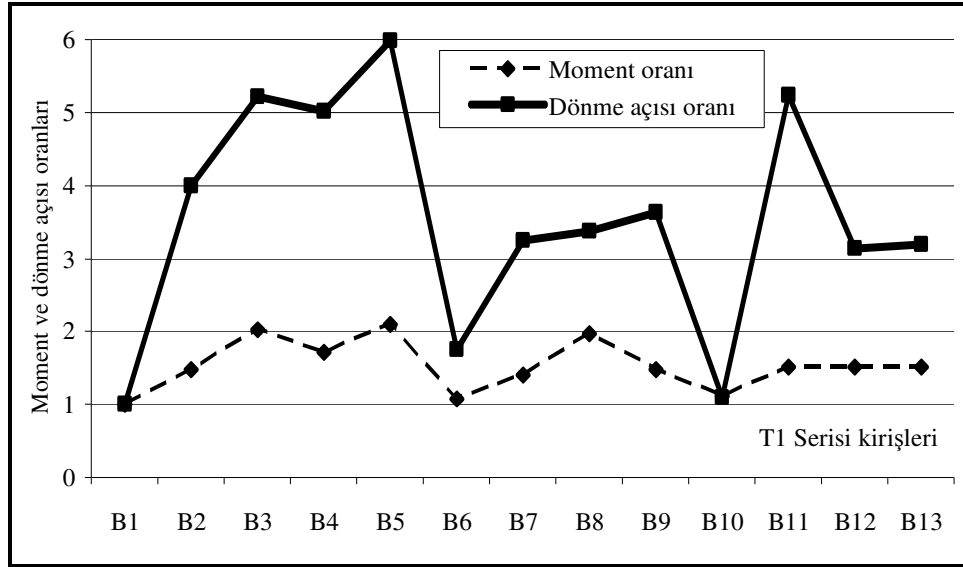


Şekil 36. Tüm kirişlerin donatısız B1 kirişine göre dönme açısı oranları

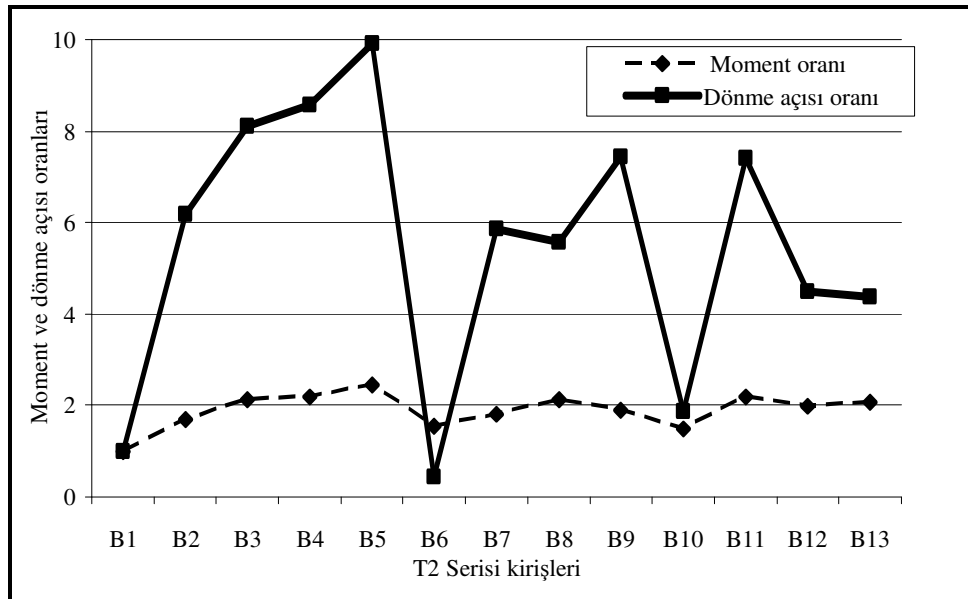
Bu şekilden görüldüğü gibi, farklı donatı düzenlerinde üretilen kirişlerde dönme miktarı, T1 serisi kirişler için B1 kirişlerinininkine göre B2 kirişlerinde yaklaşık 3.98 katı, B3 kirişlerinde 5.21 katı, B4 kirişlerinde 5.01 katı, B5 kirişlerinde 5.99 katı, B6 kirişlerinde 1.76 katı, B7 kirişlerinde 3.24 katı, B8 kirişlerinde 3.38 katı, B9 kirişlerinde 3.63 katı, B10 kirişlerinde 1.09 katı, B11 kirişlerinde 5.24 katı, B12 kirişlerinde 3.13 katı, ve B13 kirişlerinde 3.20 katı olmuştur. T1B10 kirişleri, T1B1 kirişi ile yaklaşık olarak benzer davranışı göstermiştir. T2 serisi kirişlerde ise en fazla dönme miktarı (B1 kirişinininkinin 9.91 katı) B5 kirişlerinde olmuştur. Bu seri kirişlerde yalnızca B10 kirişinin dönme davranışı B1 kirişinininkine benzerdir.

Bu çalışma kapsamında üretilen kirişlerden elde edilen maksimum burulma momentlerinin bu burulma momentine karşılık gelen dönme açısının B1 'in burulma momenti ve dönme açısına oranları T1 serisi kirişler için Şekil 37 'de ve T2 serisi kirişler için Şekil 38 'de verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi T1 ve T2 serilerinin B5 kirişleri en büyük burulma momenti oranlarına sahipken, dönme açıları oranları da diğerlerine göre en büyük değeri almıştır. T1 serisi B8 kirişinin burulma momenti oranı B5 kirişininki ile hemen hemen aynı iken, dönme oranı B1 referans kirişinin dönme oranınının 3.37 katı kadardır. Dönme oranındaki bu azalmada B8 kirişinde kullanılan donatı düzeninin etkisi bulunmaktadır (bkz. Çizelge 8). T2 serisi B8 kirişinde, burulma momenti oranı B1 kirişinin

burulma momenti oranının 1.96 katı olurken, dönme açısı oranı, yaklaşık 5.56 katı olmuştur. B8 kirişi dönme açısı bakımından, T2 serisinde T1 serindeki davranışı göstermemesi, kiriş enkesit yüksekliğinin T1 serisine göre daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu da burulma donatısı tipi seçiminin enkesit boyutlarından bağımsız olamayacağını göstermektedir.

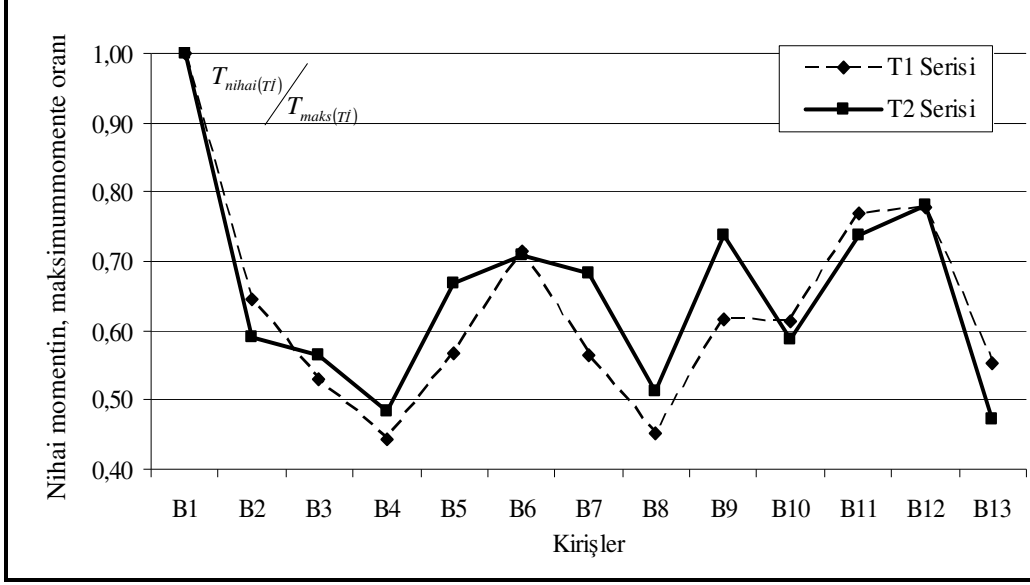


Şekil 37. T1 Serisi kirişlerde maksimum moment ve bu momente karşılık gelen dönme açısı oranları



Şekil 38. T2 Serisi kirişlerde maksimum moment ve bu momente karşılık gelen dönme açısı oranları

Basit burulma etkisine maruz kalan deney kirişlerinden elde edilen nihai burulma momentinin maksimum burulma momentine oranı Şekil 39 'da verilmiştir. Burada nihai burulma momentinin, deney kirişlerinin burulma yükünden kaçtığı diğer bir deyişle, burulma momenti-dönme eğrisinin yataylaşmaya başladığı yere kadar yükleme yapılarak elde edildiğini belirtmek gerekmektedir.

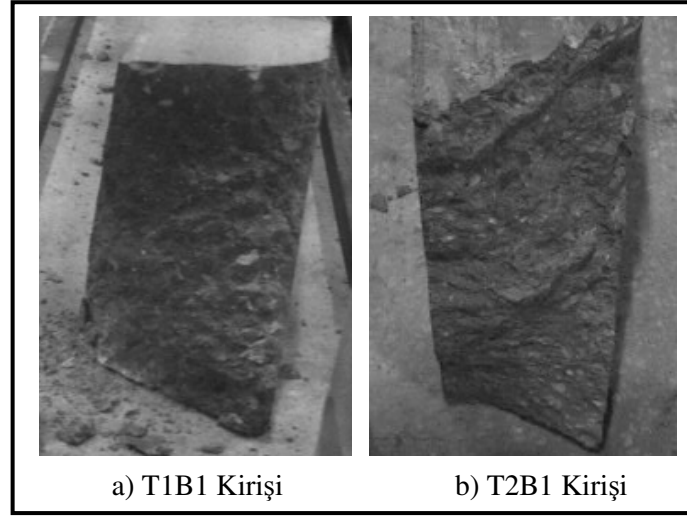


Şekil 39. T1 ve T2 kiriş serilerinde nihai burulma momentinin maksimum burulma momentine oranı

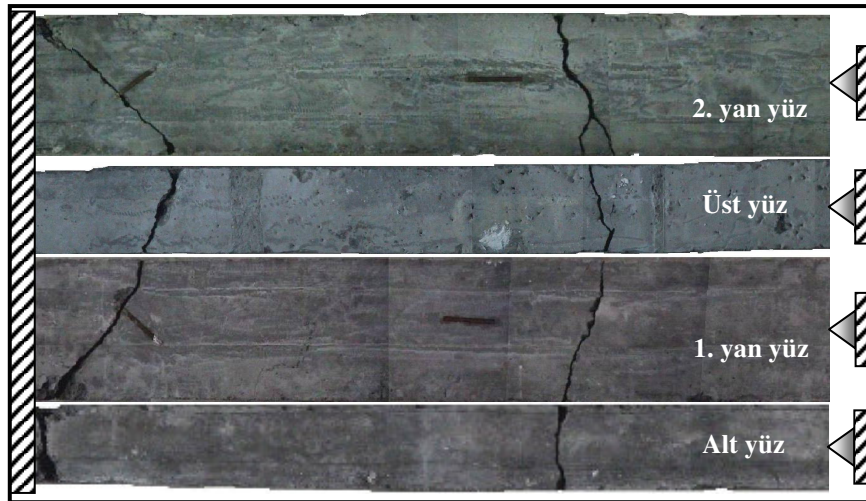
Bu şekilden de görüldüğü gibi, donatısız olarak üretilen B1 kirişi hariç diğer her iki seri kirişlerdeki nihai burulma momentinin maksimum burulma momentine oranı ortalama % 60 dır. Betonarme deney kirişlerinin maksimum burulma momentinden sonra ortalama % 40 'lık bir dayanım kaybı ile nihai burulma momentine ulaştığı, bu değerden sonra burulma momenti yaklaşık sabit kalarak, büyük miktarda dönme yaparak taşıma gücünü kaybettiği görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında üretilen deney kirişleri üzerine deneylerden önce yapıştırılan aktif boyu 120 mm olan birim şekil değiştirme ölçerler yardımıyla deney kirişlerinin yan yüzlerinde birim uzama ve birim kısalma değerleri kaydedilmiştir. Ayrıca deney kirişinin Ankastre mesnedinden itibaren kiriş uzunluğu boyunca, 250 mm, 500 mm, 750 mm, 1000mm 1250 mm ve 1400 mm uzaklıkta kiriş yan yüzlerine yerleştirilen lineer potansiyometrik cetveller yardımıyla yer değiştirmeleri de dönme açılarının hesaplanabilmesi için kayıt altına alınmıştır.

Bu şekilde gerçekleştirilen deneylerden donatısız olan B1 kirişlerinin kırılma yüzeyleri T1 serisi için Şekil 40-a 'da T2 serisi için Şekil 40-b 'de verildiği gibi olmuştur. Bu şekillerden görüldüğü gibi her iki seri donatısız kirişin basit burulma momenti etkisiyle oluşan kırılma yüzeyleri düzlem değildir. Basit burulma momenti etkisiyle aniden taşıma gücünü kaybeden donatısız T1B1 ve T2B1 kirişlerinin yüzeylerinde oluşan kırıklar sırasıyla Şekil 41 ve Şekil 42 'de gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında, birinci yan yüz olarak kuvvet kolunun bulunduğu yüz, ikinci yan yüz olarak ise kuvvet kolunun bulunduğu yüzün kiriş eksenine göre simetrisinde bulunan yüz dikkate alınmıştır.

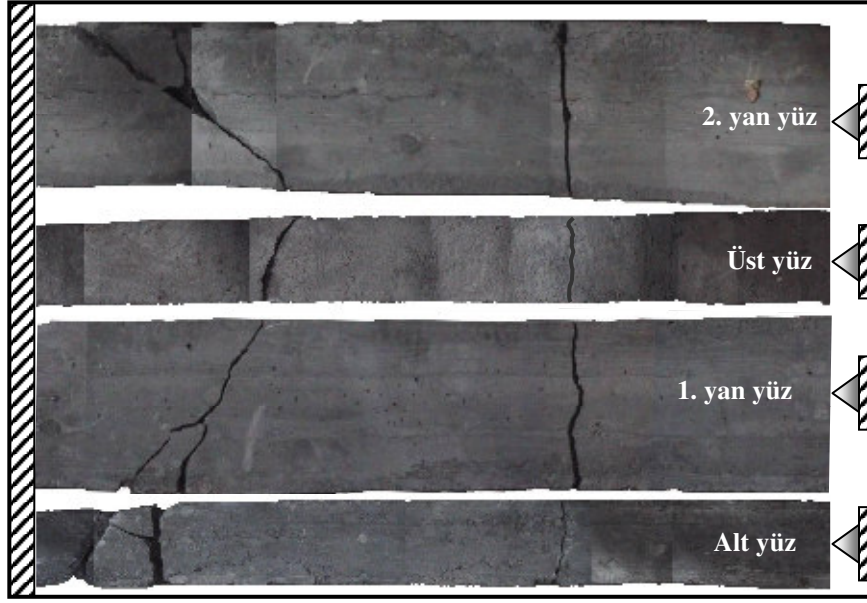


Şekil 40. Donatısız kirişlerin basit burulma momenti etkisinde oluşan kırılma yüzeyleri



Şekil 41. T1B1 kirişinin deney sonrası kırılma durumu

Donatısız olarak üretilen T1B1 kirişinde kırılma, birinci ve ikinci yan yüzlerde sırasıyla, 51° lik ve 42°lik açı yaparak ankastre mesnede yakın bölgede meydana gelmiştir. Kirişin üst yüzünde, kırılma ankastre mesnetten ortalama 22 cm uzakta kiriş eksenine ile yaklaşık 63° açı yaparak oluşmuştur. Kirişin alt yüzünde kırılma, ankastre mesnede çok yakın olup, kırılma gelişimi kiriş eksenine hemen hemen dik olacak şekilde meydana gelmiştir.



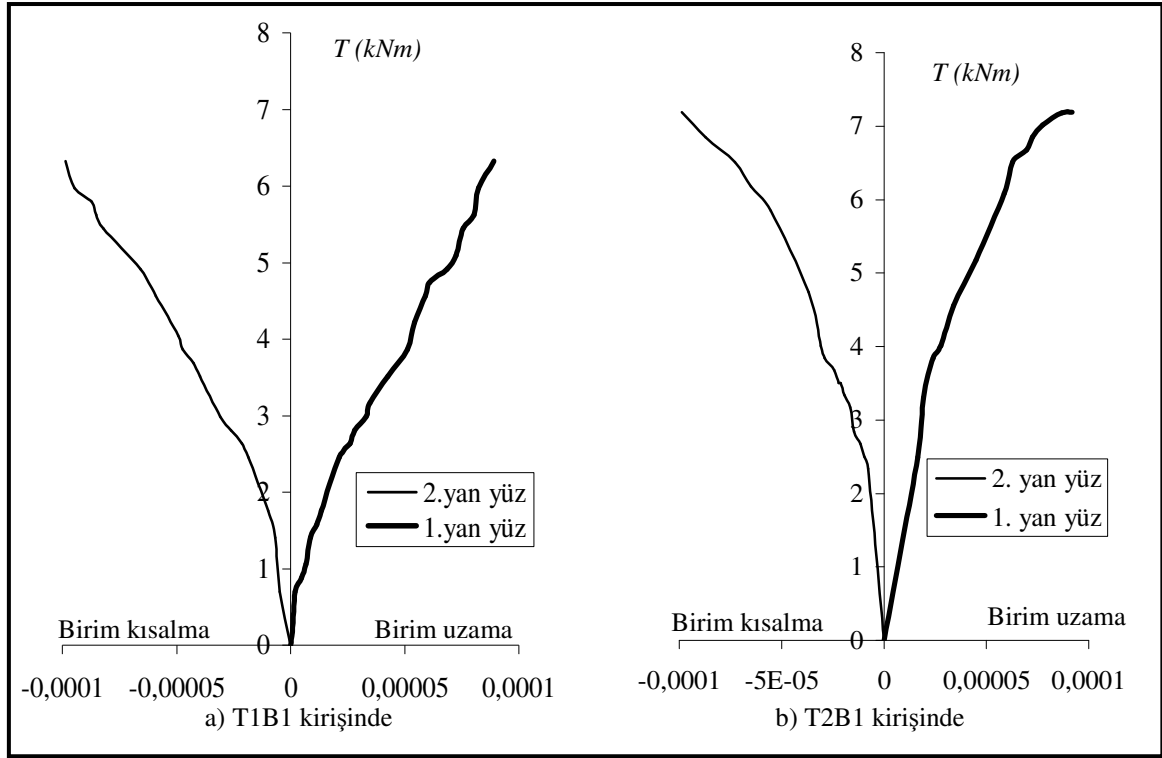
Şekil 42. T2B1 kirişinin deney sonrası kırılma durumu

Burulma deneyi sonrası donatısız T2B1 kirişinin birinci yan yüzündeki kırılma ankastre mesnetten ortalama 24 cm kadar uzakta meydana gelmiştir. Kırılma çizgisi kiriş eksenine ile yaklaşık 37 derecelik bir açı yapmıştır. Kirişin ikinci yan yüzünde; kırılma ankastre mesnetten yaklaşık 30 cm kadar uzakta, kiriş eksenine ile yaklaşık 48 derecelik bir açı yaparak oluşmuştur. Kırılma çizgisinin kiriş eksenine ile açısı kirişin üst yüzünde yaklaşık 66 derece, kiriş alt yüzünde ise 63 derecedir. Kırılma çizgisinin mesnetten ortalama uzaklığı kiriş üst yüzünde ortalama 41 cm, kiriş alt yüzünde ise 10 cm dir.

Deney boyunca, kiriş yan yüzlerine deneyden önce yapıştırılan birim şekil değiştirme ölçerler yardımıyla belirlenen birim uzama ve birim kısalmalar T1B1 kirişi için Şekil 43-a 'da, T2B1 kirişi için Şekil 43-b 'de gösterilmektedir. Bu şekillerden görüldüğü gibi basit burulma momentine maruz donatısız T1B1 kirişlerinin yan yüzlerindeki birim uzama ve birim kısalma değerleri sırasıyla  $9.5 \times 10^{-5}$  ve  $8.5 \times 10^{-5}$ , T2B1 kirişlerinininkiler ise sırasıyla

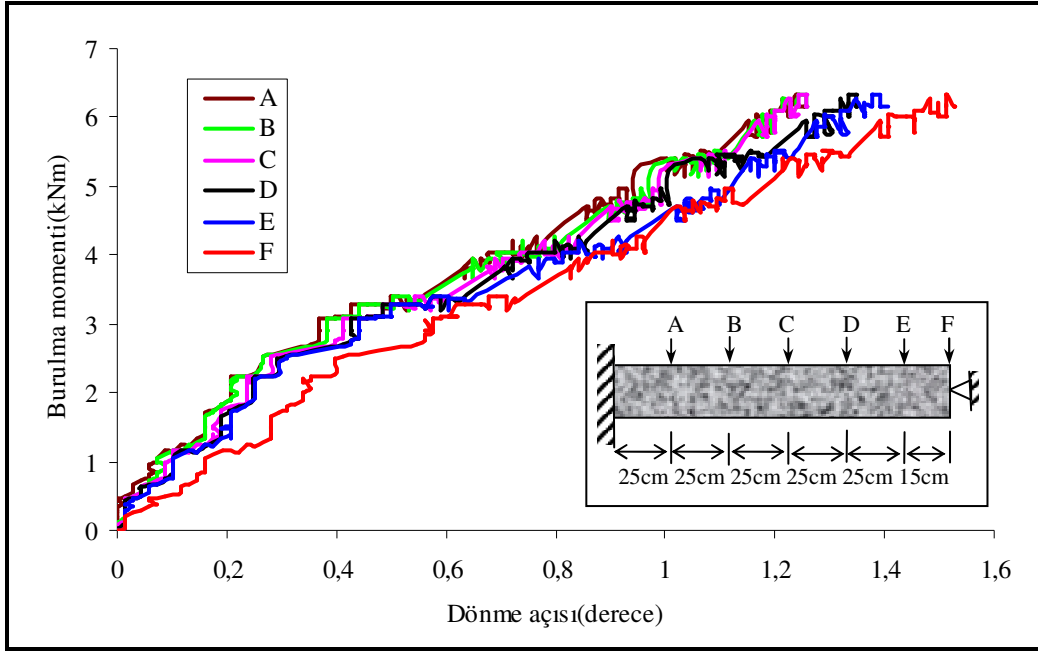


$9.2 \times 10^{-5}$  ve  $9.9 \times 10^{-5}$  olarak elde edilmiştir. Her iki serideki donatısız kirişlerin, yan yüzlerindeki birim uzama ve birim kısalma şekildeğiştirmeleri mutlak değer olarak 0.0001 değerine ulaşmadan, aniden kırılmaları enkesit boyutlarındaki artışın, şekildeğiştirmeler üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığını göstermiştir.

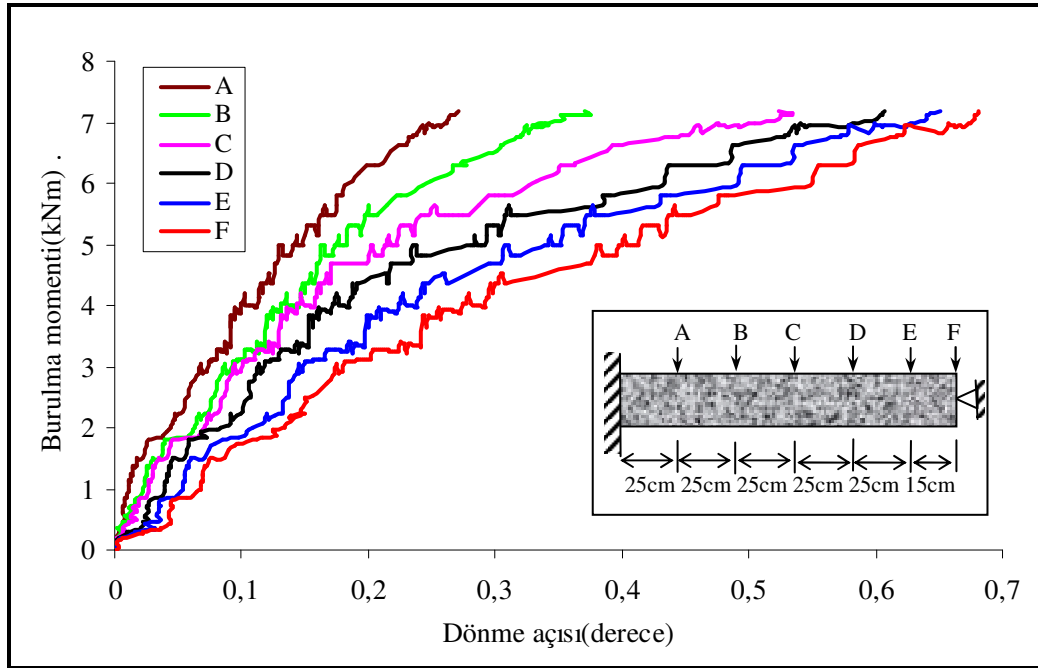


Şekil 43. T1B1 ve T2B1 kirişlerinin yan yüzlerindeki şekildeğiştirmelerin burulma momenti ile değişimi

Kiriş yan yüzlerine yerleştirilen lineer potansiyometrik cetveller yardımıyla Şekil 34 'deki gibi hesaplanan dönme açılarının kiriş boyunca değişimi T1B1 kirişi için Şekil 44 'de T2B1 kirişi için Şekil 45 'de verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi, enkesit yüksekliği T2B1 kirişininkine göre küçük olan T1B1 kirişi A, B ve C enkesitlerinde sırasıyla 1.24, 1.26 ve 1.26 derecelik dönme yaparken, yük uygulanan F enkesitinde dönme 1.51 derece olmuştur. Söz konusu kirişin C enkesitine kadar 1.26 derecelik dönmesine ek olarak bu enkesitten sonra F enkesitine kadar ancak 0.25 derecelik dönme yapmıştır. Dolayısıyla da kırılma rölatif olarak en fazla dönmenin olduğu A enkesitine yakın bir yerden gerçekleşmiştir (bkz. Şekil 41 ve Şekil 44).



Şekil 44. T1B1 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

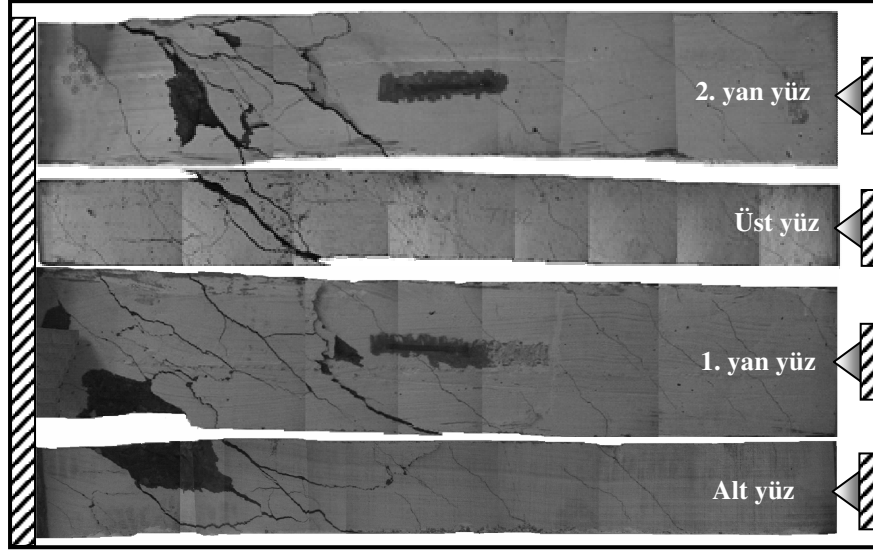


Şekil 45. T2B1 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

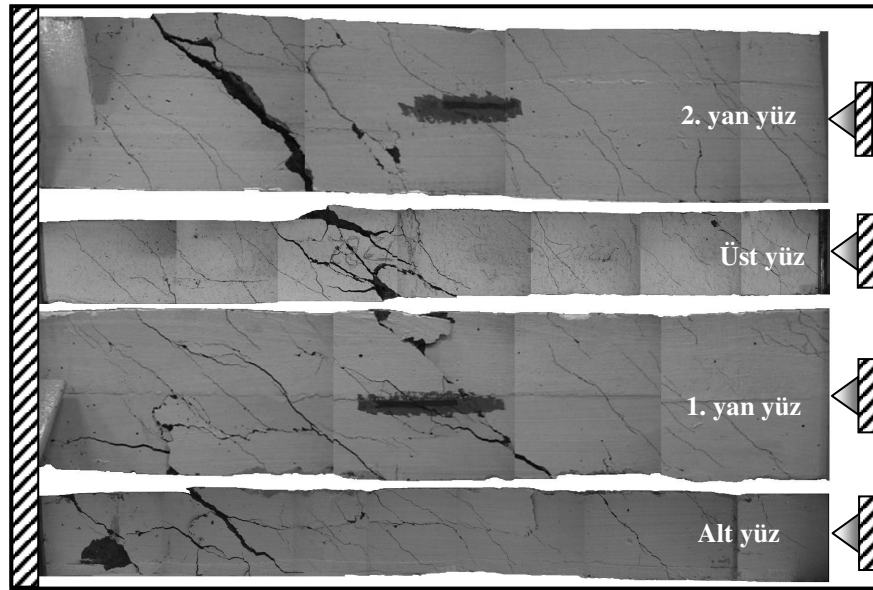
T2B1 kirişi, F enkesitinde yapmış olduğu maksimum 0,68 derecelik dönmenin, ankastre mesnede yakın A enkesitinde 0,27 derecelik kısmını yapmış ve kalan dönmesini ise yük uygulanan enkesite doğru yayarak taşıma gücüne, T1B1 kirişine göre daha rijit bir

davranış göstererek, ulaşmıştır (Şekil47). Başka bir deyişle T1B1 kirişine göre enkesit yüksekliği daha büyük olan T2B1 kirişi, yapmış olduğu dönmeyi daha fazla kiriş boyunca yaymıştır (bkz. Şekil 42 ve Şekil 45). Gerçekleştirilen deneylerden enkesit yüksekliğinin artmasıyla kirişin daha rijit davranış gösterdiği ve kırılmanın ankastre mesnetten, T1B1 kirişine göre, daha uzak enkesitte olduğu görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında üretilen ve burulma deneylerine tabi tutulan T1B2 ve T2B2 kirişlerinin yüzeylerinde oluşan çatlaklar sırasıyla Şekil 46 ve Şekil 47 'de verilmiştir.



Şekil 46. T1B2 kirişinde oluşan çatlaklar



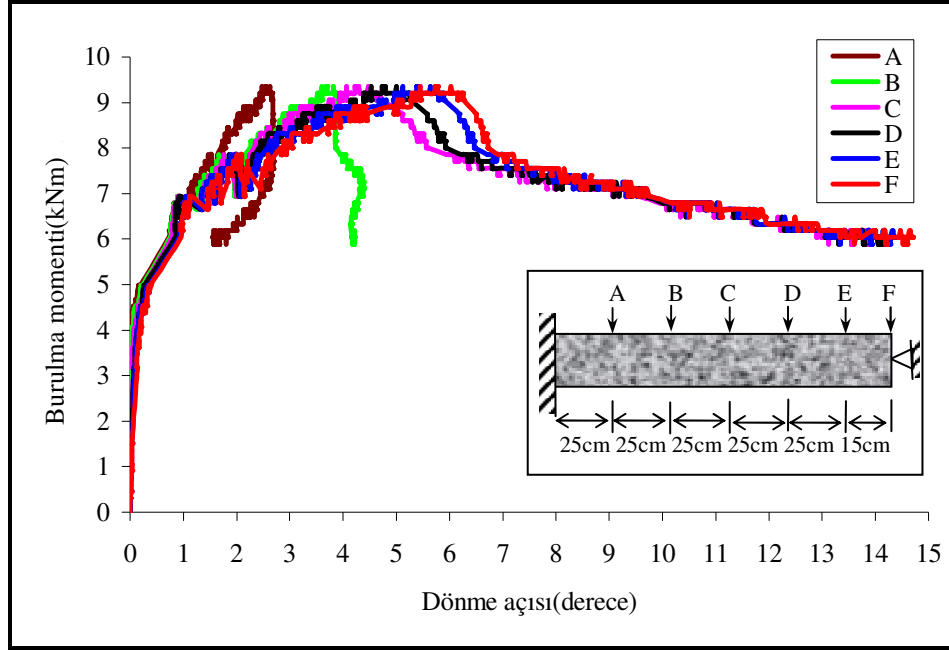
Şekil 47. T2B2 kirişinde oluşan çatlaklar

T1B2 kirişinin birinci yan yüzünde deney süresince, çatlaklar kiriş boyunca yaygınlaşmış ve kiriş ortası ile ankastre mesnet arasındaki bölgede yoğunlaşarak kırılma meydana gelmiştir. Bu bölgede oluşan çatlaklar kiriş eksenine ile farklı açılar yapmakla birlikte, bu açılar yaklaşık olarak 45 dereceden küçüktür. Kirişin birinci yan yüzünde basit mesnete yakın bölgede oluşan çatlakların açıklıkları daha az olmuştur ve bu çatlakların kiriş eksenine ile yapmış olduğu açılar yaklaşık 45 derecedir. Diğer yan yüzde çatlak açıları basit mesnede yakın bölgede yaklaşık olarak 45 derece, ankastre mesnet tarafında 55 derece olarak ölçülmüştür. Alt yüzde kırılma çatlakları kiriş eksenine ile yaklaşık 40 derecelik açı yapmıştır. Kirişin üst yüzünde kırılma çatlaklarının açısı yaklaşık olarak 32 derece olarak ölçülmüştür.

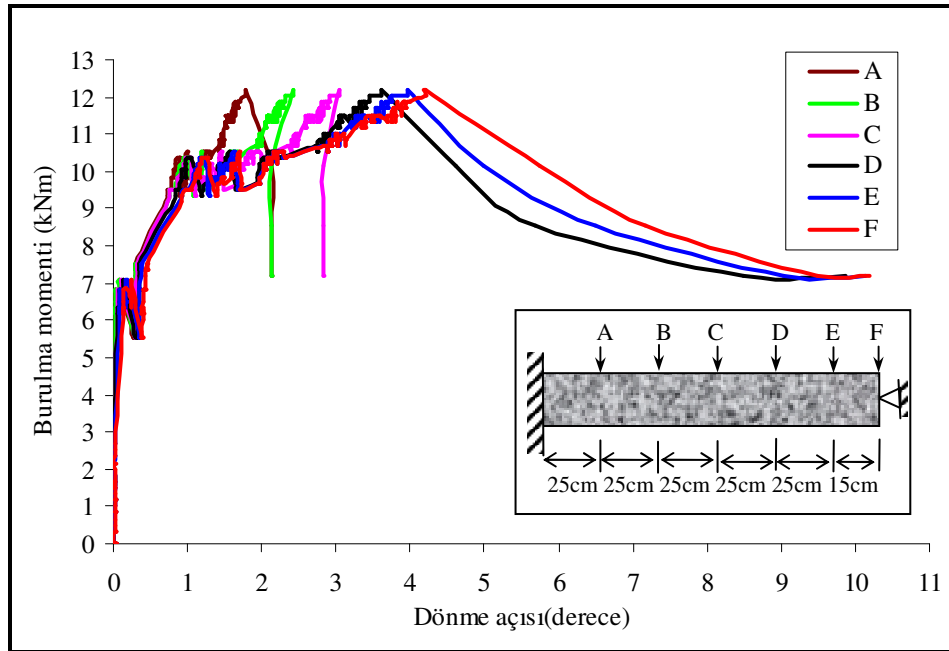
Burulma deneyi sonrası T2B2 kirişinin birinci yan yüzünde kırılma çatlakları kiriş ortasında meydana gelmiştir. Kirişin bu yüzünde meydana gelen çatlakların açıları yaklaşık 42 derecedir. Kirişin ikinci yan yüzündeki kırılma çatlakları, ankastre mesnetten ortalama 40 cm uzaktadır. Kırılma çatlaklarının açısı, yaklaşık 47 derecedir. Kiriş yüzeyinde ortalama çatlak açısı 45 derece ölçülmüştür. Kirişin üst yüzünde; kırılma ankastre mesnetten ortalama 60 cm uzaklıkta oluşmuştur. Kirişin alt yüzünde çatlak açıları yaklaşık 45 derecedir. Tüm kiriş yüzeyinde ankastre mesnet ile kırılma çatlakları arasındaki bölgede çatlaklar daha yaygın olup çatlak genişliği daha büyüktür. T2B2 kirişinde burulma etkisindeki kırılma T1B2 kirişine göre ankastre mesnetten daha uzak enkesitte meydana gelmiştir. Deney boyunca oluşan çatlakların kiriş boyunca dağılımı T2B2 kirişinde daha fazla olmuştur.

Burulma deneylerinden elde edilen T1B2 ve T2B2 kirişlerine ait burulma momenti-dönme ilişkileri sırasıyla Şekil 48 ve Şekil 49 'da verilmiştir. T1B2 kirişi, yaklaşık 7.399 kNm 'lik bir burulma momentine kadar çatlama olmadan bir miktar dönmüştür. Bu moment düzeyine kadar A, B ve F enkesitleri sırasıyla yaklaşık 1.4, 1.6 ve 1.9 derecelik dönme gerçekleştirmişlerdir. Deney kirişindeki çatlama ile birlikte kiriş enkesitlerindeki dönmeler maksimum burulma momentine kadar artmıştır. Maksimum burulma momentinde kirişin A, B ve F enkesitlerindeki dönme açıları sırasıyla 2.63, 3.82 ve 6.03 derece olarak ölçülmüştür. Maksimum burulma momentinde A ve B enkesitlerinde büyük çatlaklar oluşan T1B2 kirişi, bu enkesitlerde burulma momentinin donatı tarafından karşılanmasıyla, C, D, E ve F enkesitlerinde dönme açısının hızla artmasıyla taşıma gücünü kaybetmiştir. Maksimum burulma momentine göre % 35 'lik dayanım kaybıyla nihai burulma momentine ulaşan kirişin A, B ve F enkesitlerinde sırasıyla, 1.56, 4.22 ve 14.69 derecelik

nihai dönme açıları elde edilmiştir. Maksimum burulma momentinde C, D, E ve F enkesitlerinde farklı dönme açıları oluşurken, nihai burulma momentine karşılık gelen dönme açıları yaklaşık eşit olarak elde edilmiştir.



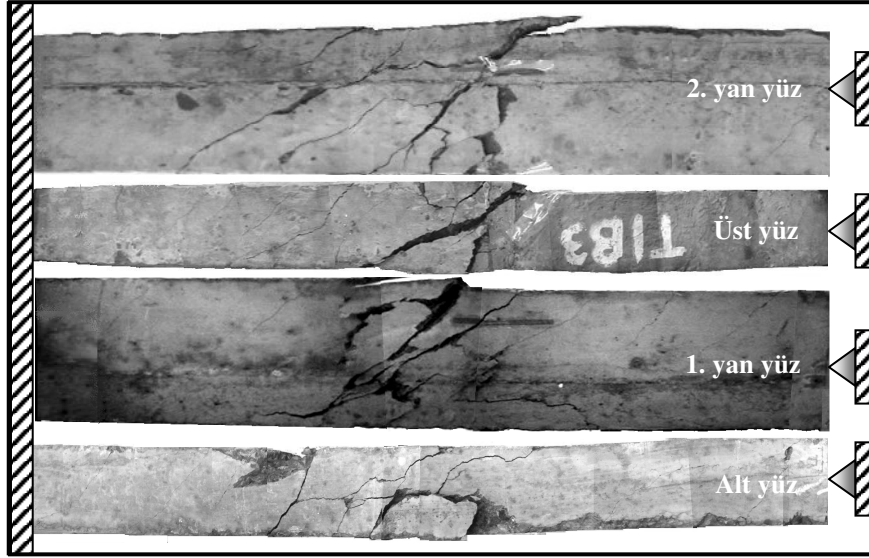
Şekil 48. T1B2 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi



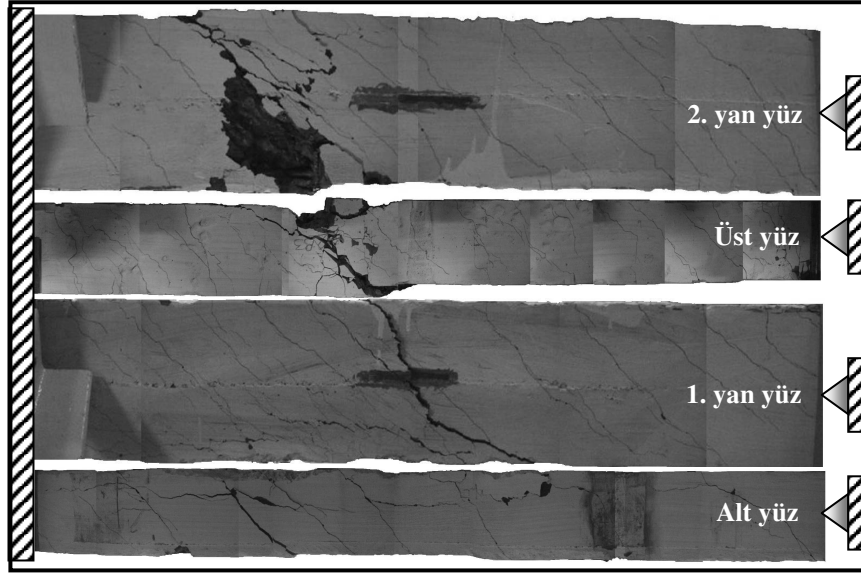
Şekil 49. T2B2 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

Donatı düzeni T1B2 kirişininki ile aynı olan T2B2 kirişi, burulma deneyleri esnasında 12,19 kNm 'lik maksimum, 7,18 kNm lik nihai burulma momenti taşımıştır. Maksimum burulma momentinde yük uygulanan enkesitte (F enkesiti) 4.21 derecelik dönme ölçülürken, A, B ve C enkesitlerinde sırasıyla 1.78, 2.43 ve 3.05 derecelik dönmeler meydana gelmiştir. Maksimum burulma momentinde kirişin, C enkesitine yakın bölgesinde büyük çatlakların oluşmasıyla, bu enkesitte kiriş yük altından kaçmış ve maksimum burulma momentine göre % 41 oranında dayanım kaybıyla nihai burulma momentine ulaşmıştır. Böylece D, E ve F enkesitlerinde sırasıyla 9.86, 10.13 ve 10.18 derecelik nihai dönme açıları meydana gelerek taşıma gücünü kaybetmiştir.

Bu çalışma kapsamında üretilen ve burulma deneylerine tabi tutulan T1B3 ve T2B3 kirişlerinin yüzeylerinde oluşan çatlaklar sırasıyla Şekil 50 ve Şekil 51 'de verilmiştir. Burulma deneyi sırasında T1B3 kirişi ortasından çatlayarak taşıma gücünü kaybetmiştir. Kirişin alt, üst, birinci ve ikinci yan yüzlerinde oluşan çatlakların açıları sırasıyla 38, 32, 40 ve 45 derece ölçülmüştür. Burulma çatlaklarının kiriş boyuna daha fazla yayıldığı T2B3 kirişinin birinci yan yüzünde en büyük çatlak kiriş ortasında meydana gelmiştir. Kirişin bu yüzündeki diğer çatlaklar kiriş eksenine yaklaşık 45 derecelik açı yapmışlardır. Kirişin alt üst ve yan yüzlerindeki en büyük çatlaklar sırasıyla kiriş eksenine yaklaşık 48, 51 ve 52 derecelik açılar yaparak oluşmuşlardır.

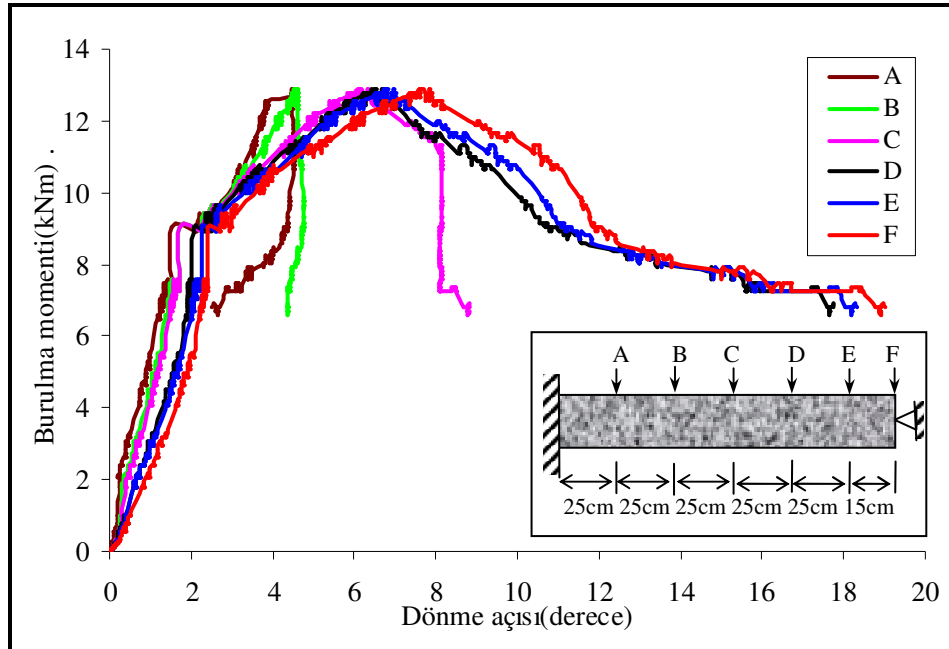


Şekil 50. T1B3 kirişinde oluşan çatlaklar

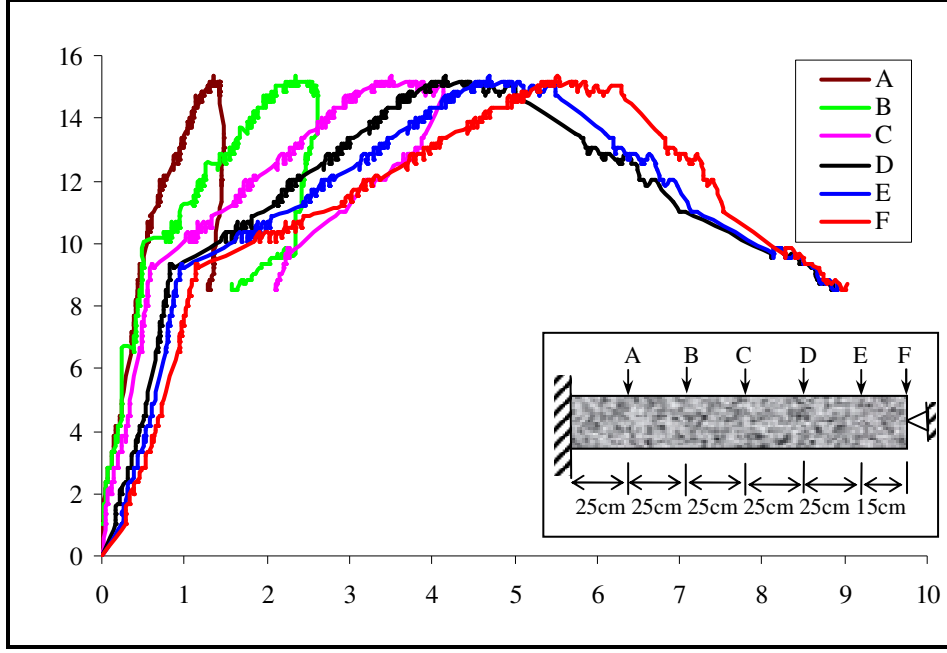


Şekil 51. T2B3 kirişinde oluşan çatlaklar

Donatı düzenleri Çizelge 8 'de verilen yüksek performanslı betonarme B3 kirişlerinin dönmeleri T1 serisi için Şekil 51, T2 serisi için Şekil 52 'de verilmiştir.



Şekil 52. T1B3 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

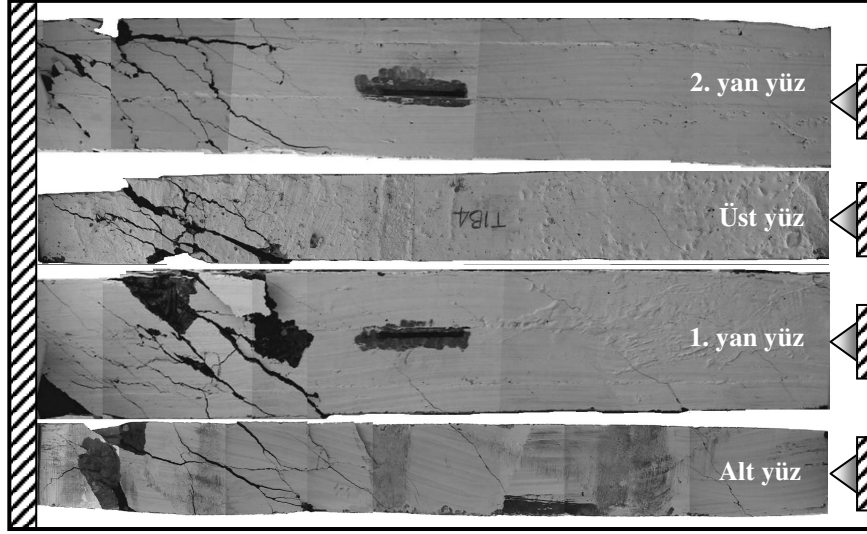


Şekil 53. T2B3 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

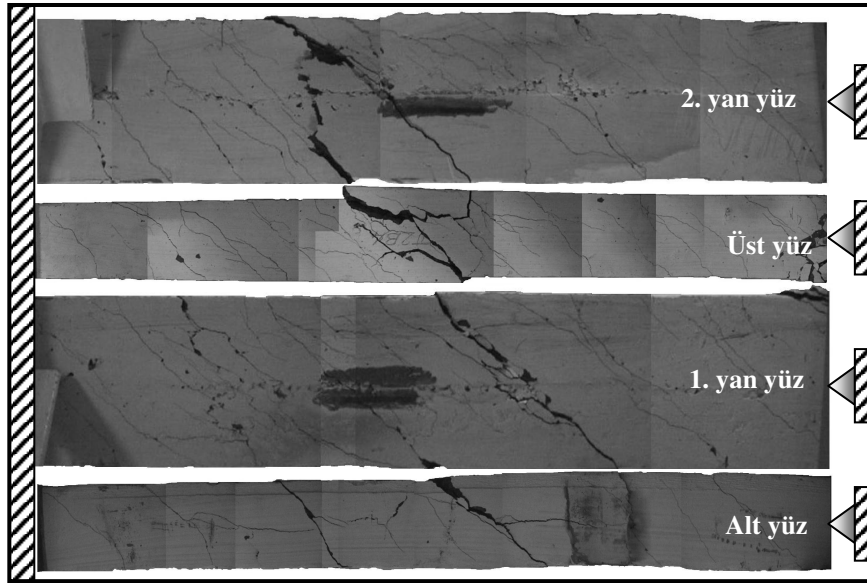
Basit burulma momenti deneylerinde T1B3 kirişi maksimum burulma momenti taşırken, A, B, C, D, E ve F enkesitlerinde sırasıyla 4.45, 4.61, 6.36, 6.72, 6.99 ve 7.89 derecelik dönmeler meydana gelmiştir. T1B3 kirişi artan burulma momenti etkisiyle ortasından çatlamış, daha sonra azalan burulma momenti ile birlikte A, B ve C enkesitlerindeki dönmeler de azalmış ve maksimum burulma momentine göre % 47 ‘ lik dayanım kaybı ile nihai burulma momentine ulaşmış, D, E ve F enkesitlerinde sırasıyla, 17.75, 18.32 ve 19.04 derecelik dönme açıları yaparak taşıma gücünü kaybetmiştir. T2 serisindeki B3 kirişleri ise T1B3 kirişlerine benzer davranış göstermişlerdir. Maksimum burulma momentinde T2B3 kirişinin A, B, C, D, E ve F enkesitlerinde sırasıyla, 1.36, 2.35, 3.50, 4.16, 4.69 ve 5.52 derecelik dönmeler oluşurken, nihai burulma momentinde bu enkesitlerdeki dönmeler sırasıyla, 1.29, 1.55, 2.10, 8.87, 8.91 ve 9.02 derece olmuştur. Bu da D enkesitinden önce kirişin çatlayarak mafsal gibi davrandığını göstermiştir.

Asal çekme donatıları ile birlikte gövde donatısı kullanılarak üretilen T1B4 ve T2B4 kirişlerinin burulma deneyleri sırasında yüzeylerinde oluşan çatlaklar sırasıyla Şekil 54 ve Şekil 55 ‘de verilmiştir.





Şekil 54. T1B4 kirişinde oluşan çatlaklar

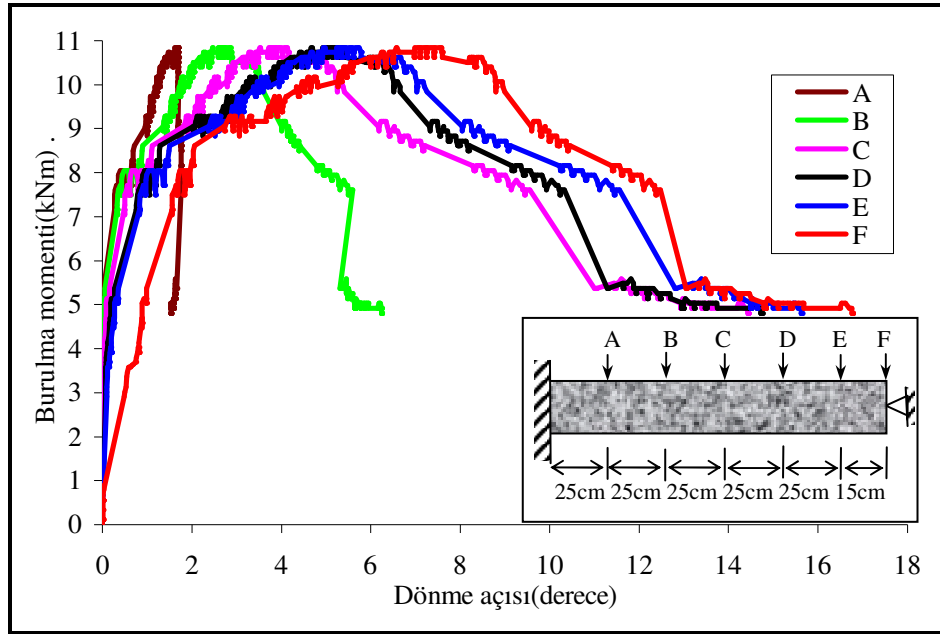


Şekil 55. T2B4 kirişinde oluşan çatlaklar

Burulma deneyleri esnasında T1B4 kirişinin yüzeyinde oluşan çatlaklar daha çok ankastre mesnet tarafında meydana gelmiştir. Oluşan büyük çatlakların açısı kiriş üst yüzünde yaklaşık 25 derece, alt yüzünde 26 derece, birinci ve ikinci yan yüzlerde ise sırasıyla 41 ve 45 derece olarak ölçülmüştür. T2B4 kirişinde oluşan çatlaklar T1B4 kirişine göre kiriş boyuna daha çok yayılmıştır. Kiriş gövdesinde oluşan en büyük çatlaklar T1B4 kirişindeki gibi ankastre mesnede yakın olan bölgede değildirler. T2B4 kirişinin birinci yan yüzündeki en büyük çatlağın kiriş eksenine ile yapmış olduğu açı 42 derecedir. Kirişin ikinci

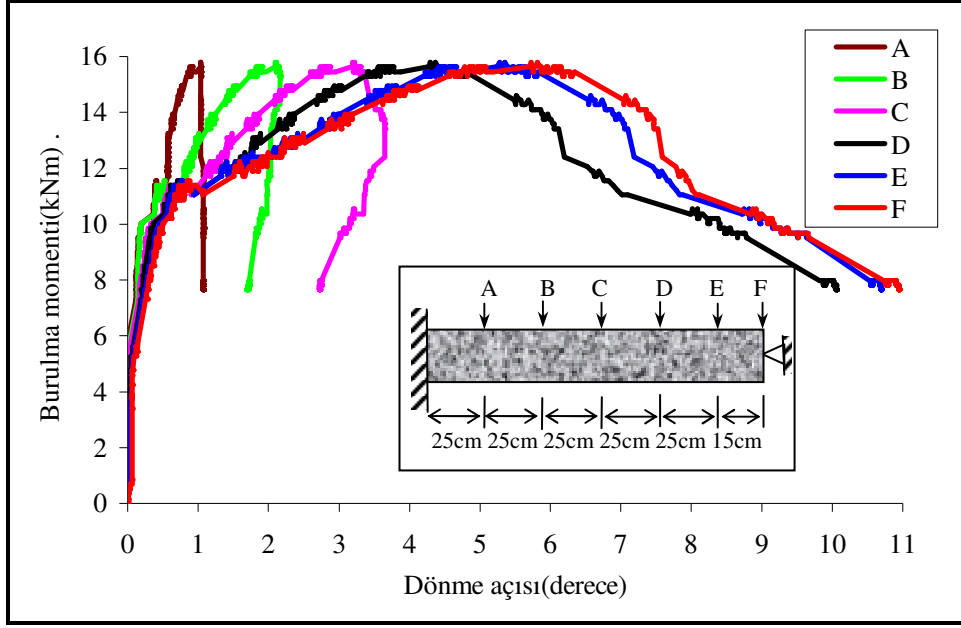
yan yüzünde oluşan iki büyük çatlaktan birisi kiriş eksenine ile yaklaşık 40 diğeri ise 70 derecelik açı yapmıştır. Kiriş üst yüzünde ankastre mesnede yakın olan bölgede daha yoğun görülen çatlaklar kiriş eksenine ile yaklaşık 40 derecelik açı yapmışlardır. Kirişin alt yüzünde çatlaklar arası mesafe diğeri yüzlerine göre daha büyüktür. Bu yüzde oluşan en büyük çatlakın kiriş eksenine ile açısı yaklaşık 41 derecedir. Kiriş alt yüzünde boyuna çatlaklarda gözlemlenmiştir.

T1B4 ve T2B4 kirişlerinin basit burulma momenti etkisindeki dönmeleri sırasıyla Şekil 56 ve Şekil 57 'de verilmiştir.



Şekil 56. T1B4 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

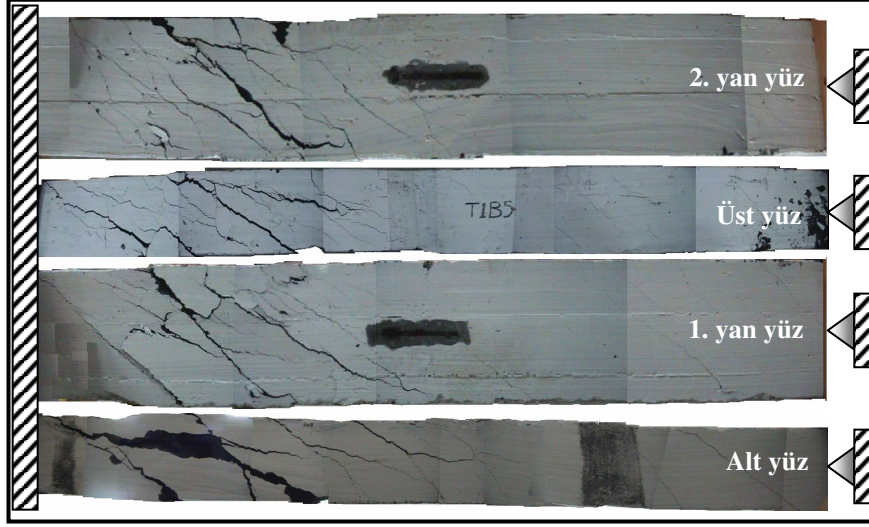
Ankastre mesnede yakın bir bölgeden çatlayarak kırılan T1B4 kirişinin A, B, C, D, E, ve F enkesitlerinin 10.85 kNm 'lik maksimum burulma momentine karşılık gelen dönmeleri sırasıyla 1.69, 2.86, 4.13, 5.39, 5.74 ve 7.58 derecedir. Maksimum burulma momentinde çatlayan ve gittikçe daha az burulma momenti taşımaya başlayan kirişin A enkesitinde dönme açısı azalırken, diğeri enkesitlerinde dönme açıları artmaya devam etmiştir. Zira, maksimum burulma momentine göre % 56 'lık dayanım kaybıyla nihai burulma momentine ulaşan kirişin A, B, C, D, E, ve F enkesitlerindeki dönmeleri sırasıyla 1.53, 6.23, 14.44, 14.75, 15.64 ve 16.78 derece olmuştur. Bu da A ve B enkesitlerinden sonra kirişin mafsallaşarak taşıma gücünü kaybettiğini göstermektedir.



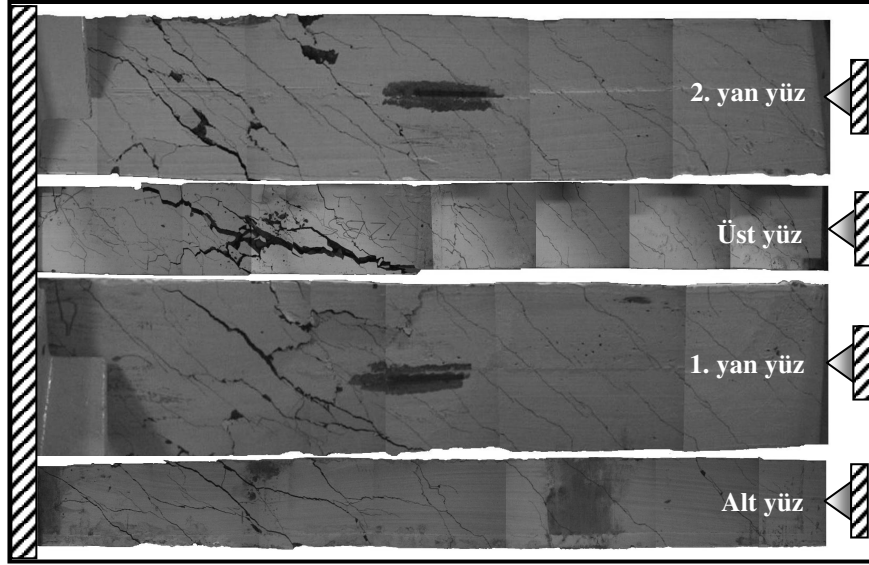
Şekil 57. T2B4 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

Orta bölgesinden çatlayarak taşıma gücünü kaybeden T2B4 kirişi 15.80 kNm 'lik maksimum burulma momentini taşıırken bu kirişin A, B, C, D, E ve F enkesitlerinde sırasıyla 1.03, 2.11, 3.22, 4.37, 5.36 ve 5.82 derecelik dönmeler meydana gelmiştir. Maksimum burulma momentine göre % 52 'lik dayanım kaybıyla nihai burulma momentine ulaşan kirişin söz konusu enkesitlerindeki dönmeleri ise sırasıyla 1.07, 1.69, 2.72, 10.05, 10.69 ve 10.94 derece olarak elde edilmiştir. Burada da kirişin C-D enkesitleri arasından mafsallaşarak taşıma gücünü kaybettiği anlaşılmaktadır.

Burulma deneylerinden T1B5 ve T2B5 kirişleri için elde edilen kırılma şekilleri sırasıyla Şekil 58 ve Şekil 59 'da verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi, T1B5 kirişinin ortası ile ankastre mesnedi arasında büyük çatlaklar oluşmuştur. Bu çatlaklar kirişin alt, üst, birinci ve ikinci yan yüzlerinde kiriş eksenine ile yaklaşık olarak sırasıyla, 35, 34, 45 ve 40 derecelik açılar yapmışlardır. T2B5 kirişinin birinci yan yüzündeki büyük çatlak kiriş eksenine ile yaklaşık olarak 36 derecelik açı yaparken kiriş gövdesine yayılmış olan diğer çatlakların açısı yaklaşık 42 derecedir. Kirişin ikinci yan yüzünde 42 derecelik açı ile yayılım gösteren çatlaklardan en büyüğü ankastre mesnede yakın bölgede oluşmuştur. Kirişin alt ve üst yüzlerindeki en büyük burulma çatlaklarının kiriş eksenine ile yaptıkları açılar sırasıyla 40 ve 16 derece iken bu yüzlerde kiriş boyuna yayılmış olan diğer çatlakların açıları yaklaşık olarak sırasıyla 50 ve 45 derece olarak ölçülmüştür.

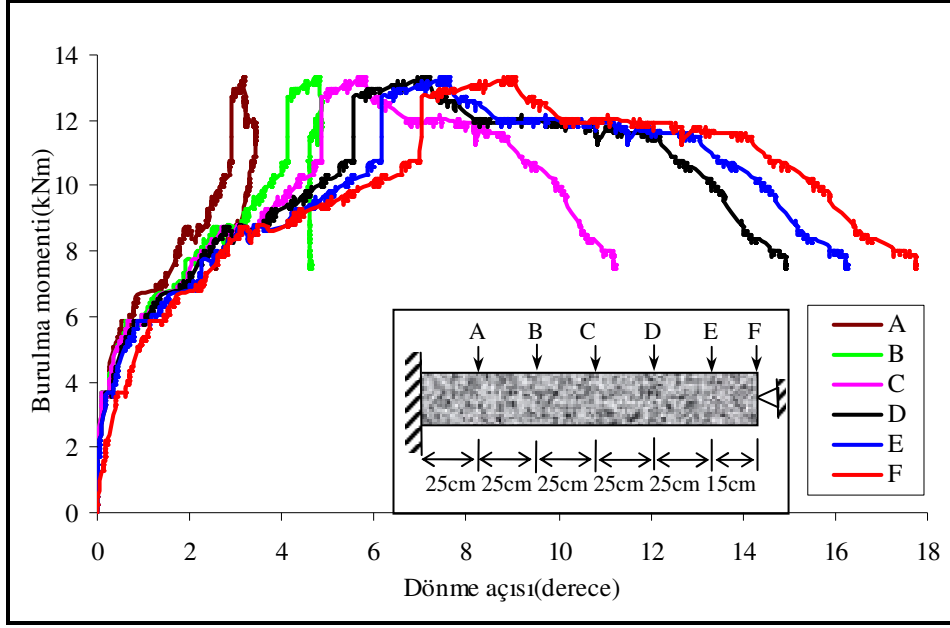


Şekil 58. T1B5 kirişinde oluşan çatlaklar

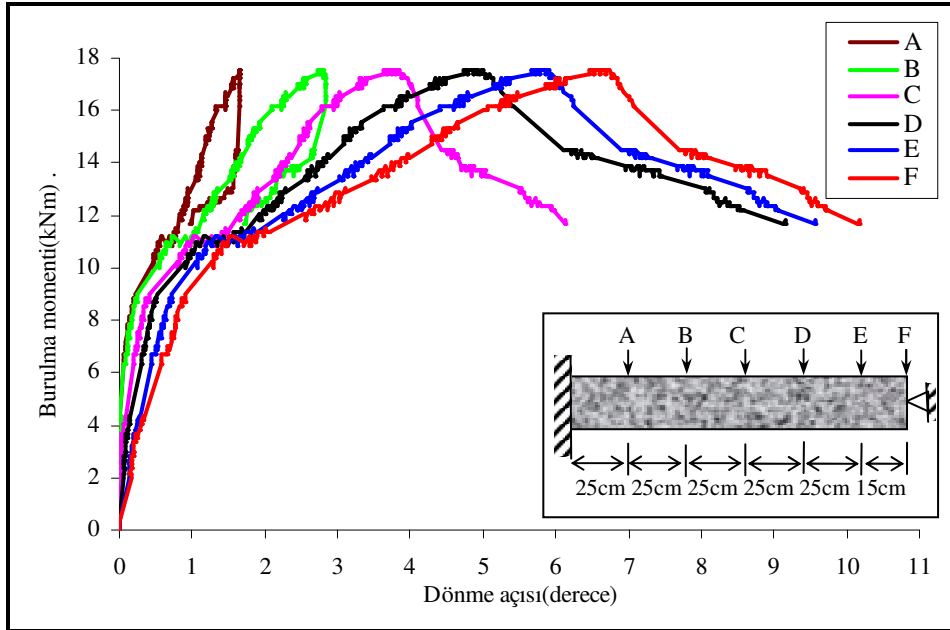


Şekil 59. T2B5 kirişinde oluşan çatlaklar

Burulma deneylerinden T1B5 ve T2B5 kirişleri için elde edilen burulma momenti-dönme grafikleri sırasıyla Şekil 60 ve Şekil 61 'de verilmiştir. Gövde donatısı ile birlikte 10 cm aralığındaki etriyeler kullanarak üretilen T1B5 kirişinin maksimum burulma momenti altında A, B, C, D, E ve F enkesitlerinde ölçülen dönme açıları sırasıyla 3.17, 4.79, 5.81, 7.19, 7.63 ve 9.06 derecedir. Kiriş B enkesitine yakın bir bölgeden çatlayıp taşıma gücünü kaybettiği için, nihai burulma momentinde A ve B enkesitlerinde ölçülen



Şekil 60. T1B5 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

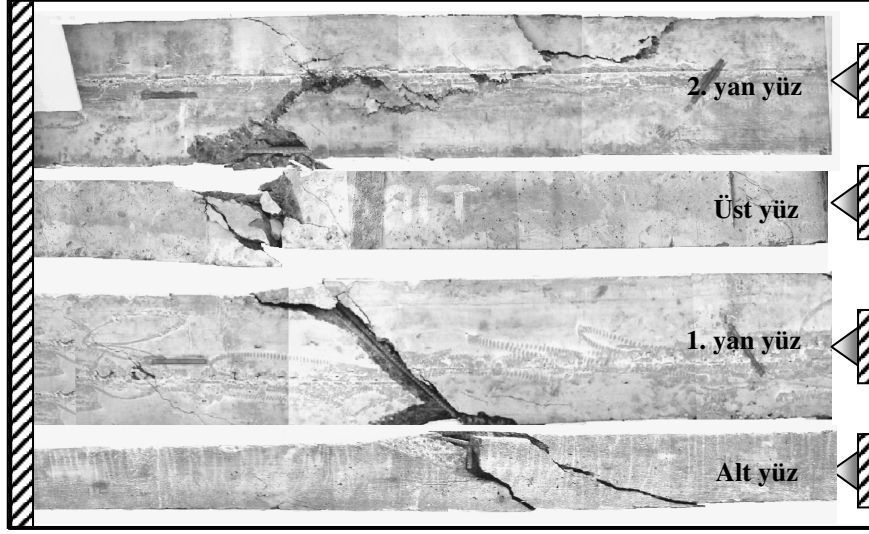


Şekil 61. T2B5 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

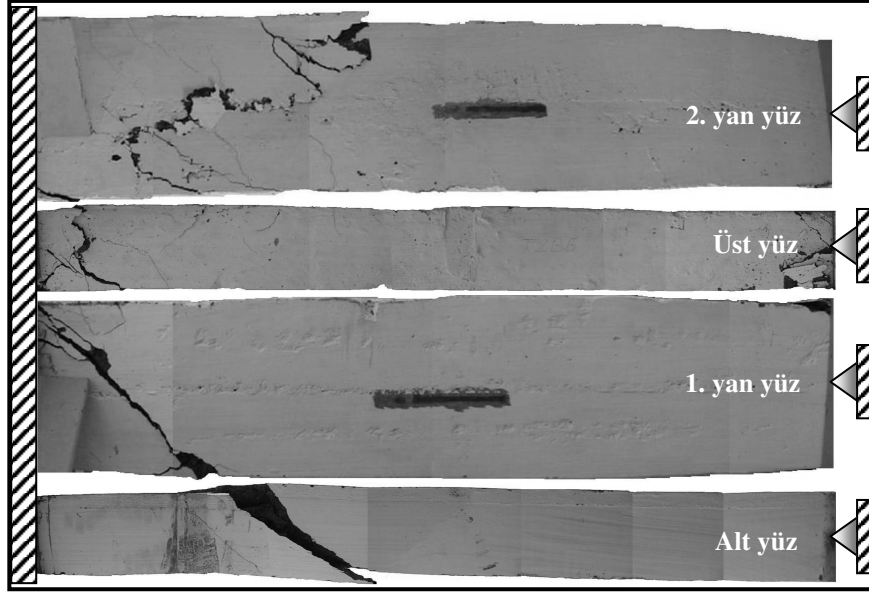
nihai dönmeler sırasıyla 2.54 ve 4.61 dereceye gerilemişlerdir. C, D, E ve F enkesitlerinde dönmeler artarak nihai burulma momentinde sırasıyla 11.21, 14.91, 16.25 ve 17.73 dereceye ulaşmışlardır. T1B5 kirişi ile aynı donatı düzenine sahip olan T2B5 kirişinin A, B, C, D, E ve F enkesitlerinde maksimum burulma momentine karşılık gelen dönmesi sırasıyla 1.65, 2.81, 3.85, 5.00, 5.91 ve 6.74 derece ölçülmüşken bu enkesitlerin nihai

burulma momentine karşılık gelen dönmeleri ise sırasıyla 0.97, 1.72, 6.13, 9.16, 9.58 ve 10.18 derece olarak ölçülmüştür. Kırılma B ile C enkesitleri arasında olduğundan, kiriş bu bölgeden mafsallaşarak taşıma gücünü kaybetmiştir.

Etriyesi, boyuna donatılarına 45 derecelik açı yapacak şekilde donatı düzeni oluşturulan T1B6 ve T2B6 kirişlerinde (bkz. Çizelge 8), burulma deneyleri sırasında oluşan çatlaklar sırasıyla Şekil 62 ve Şekil 63 'de verilmiştir.



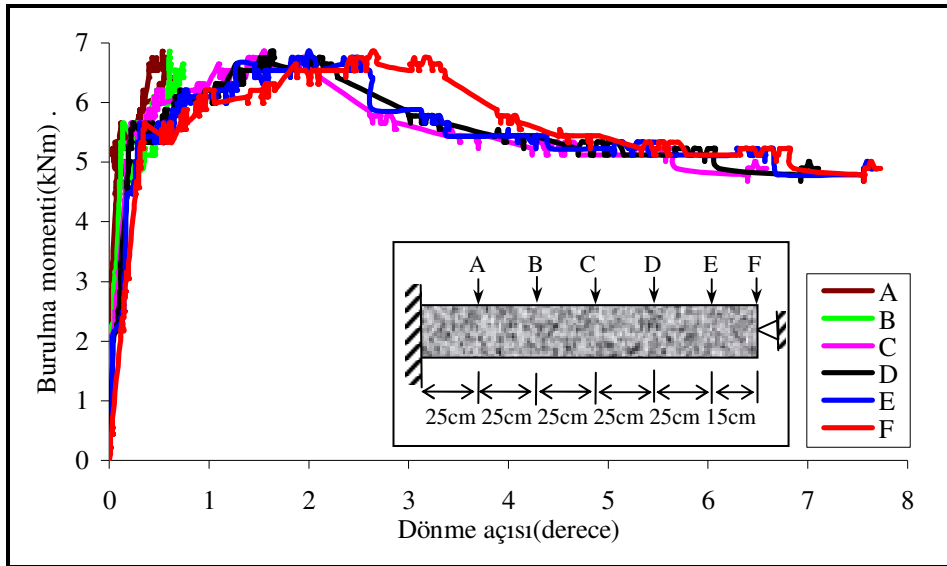
Şekil 62. T1B6 kirişinde oluşan çatlaklar



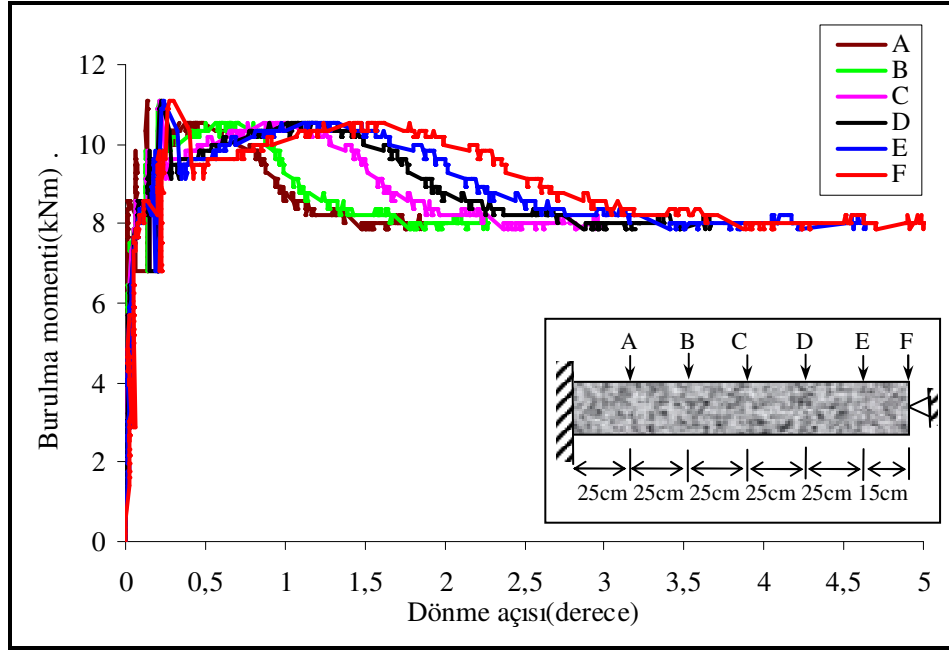
Şekil 63. T2B6 kirişinde oluşan çatlaklar

Bu şekillerden görüldüğü gibi, T1B6 kirişinin alt, üst, birinci ve ikinci yan yüzlerinde oluşan çatlaklar kiriş eksenini ile sırasıyla 30, 45, 15 ve 45 derecelik açılar yapmışlardır. Kiriş boyunca çatlak yayılımı çok az olmuştur. Çatlak gelişimi donatısız kirişlerinkine benzerdir. T1B6 kirişininkine benzer şekilde çatlayan T2B6 kirişinin alt, birinci ve ikinci yan yüzlerinde oluşan çatlaklar kiriş eksenini ile sırasıyla 32, 45 ve 34 derecelik açılar yaparken kiriş üst yüzünde ankastre mesnete yakın bölgede meydana gelen çatlak yaklaşık olarak kiriş eksenine diktir. T2B6 kirişinde oluşan çatlaklar T1B6 kirişininkine göre ankastre mesnede daha yakındır.

Burulma deneylerinde T1B6 ve T2B6 kirişi için elde burulma momenti-dönme açısı ilişkisi sırasıyla Şekil 64 ve Şekil 65 'de verilmiştir. T1B6 kirişinin A, B, C, D, E ve F enkesitlerinde 6.86 kNm 'lik maksimum burulma momenti altında ölçülen dönmeler sırasıyla, 0.53, 0.61, 1.56, 1.65, 2.04 ve 2.66 derecedir. Maksimum burulma momentine göre % 29 'luk dayanım kaybıyla nihai burulma momentine ulaşan kirişin bu enkesitlerindeki dönmeleri sırasıyla 0.15, 0.25, 6.59, 7.11, 7.72 ve 7.73 derecedir. Buradan da görüldüğü gibi kiriş B-C enkesitleri arasından mafsallaşarak taşıma gücünü kaybetmiştir. Enkesit yüksekliği daha büyük olan T2B6 kirişi ankastre mesnet ile A enkesiti arasından çatlayarak döndüğü için tüm enkesitlerde nihai burulma momentine kadar dönmeler artmıştır. Maksimum burulma momentinde en fazla 0.29 derecelik dönme yapan T2B6 kirişinin A, B, C, D, E ve F enkesitlerinde nihai olarak 1.85, 2.27, 2.97, 3.66, 4.62 ve 5.00 derecelik dönmeler ölçülmüştür.

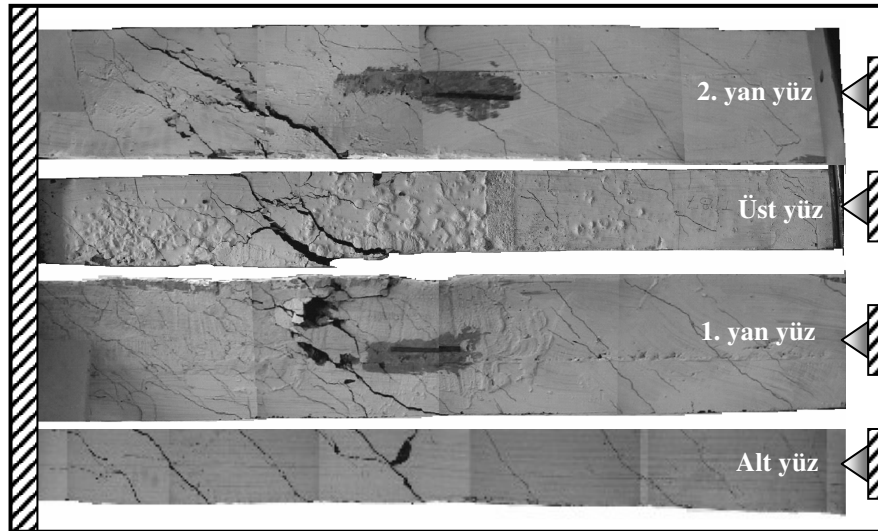


Şekil 64. T1B6 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi



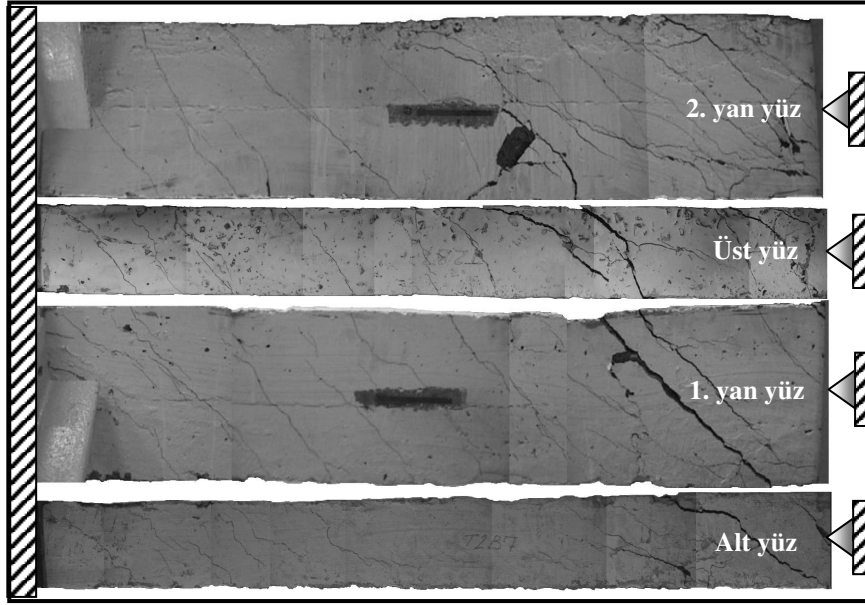
Şekil 65. T2B6 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

Enine donatıları arasında bir doğrultuda diyagonal donatılar yerleştirilerek hazırlanan T1B7 ve T2B7 kirişlerinin deneylerden sonra elde edilen kırılmaları sırasıyla Şekil 66 ve Şekil 67 'de verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi, basit burulma deneyleri esnasında T1B7 kirişi ankastre mesnet ile kiriş ortası arasındaki bölgeden çatlamıştır. Kirişin alt, üst, birinci ve ikinci yan yüzlerinde oluşan belirgin çatlaklar kiriş eksenine yaklaşık sırasıyla 50, 45, 31 ve 35 derecelik açılar yapmışlardır.



Şekil 66. T1B7 kirişinde oluşan çatlaklar

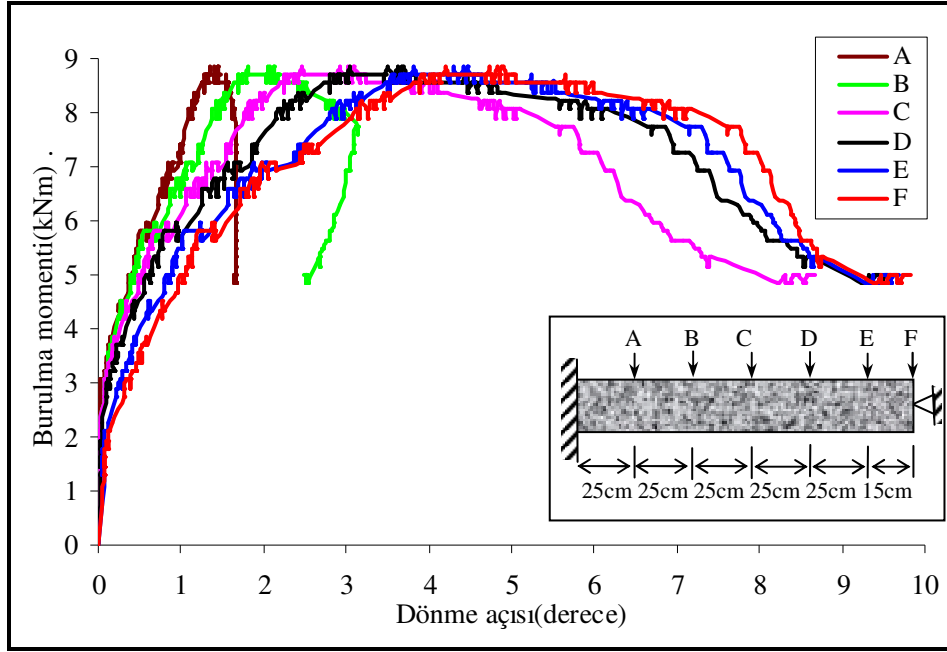




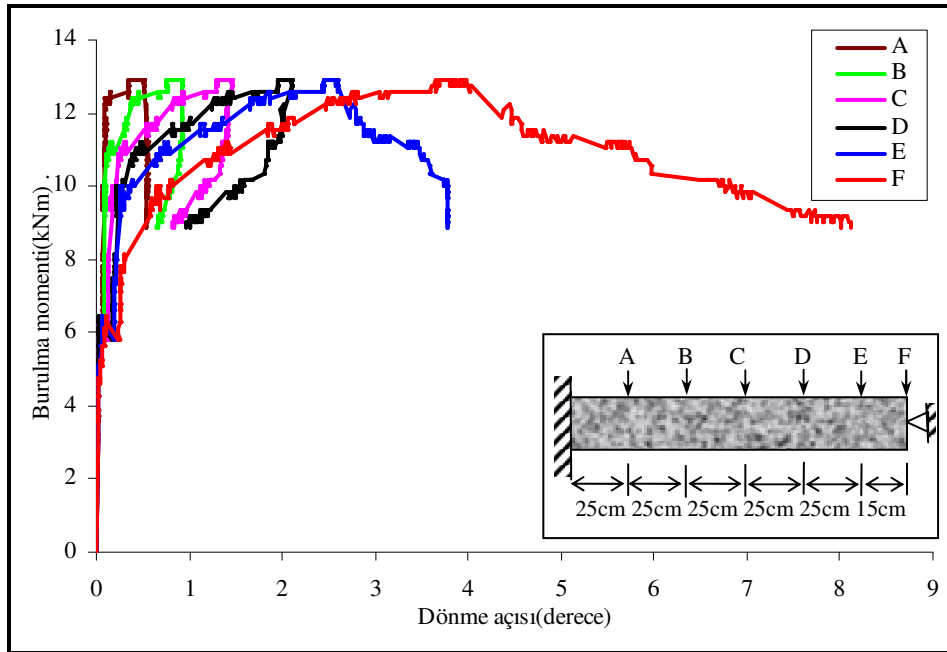
Şekil 67. T2B7 kirişinde oluşan çatlaklar

T2B7 kirişinin kuvvet uygulanan ucunda çatlak yayılımı daha fazla olmuştur. Kirişin birinci yan yüzünde açıları 45 derece olan çatlaklar kiriş boyunca yayılmışlardır. İkinci yan yüzünde kiriş ortasına kadar yayılan çatlaklar kiriş eksenini ile farklı açılar yapmışlardır. Kiriş alt yüzünde oluşan en belirgin çatlakın açısı yaklaşık 29 derece iken, üst yüzündeki iki belirgin çatlaktan birinin açısı yaklaşık 59, diğerininki ise 36 derecedir. Söz konusu kirişlerin burulma momentleri ile dönme açıları arasındaki ilişkiler sırasıyla Şekil 68 ve Şekil 69 'da verilmiştir.

T1B7 kirişinin A, B, C, D, E ve F enkesitlerindeki dönme açıları, maksimum burulma momentinde sırasıyla, 1.44, 2.12, 3.10, 3.70, 4.48 ve 4.90 derece, nihai burulma momentinde sırasıyla 1.66, 2.49, 8.66, 9.59, 9.69 ve 9.84 derece olmuştur. Buradan da bu kirişte kırılmanın B ve C enkesitleri arasında olduğu görülmektedir. T2B7 kirişinin A, B, C, D, E ve F enkesitlerindeki dönme açıları maksimum burulma momentinde sırasıyla, 0.51, 0.93, 1.45, 2.10, 2.60 ve 3.98 derece, nihai burulma momentinde sırasıyla 0.52, 0.65, 0.81, 0.97, 3.78 ve 8.66 derece olmuştur. T2B7 kirişinin A, B, C, ve D enkesitlerindeki dönme açılarının azalması bu kiriş için kırılmanın D-E enkesitleri arasında olduğunu göstermektedir.



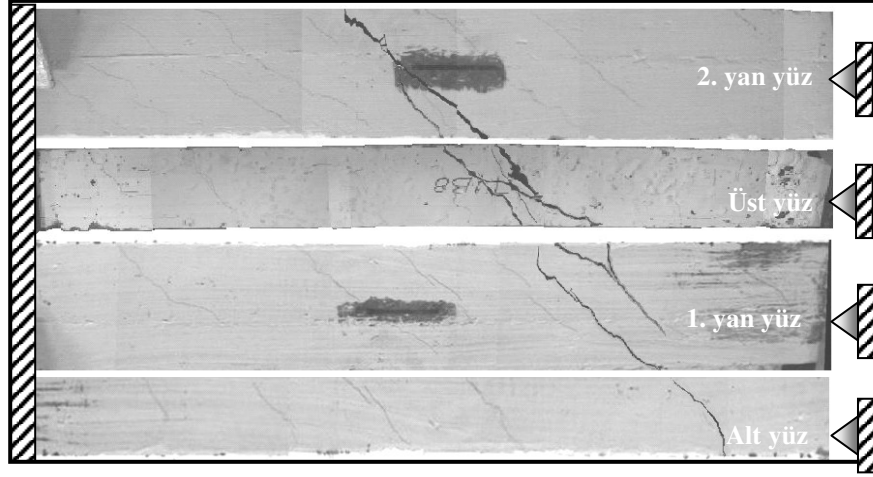
Şekil 68. T1B7 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi



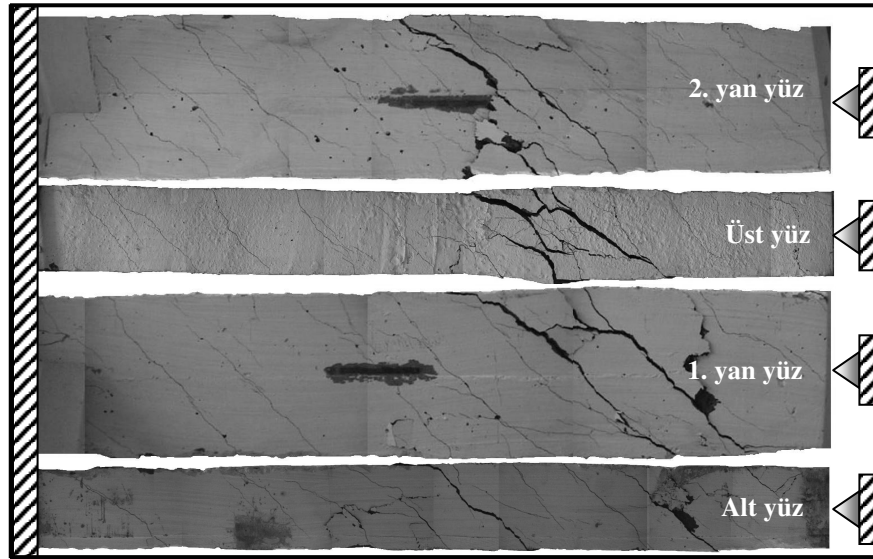
Şekil 69. T2B7 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

Burulma deneyleri sırasında T1B8 ve T2B8 kirişlerinin yüzeylerinde oluşan çatlaklar sırasıyla Şekil 70 ve Şekil 71 'de verilmiştir. Enkesit yüksekliği daha küçük olan T1B8 kirişinin birinci ve ikinci yan yüzlerinde oluşan çatlakların açıları yaklaşık 40 derece iken üst ve alt yüzlerde oluşan çatlakların açısı ise yaklaşık 45 derece olmuştur. T2B8 kirişinin

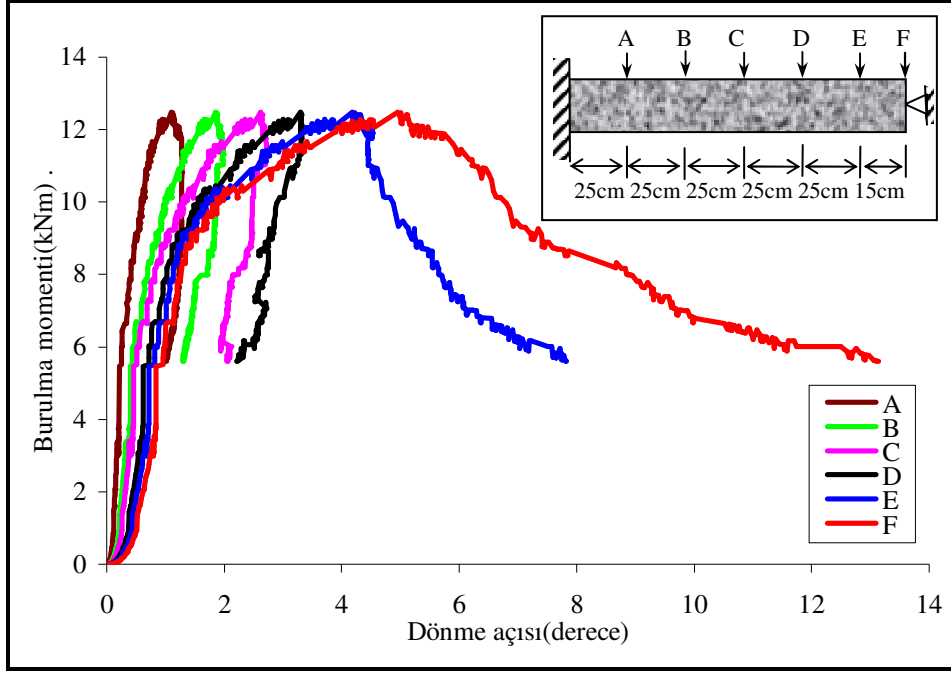
birinci yan yüzündeki en belirgin iki çatlaktan biri kiriş eksenine ile yaklaşık 42 derecelik açı yaparken diğeri 45 derecelik açı yapmıştır. Kirişin ikinci yan yüzünde en belirgin çatlaklar kirişin ortasına yakın oluşmuştur. En belirgin çatlak açısı yaklaşık 45 derecedir ve çatlaklar bu yüzde kiriş boyunca yayılmıştır. Kiriş alt yüzünde de yaklaşık 45 derecelik açılar ile çatlaklar kirişin yük uygulanan ucuna yakın oluşmuşlardır. Ankastre mesnede yakın kısımda kiriş alt yüzünde çatlak yayılımı çok azdır. Kiriş üst yüzünde meydana gelen iki çatlaktan birisi 36 diğeri 51 derecelik açıya sahiptir. Kirişin bu yüzünde çatlaklar ankastre mesnet tarafında daha yaygındır. Söz konusu kirişlerin burulma momenti-dönme açısı ilişkisi sırasıyla Şekil 72 'de ve Şekil 73 'de verilmiştir.



Şekil 70. T1B8 kirişinde oluşan çatlak ve kırıklar

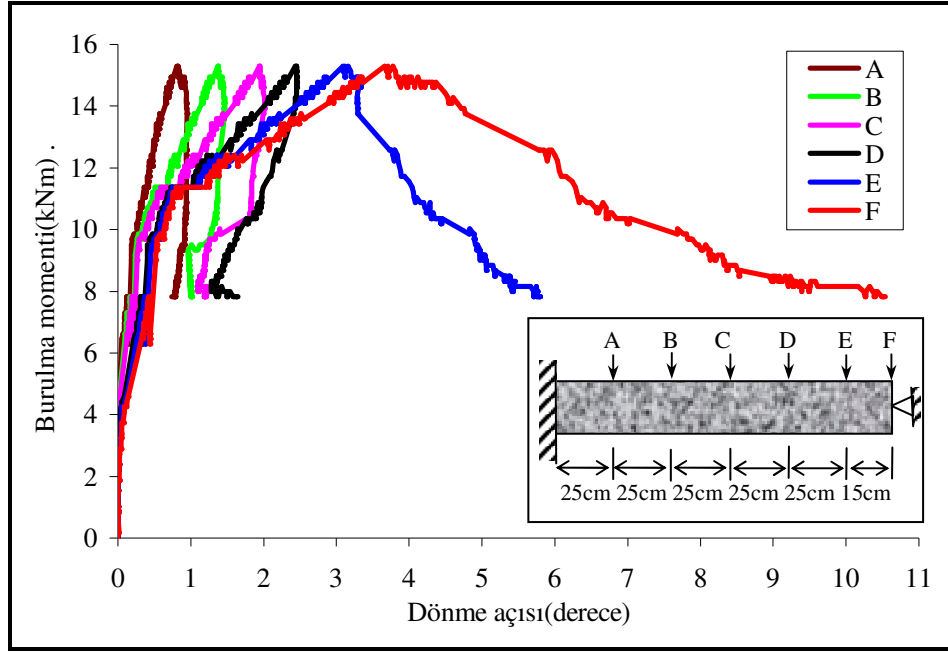


Şekil 71. T2B8 kirişinde oluşan çatlak ve kırıklar



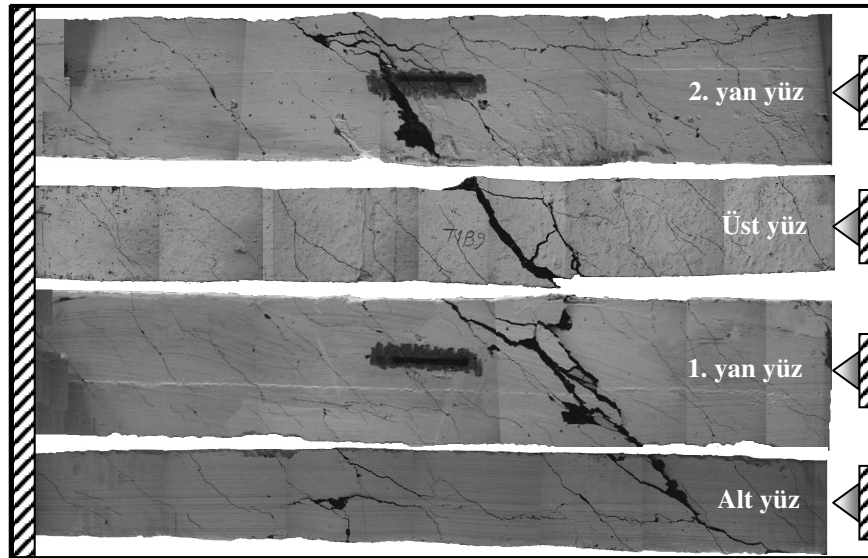
Şekil 72. T1B8 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

Burulma deneyi sırasında T1B8 kirişinin A, B, C, D, E ve F enkesitlerinde oluşan dönme açıları artan burulma momenti ile büyüyerek 12.41 kNm 'lik maksimum burulma momentinde sırasıyla, 1.12, 1.87, 2.64, 3.31, 4.28 ve 5.11 derece olmuşlardır. Nihai burulma momentinde bu enkesitlerde ölçülen dönme açıları ise sırasıyla, 1.00, 1.29, 2.05, 2.21, 7.82 ve 13.13 derece olmuştur. Buradan da bu kirişin, donatı düzeni nedeniyle, burulma momenti etkisiyle daha rijit davranış sergilediği ve çatlakların tüm kiriş boyunca yayıldığı, nihai durumda ise D enkesiti civarında çatlak açıklıklarının artmasıyla taşıma gücünü kaybettiği görülmektedir. T2B8 kirişinin A, B, C, D, E ve F enkesitlerinde meydana gelen dönme açıları 15.29 kNm 'lik maksimum burulma momentinde sırasıyla 0.83, 1.38, 1.95, 2.45, 3.17 ve 3.78 derece ölçülmüştür. Kiriş taşıdığı maksimum burulma momentini çatlamasıyla birlikte kaybederken çatlayan bölgenin ankastre mesnet tarafında kalan A, B, C, ve D enkesitlerindeki dönme açılarında azalmalar meydana gelmiştir. Nihai olarak 5.60 kNm 'lik burulma momenti taşıyan T2B8 kirişinin bu moment altında A, B, C, D, E ve F enkesitleri sırasıyla 0.74, 1.01, 1.18, 1.64, 5.79 ve 10.52 derecelik dönme gerçekleştirmişlerdir. Dönme açıları dikkate alındığında, yine donatı düzenine bağlı olarak, kirişin daha rijit davranış gösterdiği, nihai durumda E enkesiti civarında mafsallaşarak taşıma gücünü kaybettiği görülmektedir. Kirişin kırılma şekli de bu durumu desteklemektedir.



Şekil 73. T2B8 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

T1B9 ve T2B9 kirişlerinin yüzeylerinde oluşan çatlaklar sırasıyla Şekil 74 ve Şekil 75 'de verilmiştir.

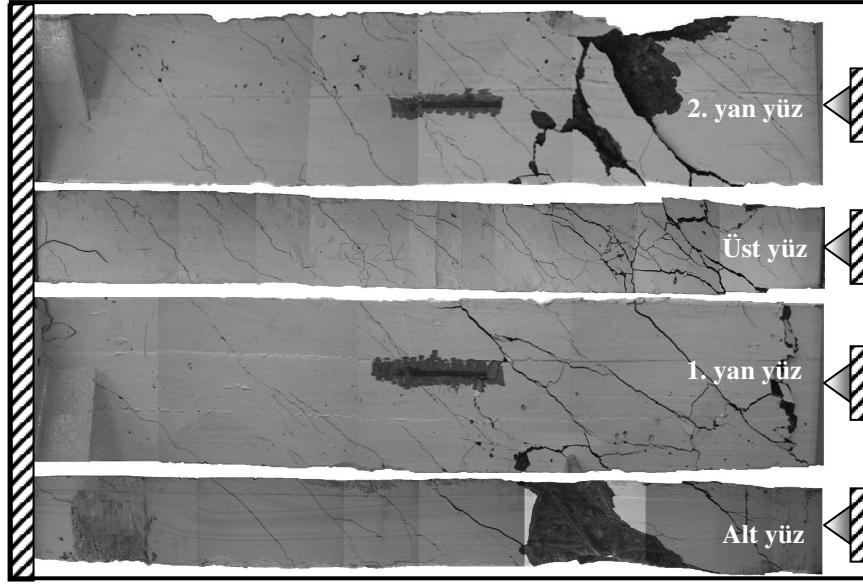


Şekil 74. T1B9 kirişinde oluşan çatlak ve kırıklar

T1B9 kirişinde çatlaklar kiriş ortası ile yük uygulanan enkesit arasında oluşmuşlardır. Kirişin birinci yan yüzünde oluşan en belirgin çatlak kiriş eksenine ile yaklaşık 36 derecelik

açı yapmıştır. Bu yüzde ankastre mesnede doğru yayılan diğer çatlakların açıları ise yaklaşık 45 derecedir. T1B9 kirişinin ikinci yan yüzünde oluşan en belirgin çatlak kiriş ortasındadır. Bu çatlağın kiriş eksenine ile yapmış olduğu açı yaklaşık 55 derecedir. Bu yüzde çatlaklar yük uygulanan enkesite yakın bölgede daha yaygındır. Kirişin üst yüzünde oluşan en belirgin burulma çatlağı, kiriş eksenine ile yaklaşık olarak 51 derecelik açı yapmıştır. Kiriş alt yüzünde oluşan çatlak ise yük uygulanan enkesite oldukça yakındır ve kiriş eksenine ile yaklaşık 32 derecelik açı yapmıştır. Nihai durumda kirişin bu yüzünde boyuna çatlaklarında oluştuğı gözlemlenmiştir.

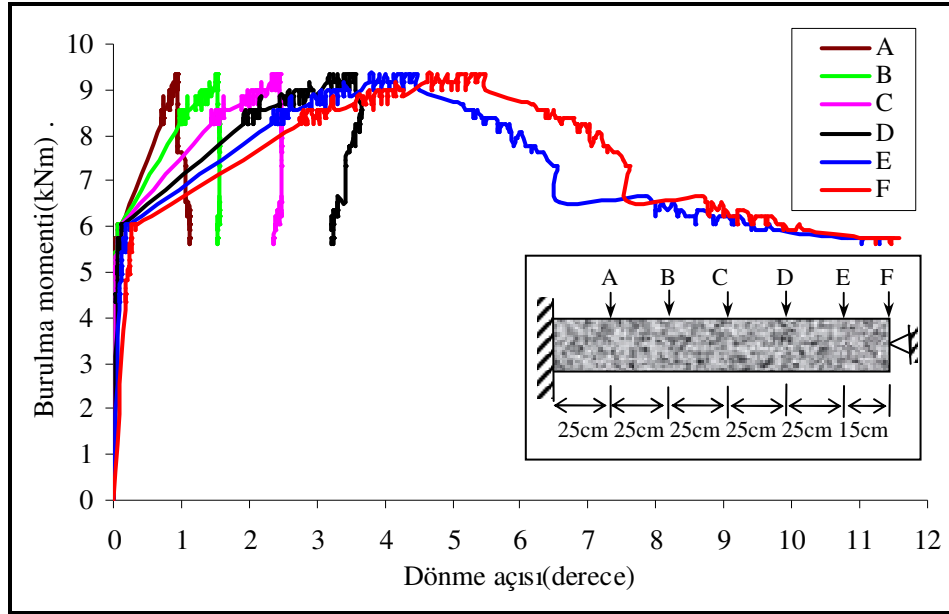
T2B9 kirişinde oluşan çatlaklar yük uygulanan enkesite yakın bölgede meydana gelmiştir. Kirişin alt, birinci ve ikinci yan yüzlerinde oluşan çatlakların kiriş eksenine ile yapmış olduğu açı yaklaşık 45 derece iken, kiriş üst yüzünde bu açı 40 derece ile 45 derece arasındadır. Kiriş yüzlerinde oluşan çatlakları birbirine bağlayan değışken açılı çatlaklarda mevcuttur.



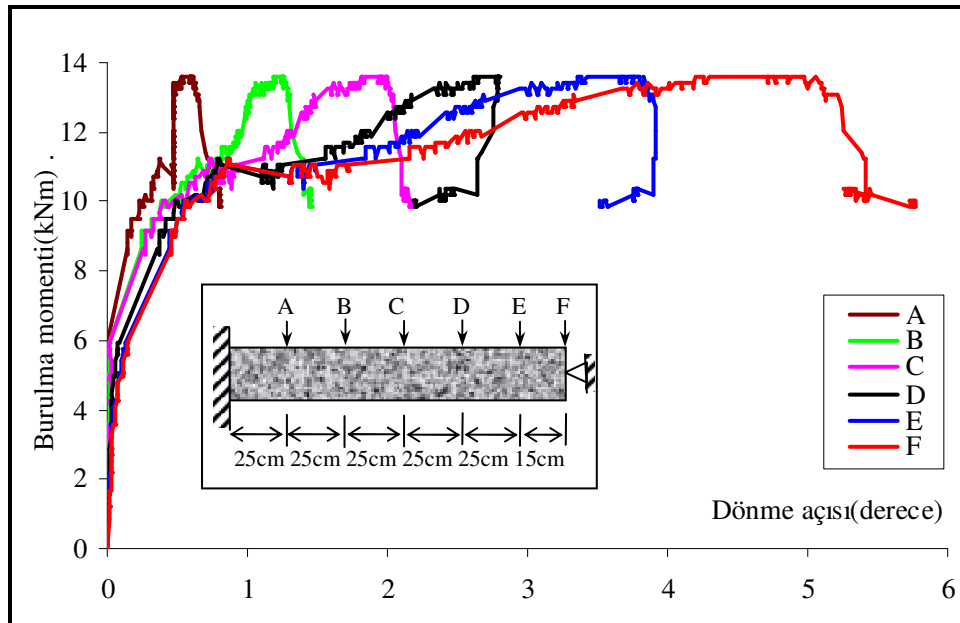
Şekil 75. T2B9 kirişinde oluşan çatlak ve kırıklar

Burulma momenti ile dönme açılarının değışimi T1B9 kiriş için Şekil 76 'da, T2B9 kiriş için ise Şekil 77 'de verilmiştir. T1B9 kirişinin A, B, C, D, E ve F enkesitlerinde oluşan dönme açıları 9.32 kNm 'lik maksimum burulma momenti altında sırasıyla 0.94, 1.54, 2.45, 3.58, 4.48 ve 5.49 derecedir. Bu enkesitlerdeki nihai burulma momentine karşılık gelen dönme açıları ise sırasıyla, 1.13, 1.52, 2.36, 3.23, 11.41 ve 11.58 derecedir.

Kirişin çekme yüzünde her enine donatı arasında, basınç yüzünde ise her üç enine donatıyı kapsayacak şekilde diyagonal donatı kullanılması nedeniyle, kiriş E enkesiti civarında nihai dayanıma ulaştığında, diğer enkesitlerin dönme açılarında maksimum dönme açılara göre az da olsa bir azalma oluşmakta bu da, diyagonal donatıların elastik şekildeğiştirmelerinden kaynaklanmaktadır.



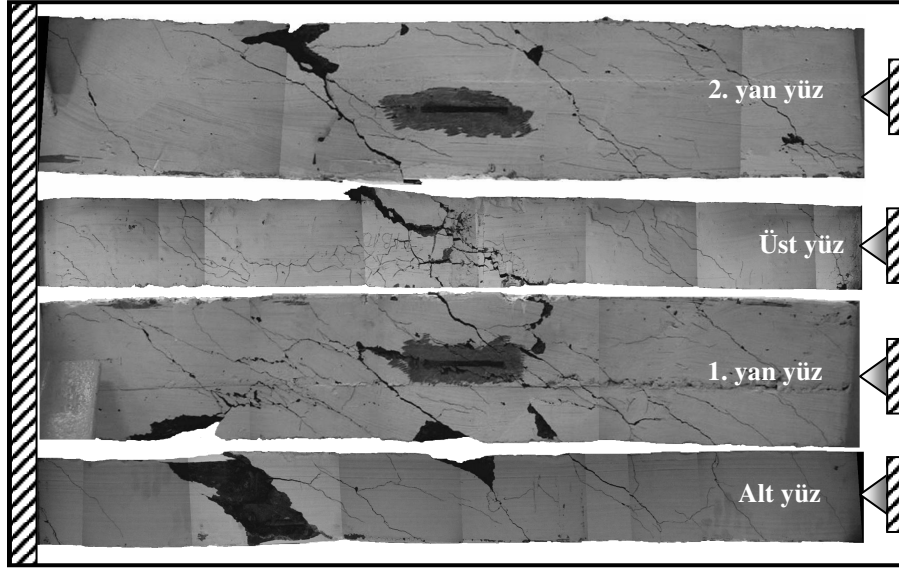
Şekil 76. T1B9 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi



Şekil 77. T2B9 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

Enkesit yüksekliği daha büyük olan T2B9 kirişinin A, B, C, D, E ve F enkesitlerinde oluşan dönmeler ise maksimum burulma momenti altında sırasıyla, 0.62, 1.27, 1.99, 2.79, 3.82 ve 5.05 derecedir. Nihai burulma momentinde bu enkesitlerdeki dönme açıları sırasıyla, 0.81, 1.44, 2.16, 2.21, 3.51, 5.77 derece olmuştur. Bu da T1B9 kirişine göre enkesit boyutları nedeniyle, daha rijit davranış göstererek ve E enkesitinde oluşan mafsallaşmayla taşıma gücünü kaybetmiştir.

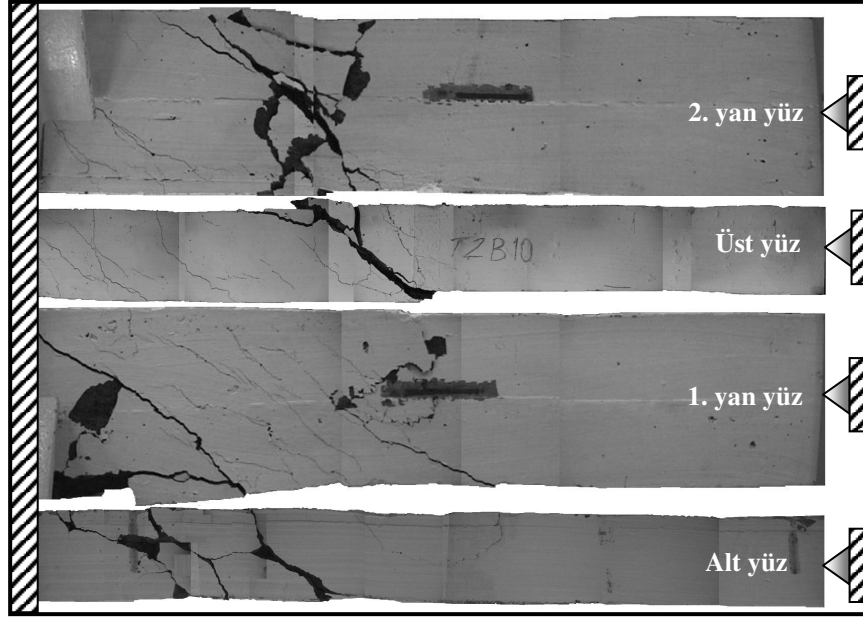
Burulma deneyleri sırasında T1B10 ve T2B10 kirişlerinin yüzeylerinde oluşan çatlaklar sırasıyla Şekil 78 ve Şekil 79 'da verilmiştir.



Şekil 78. T1B10 kirişinde oluşan çatlak ve kırıklar

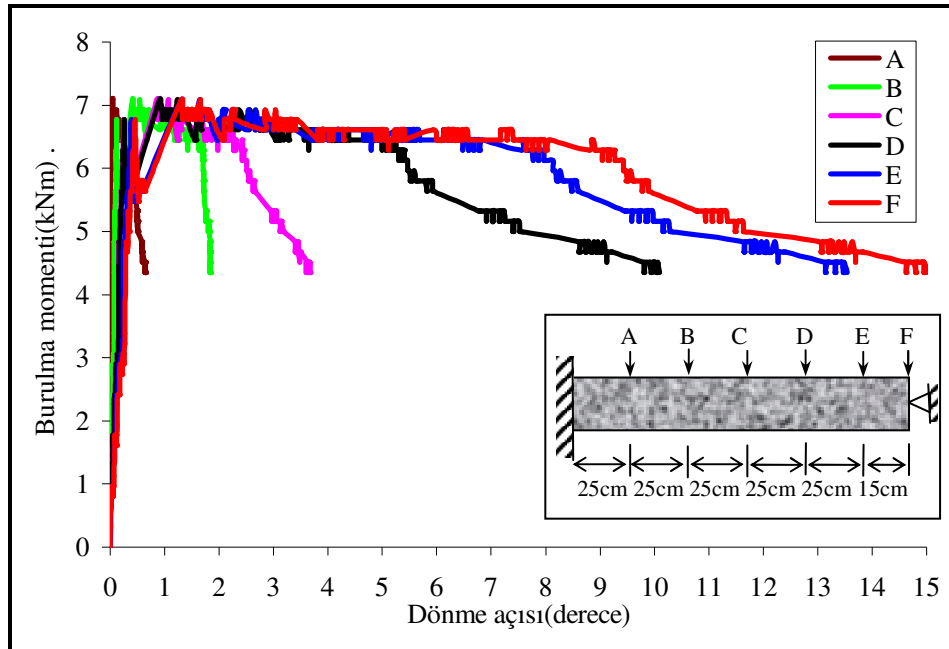
T1B10 kirişinin üst ve birinci yan yüzündeki en belirgin çatlakların kiriş eksenine yapmış olduğu açı yaklaşık 35 derecedir. Kirişin ikinci yan yüzünde yük uygulanan enkesite yakın bölgede oluşan çatlakların açısı yaklaşık 36 derece iken, ankastre mesnet tarafında bu açı yaklaşık 51 derecedir. Kirişin alt yüzünde ankastre mesnede yakın bölgede oluşan çatlakların kiriş eksenine ile yapmış oldukları açılar yaklaşık 45 derecedir. T2B10 kirişinin birinci ve alt yüzünde oluşan çatlaklar ankastre mesnede yakın olup kiriş eksenine yaklaşık 45 derecelik açılar yapmışlardır. İkinci ve üst yüzlerde kiriş ortasına daha yakın oluşan çatlakların açıları sırasıyla yaklaşık 48 ve 45 derecedir.



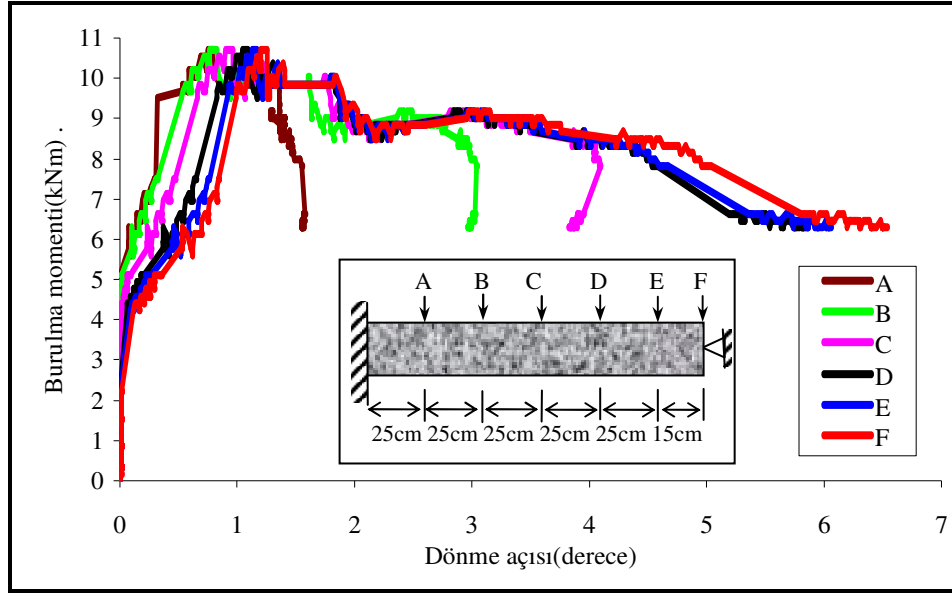


Şekil 79. T2B10 kirişinde oluşan çatlak ve kırıklar

Bu kirişlere ait burulma momenti-dönme açısı ilişkileri sırasıyla Şekil 80 ve Şekil 81 'de verilmiştir.



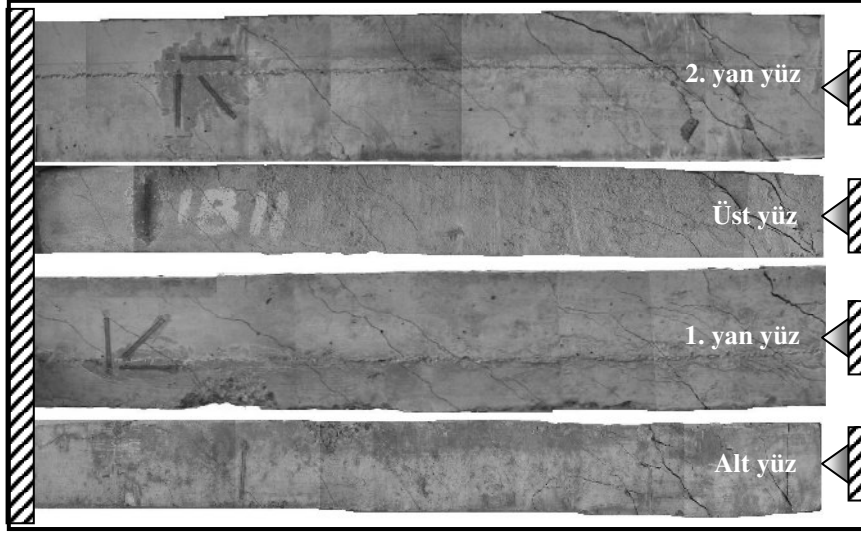
Şekil 80. T1B10 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi



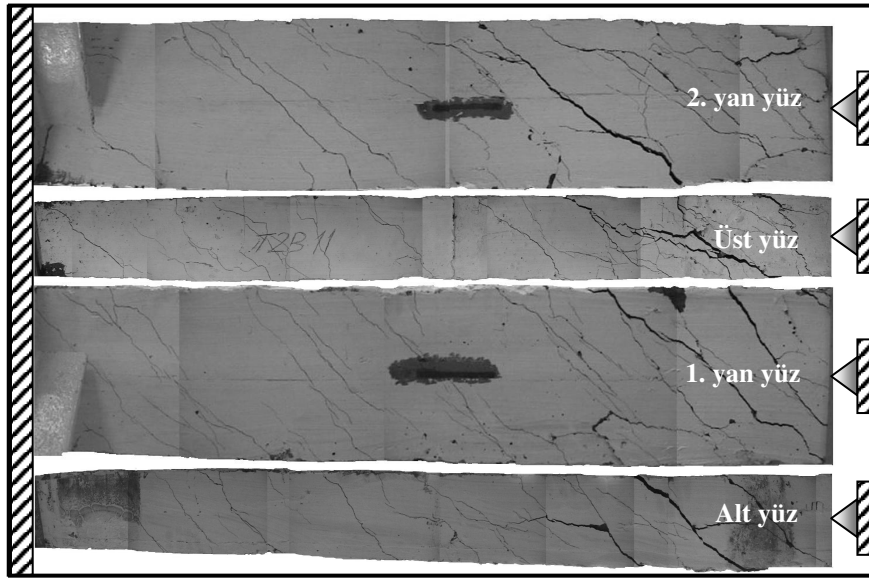
Şekil 81. T2B10 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

Burulma deneyi sırasında T1B10 kirişinin A, B, C, D, E ve F enkesitlerinde oluşan dönme açıları 7.09 kNm 'lik maksimum burulma momentinde sırasıyla, 0.03, 0.54, 1.07, 1.24, 1.65 ve 1.65 derece olmuşlardır. Nihai burulma momentinde bu enkesitlerde ölçülen dönme açıları ise sırasıyla, 0.65, 1.83, 3.67, 10.10, 13.55 ve 15.03 derecedir. Buradan da bu kirişin D enkesiti civarından mafsallaşarak taşıma gücünü kaybettiği görülmektedir. T2B10 kirişinin A, B, C, D, E ve F enkesitlerinde meydana gelen dönme açıları 10.70 kNm 'lik maksimum burulma momentinde sırasıyla 0.80, 0.82, 0.96, 1.09, 1.17 ve 1.26 derece ölçülmüştür. Nihai burulma momentine karşılık gelen dönme açıları da sırasıyla 1.55, 2.96, 3.82, 5.87, 6.07 ve 6.54 derecedir. Burada kirişin C ve D enkesitleri arasından mafsallaşarak taşıma gücünü kaybettiği görülmektedir.

Burulma deneylerinde, T1B11 ve T2B11 kirişlerinin yüzlerinde oluşan çatlak şekilleri sırasıyla Şekil 82 ve Şekil 83 'de verilmiştir. Yük uygulanan enkesite yakın yerden çatlaman T1B11 kirişinin birinci yan yüzündeki belirgin iki çatlak kiriş eksenine ile yaklaşık 36 ve 60 derecelik, kiriş üst yüzündekiler ise 34 ve 53 derecelik açı yapmışlardır. Kirişin ikinci yan yüzüne yayılan çatlaklar yaklaşık 40 derecelik açıya sahiptir. Kirişin alt yüzünde oluşan belirgin çatlakın açısı ise yaklaşık 55 derecedir. T1B11 kirişine benzer şekilde çatlaman T2B11 kirişinin alt, üst, birinci ve ikinci yan yüzlerinde oluşan en belirgin çatlakların kiriş eksenine ile yapmış olduğu açılar sırasıyla 45, 20, 37 ve 42 derece olarak belirlenmiştir.



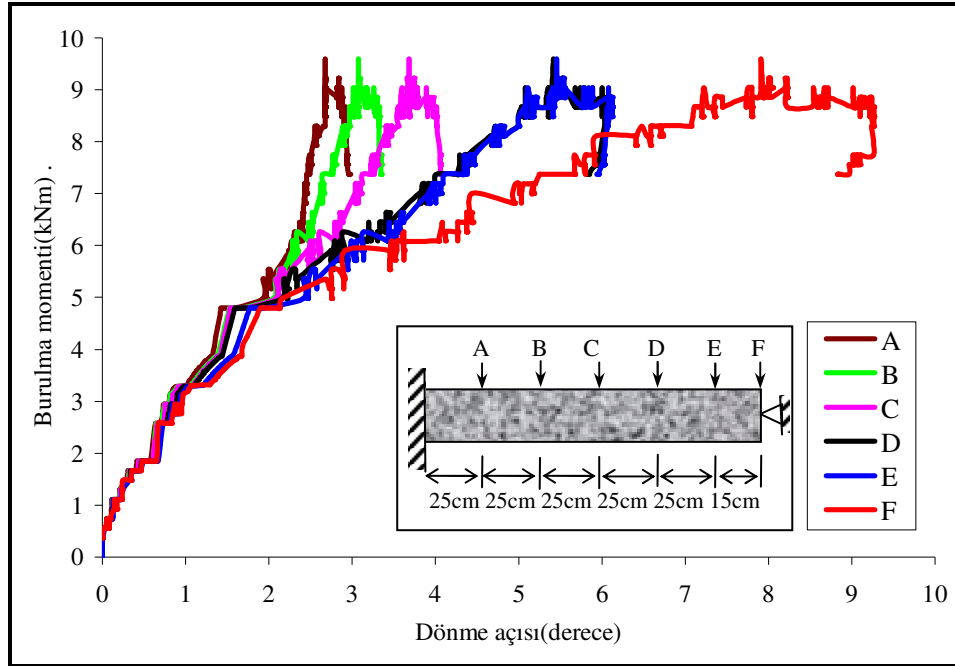
Şekil 82. T1B11 kirişinde oluşan çatlaklar



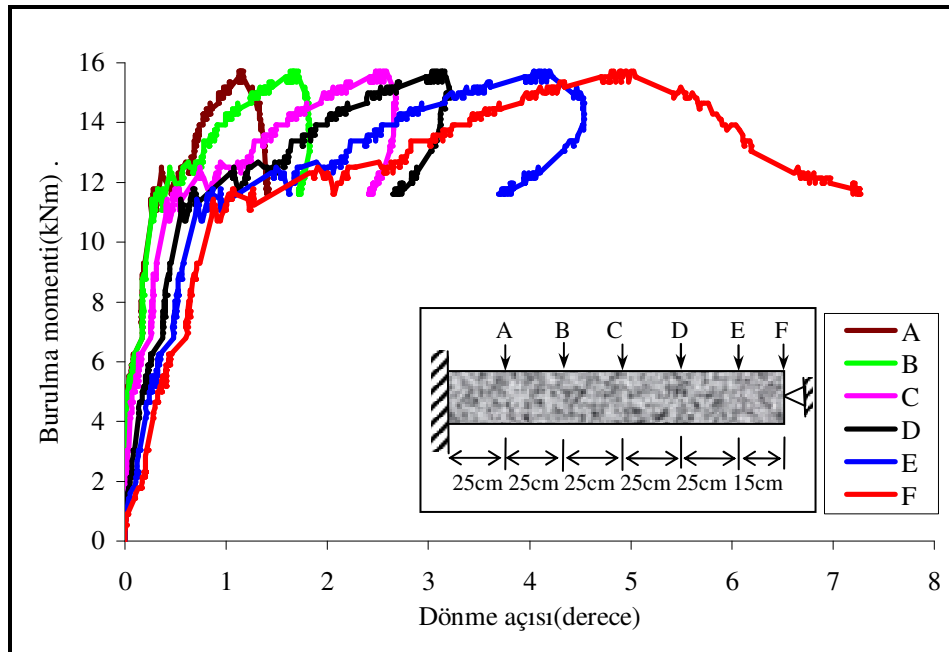
Şekil 83. T2B11 kirişinde oluşan çatlaklar

Deneylerde T1B11 ve T2B11 kirişlerinin A, B, C, D, E ve F enkesitlerinde oluşan dönmeler sırasıyla Şekil 84 ve Şekil 85 'de verilmiştir. T1B11 kirişinde bu enkesitlerdeki dönmeler maksimum burulma momentinde sırasıyla, 2.67, 3.07, 3.68, 5.42, 5.45 ve 7.93 derece iken nihai burulma momentinde sırasıyla, 2.98, 3.34, 4.06, 5.82, 5.96 ve 8.83 derecedir. T2B11 kirişinin A, B, C, D, E ve F enkesitlerinde oluşan dönmeler maksimum burulma momentinde sırasıyla, 1.16, 1.70, 2.59, 3.16, 4.20 ve 5.03 derece, nihai burulma

momentinde ise sırasıyla, 1.41, 1.71, 2.41, 2.65, 3.70 ve 7.25 derecedir. Bu iki kirişin de, donatı düzeni nedeniyle burulma yükü altında kiriş boyunca rijit davranış göstererek, taşıma gücünü E-F enkesitleri arasında mafsallaşarak kaybettiği görülmüştür.



Şekil 84. T1B11 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

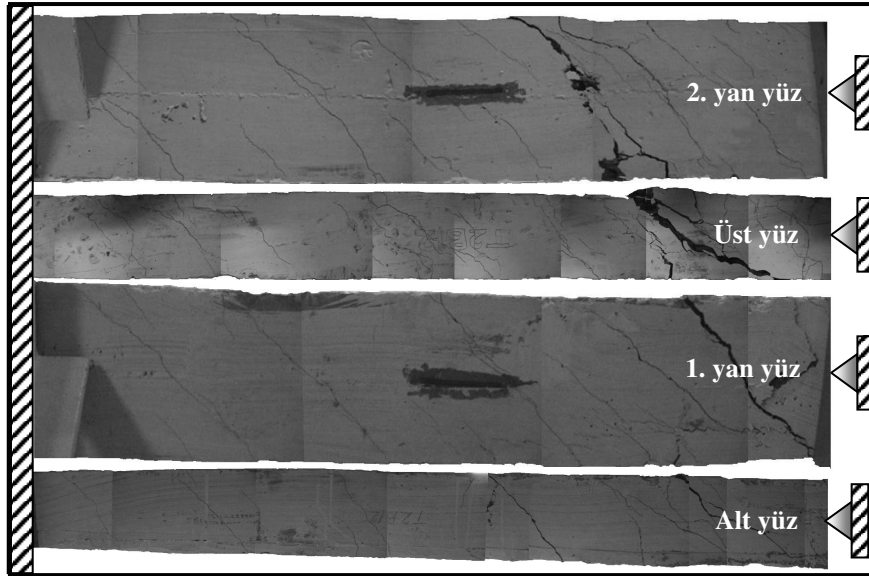


Şekil 85. T2B11 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

Burulma deneylerine tabi tutulan T1B12 ve T2B12 kirişlerinin yüzeylerinde oluşan çatlaklar sırasıyla Şekil 86 ve Şekil 87 'de verilmiştir.



Şekil 86. T1B12 kirişinin deney sonrası çatlakları

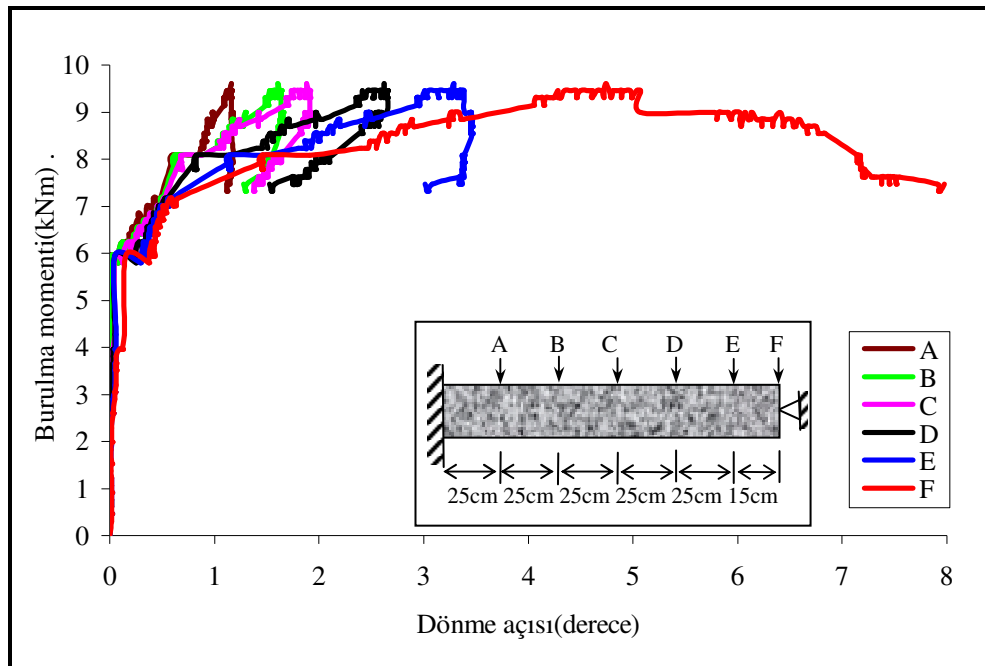


Şekil 87. T2B12 kirişinin deney sonrası çatlakları

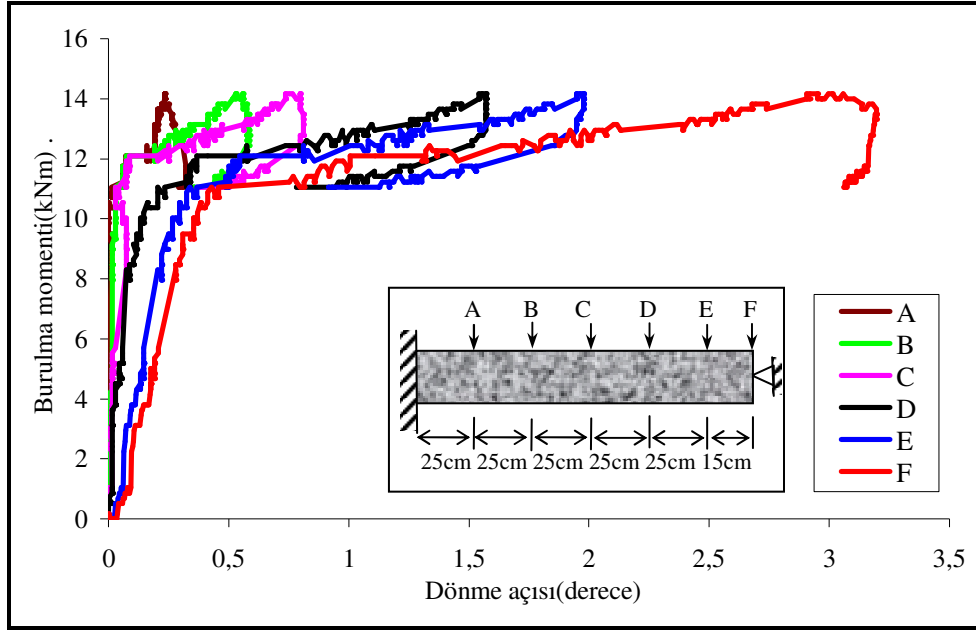
T1B12 kirişinin birinci yan yüzünde oluşan en belirgin çatlak kiriş eksenine yaklaşık 41 derecelik açı yapmıştır. Kirişin bu yüzüne yayılan diğer çatlakların açısı da yaklaşık 41 derecedir. Kirişin ikinci yan yüzünde, kiriş yüzeyine yayılan çatlaklardan en büyüğünün

açısı 33 derecedir. Kirişin alt ve üst yüzlerinde kiriş gövdesine yaklaşık 45 derece açı ile yayılan çatlaklar, yük uygulanan enkesite yaklaştıkça belirginleşerek kiriş eksenini yaklaşık 25 derecelik açı oluşturmuşlardır. T2B12 kirişinin yüzeyinde oluşan çatlaklar ise T1B12 kirişininkilere benzemektedir. Kirişin gövdesine 45 derece açıyla yayılan çatlaklar kirişin, yük uygulanan ucuna yaklaştıkça alt, üst, birinci ve ikinci yan yüzlerinde kiriş eksenini ile sırasıyla, 33, 32, 49 ve 47 derecelik açılar oluşturmuşlardır.

Basit burulma deneylerinde T1B12 ve T2B12 kirişlerinin A, B, C, D, E ve F enkesitlerinde oluşan dönme açıları sırasıyla Şekil 88 ve Şekil 89 'da verilmiştir. T1B12 kirişi 9.61 kNm 'lik maksimum burulma momentini taşıırken bu kirişin A, B, C, D, E ve F enkesitlerinde sırasıyla 1.16, 1.61, 1.88, 2.62, 3.29 ve 4.74 derecelik dönme açıları meydana gelmiştir. T1B12 kirişinin bu enkesitlerinin 7.47 kNm 'lik nihai burulma momenti altındaki dönmeleri ise sırasıyla 1.12, 1.28, 1.37, 1.53, 3.01 ve 7.97 derecedir. T2B12 kirişinin aynı enkesitlerindeki maksimum burulma momenti altındaki dönme açıları sırasıyla, 0.23, 0.56, 0.80, 1.57, 1.98 ve 3.06 derece iken nihai burulma momenti altında, 0.29, 0.35, 0.37, 0.78, 0.92 ve 3.13 derecedir. Her iki kirişinde, taşıma gücünü kaybetmesi, E-F enkesitleri arasında meydana gelen mafsallaşma ile olmuştur. Çatlaklar her iki kirişte de tüm gövdeye yayılmıştır. Ancak T1B12 kirişi nihai durumda T2B12 kirişine göre daha fazla dönme davranışı göstermiştir.

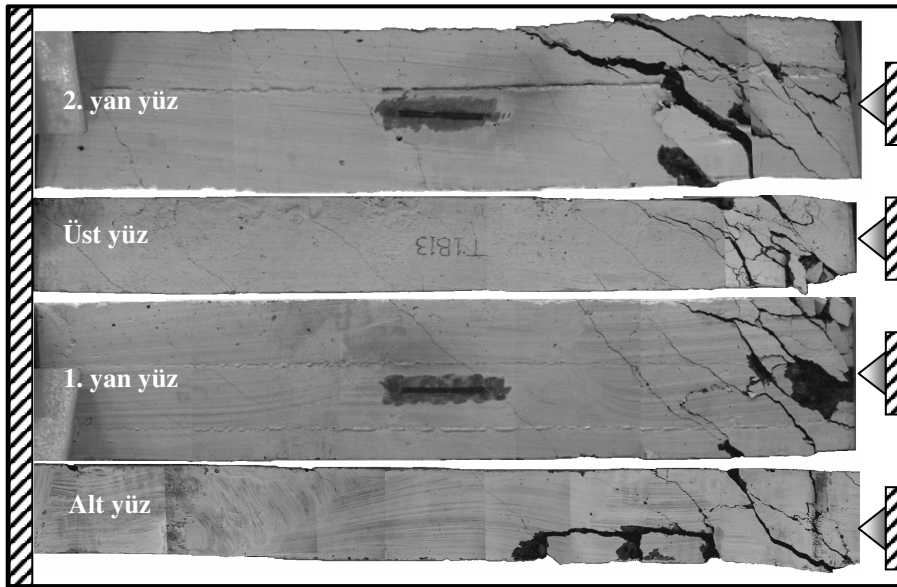


Şekil 88. T1B12 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi



Şekil 89. T2B12 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

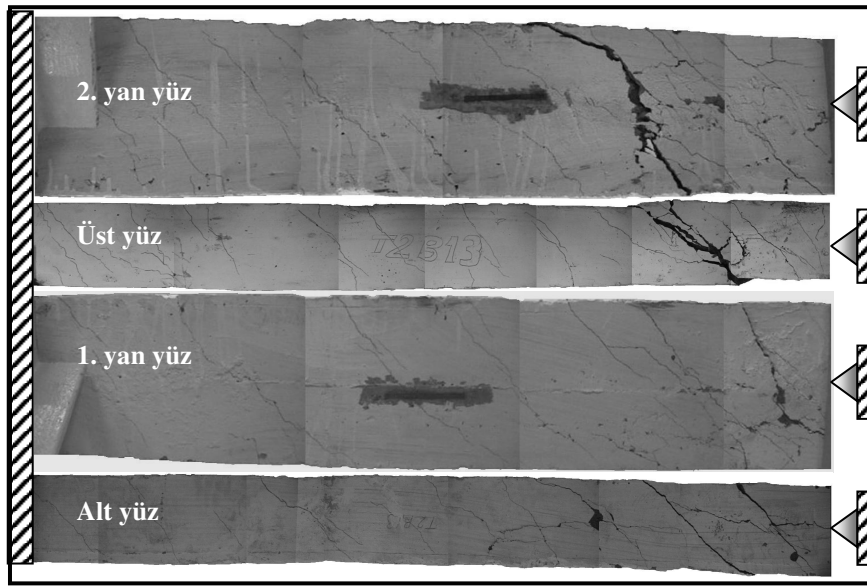
Gerçekleştirilen burulma deneylerinden T1B13 ve T2B13 kirişleri için elde edilen çatlak şekilleri sırasıyla Şekil 90 ve Şekil 91 'de verilmiştir.



Şekil 90. T1B13 kirişinin deney sonrası çatlakları

T1B13 kirişinin yük uygulanan enkesitine yakın bir bölgesinde çok sayıda çatlak oluşmuştur. Oluşan bu çatlakların en göze çarpanları kirişin alt, üst, birinci ve ikinci yan

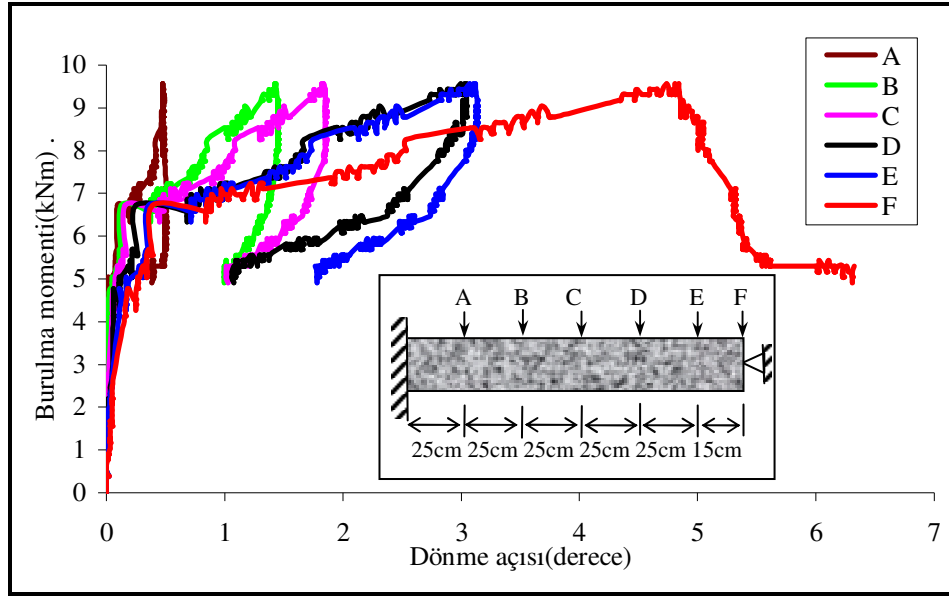
yüzlerinde kiriş eksenine sırasıyla yaklaşık, 45, 35, 40 ve 33 derecelik açılar yapmışlardır. Kiriş gövdesine doğru yayılan diğer çatlakların açısı yaklaşık 45 derecedir. T1B13 kirişi gibi yük uygulanan ucuna yakın bir bölgeden çatlayan T2B13 kirişinin, alt ve üst yüzündeki belirgin çatlaklar sırasıyla yaklaşık 47 ve 41 derecelik açıya sahiptirler. Kirişin birinci ve ikinci yan yüzlerindeki çatlaklar kiriş yüzeyine yaklaşık 50 derecelik açı ile yayılmışlardır. Kirişin ikinci yan yüzündeki en belirgin çatlağın kiriş eksenine ile yapmış olduğu açı yaklaşık 57 derecedir. Birinci yan yüzde oluşan en belirgin çatlağın açısı ise yaklaşık 70 derecedir.



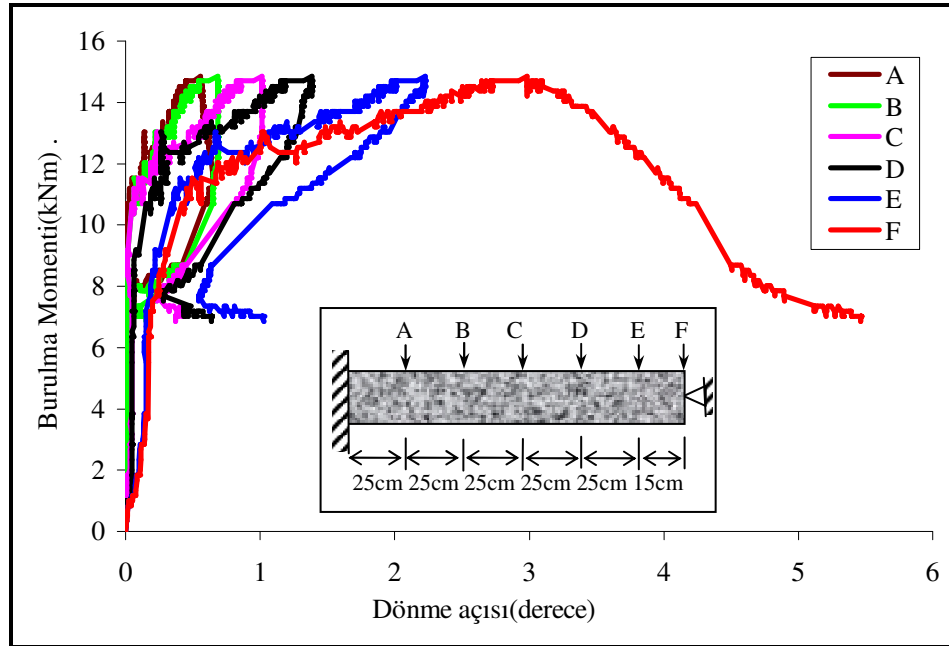
Şekil 91. T2B13 kirişinin deney sonrası çatlakları

Burulma momenti-dönme açısı ilişkileri T1B13 ve T2B13 kirişleri için sırasıyla Şekil 92 ve Şekil 93 'de verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi, maksimum burulma momentinde T1B13 kirişinin A, B, C, D, E ve F enkesitlerindeki dönme açıları sırasıyla, 0.48, 1.44, 1.83, 3.05, 3.12 ve 4.84 derece iken T2B3 kirişindekiler sırasıyla, 0.56, 0.68, 1.01, 1.39, 2.23 ve 2.98 derecedir. T1B13 kirişlerinin bu enkesitleri nihai burulma momenti altında sırasıyla 0.40, 1,01, 1.11, 1.11, 1.84 ve 6.29 derece dönerken T2B13 kirişinin enkesitleri sırasıyla, 0.05, 0.17, 0.37, 0.64, 1.03 ve 5.46 derece dönmüşlerdir. Burada da her iki kirişin F enkesiti civarında mafsallaşmasıyla taşıma gücünü kaybettiği görülmüştür.





Şekil 92. T1B13 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

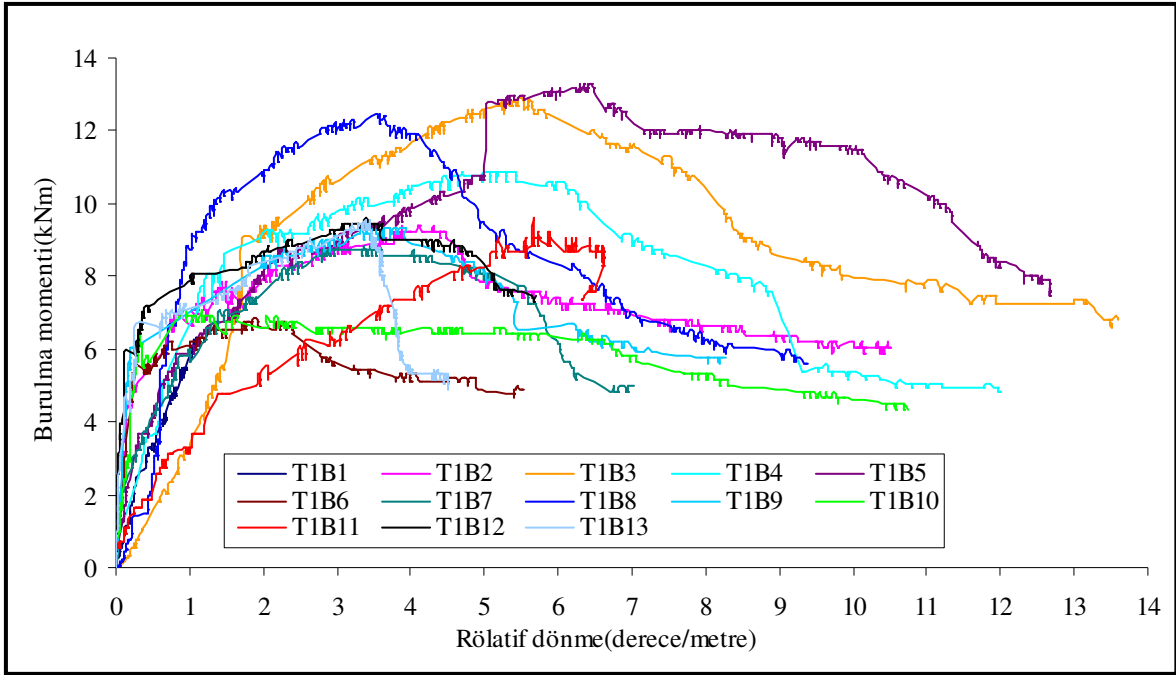


Şekil 93. T2B13 kirişindeki burulma momenti ile dönme açısının değişimi

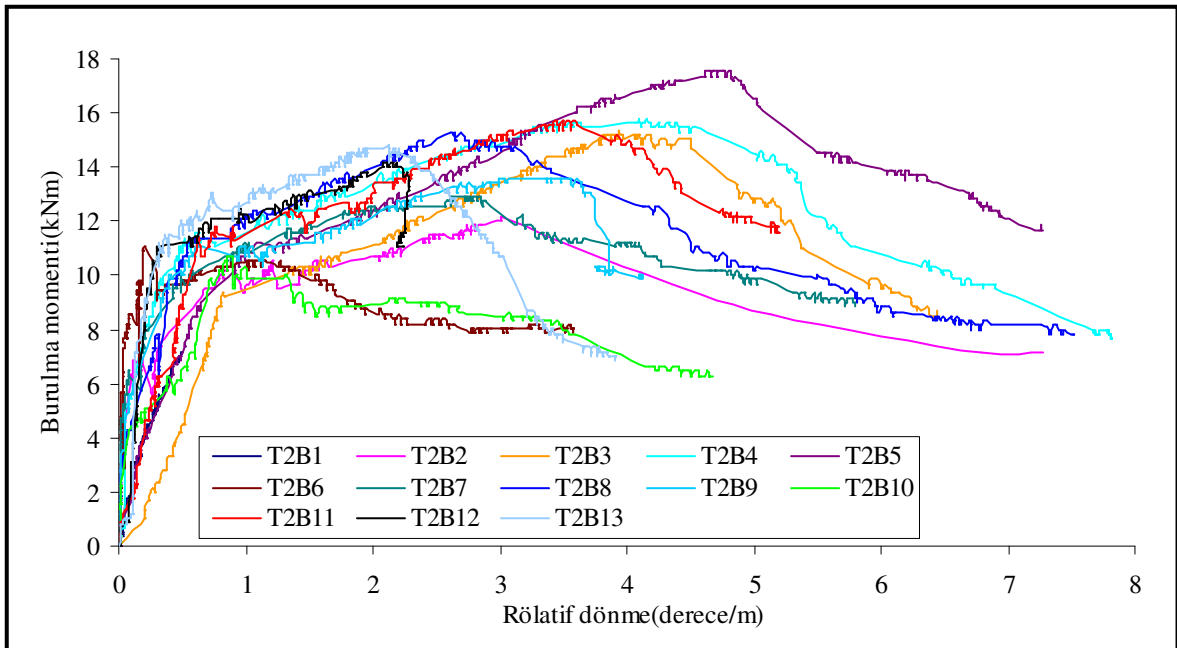
Özetle, farklı donatı düzenlemesi yapılarak üretilen deney numuneleri üzerinde gerçekleştirilen basit burulma deneyleri sonucunda, elde edilen kırılma şekillerinden ve burulma momenti dönme açısı ilişkilerinden, asal çekme donatısı ve enine donatı kullanılmış olan numunelerin kırılmaları, enkesit yüksekliğinin artırılmasıyla, kiriş

uzunluğu orta enkesitlerinde oluşan kırılma, daha az dönme yaparak, yük uygulanan enkesite doğru yaklaşarak gerçekleşmiştir. Aynı donatı düzenlerine sahip ancak gövde donatısı ilave edilen kirişlerde ise, kırılma yine diğer gövde donatısız kirişlerin davranışı ile aynı olmakla birlikte, enkesit boyutunun artmasıyla oluşan çatlak dağılımı tüm kiriş boyunca daha belirgin bir şekilde yayılmıştır. Enine ve boyuna donatılarına ek olarak çeşitli konumlarda yan yüzlere yerleştirilen diyagonal donatıya sahip kirişlerdeki kırılmalar, T1B7 kirişi hariç, kiriş orta noktası ile yük uygulanan enkesit arasında gerçekleşmiştir. T1B7 kirişi ise kiriş orta noktasına yakın bir yerden mafsallaşarak taşıma gücünü kaybetmiştir. Kiriş eksenine 45 derecelik açı yapacak şekilde bir doğrultuda diyagonal şeklinde düzenlenen T1B6 ve T2B6 kirişleri donatısız kirişin davranışına benzer bir davranış göstermekle birlikte, T1B6 kirişlerinde kırılma kiriş orta noktasında yakın bir yerde oluşmuştur. Enine ve boyuna donatısına ek olarak, farklı konumlarda en enkesit içine yerleştirilen diyagonal donatılarla üretilen (B11, B12, B13 kirişleri) kirişlerde kırılma, yük uygulanan enkesite yakın yerde oluşmuştur. Enkesit boyutlarının artması kirişlerin, dönme açısını azaltarak daha rijit davranmasını sağlamıştır. Kiriş enkesitinde hacimsel donatı kullanmak, taşınan burulma momenti bakımından büyük bir azalma olmadan, dönme açılarını sınırlandırarak kirişlerin daha rijit bir davranış göstermesini sağlamıştır.

Farklı şekilde donatılmış yüksek performanslı betonarme kirişlerin basit burulma momenti etkisindeki davranışlarının araştırılması için gerçekleştirilen bu çalışmada, deneye tabi tutulan kirişlere ait burulma momenti-rölatif dönme ilişkileri belirlenerek T1 serisi kirişler için Şekil 94 'de, T2 serisi kirişler için Şekil 95 'de verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü gibi, üç kısımdan oluşan burulma momenti-rölatif dönme açısı eğrilerinin betonun çatlamaya kadar olan birinci kısmında küçük dönme açılara karşılık olarak büyük burulma momenti taşınmaktadır. Beton çatladıktan sonra oluşan eğrinin ikinci kısmındaki davranış donatı davranışına bağlı olarak gelişmekte ve rijitlikte büyük azalma meydana gelmektedir. Eğrinin üçüncü kısmında enkesit mafsallaşarak büyük dönme açısıyla taşıma gücünü kaybetmektedir. Teknik literatürde [1,2], geleneksel betonlar için burulma etkisindeki bir elemanda, çatlama anına kadar, donatı etkisinin ihmal edilebilir bir düzeyde olduğu belirtilmektedir. Ancak, yüksek performanslı betonarme kirişler üzerinde yapılan deneylerden görüldüğü gibi her iki seride de (T1 ve T2) çatlamaya kadar, beton davranışı yanında donatı davranışının da ihmal edilemeyecek düzeyde olduğu görülmüştür.



Şekil 94. T1 seri kirişlerinin burulma momenti-rölatif dönme ilişkisi



Şekil 95. T2 seri kirişlerinin burulma momenti-rölatif dönme ilişkisi

Burulma momenti-rölatif dönme eğrilerinin, çatlama öncesi rijitliklerine ve çatlama sonrası rijitliklerine karşılık gelen, eğimleri hesaplanarak Çizelge 12 'de çatlama sonrası rijitliğin çatlama öncesi rijitliğe oranıyla birlikte verilmiştir.

Çizelge 12. Çatlama öncesi ve çatlama sonrası rijitlikler

Kirişler	T1 Serisi Kiriş Rijitlikleri (kNm <sup>2</sup> /derece)			T2 Serisi Kiriş Rijitlikleri (kNm <sup>2</sup> /derece)		
	Çatlama öncesi (R <sub>0</sub> )	Çatlama sonrası (R <sub>1</sub> )	Oran (R <sub>1</sub> /R <sub>0</sub> )	Çatlama öncesi (R <sub>0</sub> )	Çatlama sonrası (R <sub>1</sub> )	Oran (R <sub>1</sub> /R <sub>0</sub> )
B1	5,71	-	0,00	15,56	-	0,00
B2	5,28	0,61	0,12	13,1	1,07	0,08
B3	4,22	1,02	0,24	11,48	2,08	0,18
B4	6,485	0,69	0,11	18,94	1,62	0,09
B5	4,61	0,89	0,19	12,44	2,07	0,17
B6	22,68	0,81	0,04	42,42	1,87	0,04
B7	6,11	0,95	0,16	20,12	1,72	0,09
B8	8,38	1,42	0,17	20,08	2,02	0,10
B9	27,54	1,05	0,04	18,72	1,15	0,06
B10	19,84	1,89	0,10	49,73	8,19	0,16
B11	3,63	1,07	0,29	14,70	1,88	0,13
B12	17,76	0,79	0,04	39,25	1,69	0,04
B13	21,30	0,99	0,05	35,76	2,04	0,06

Bu çizelgeden görüldüğü gibi donatısız T1B1 ve T2B1 kirişlerinin kırılmaya kadar hesaplanan rijitlikleri sırasıyla 5.71 kNm<sup>2</sup>/derece ve 15.56 kNm<sup>2</sup>/ derecedir. Asal çekme donatısına ek olarak 150 mm enine donatı aralığına sahip B2 kirişlerindeki çatlama öncesi burulma rijitlikleri, enine donatı aralığı 100 mm olan B3 kirişlerinin çatlama öncesi burulma rijitliğinden daha büyük iken, çatlama sonrası rijitlikleri daha küçük olmuştur.

Asal çekme donatısına ilaveten, 150 mm enine donatı aralığına ve gövde donatısına sahip B4 kirişlerinin çatlama öncesi ve çatlama sonrası rijitlikleri aynı enine donatı aralığına sahip ancak gövde donatısı olmayan B2 kirişlerinin çatlama öncesi ve çatlama sonrası rijitliklerinden daha büyüktür. Enine donatı aralığı 100 mm olan gövde donatılı B5 kirişlerinin her iki burulma rijitliği de 100 mm enine donatı aralığına sahip ancak gövde donatısı bulunmayan kirişlerin burulma rijitliklerinden büyüktür. Sadece enine donatıları arasındaki mesafeleri farklı olan gövde donatılı B4 ve B5 kirişlerinde, 100 mm enine donatı aralığına sahip betonarme B5 kirişlerinin çatlama öncesi ve çatlama sonrası rijitlikleri betonarme B4 kirişlerinininkinden küçüktür. Buradan da enine donatı sıklaştırmasının çatlama kadar burulma rijitliğini azalttığı dolayısıyla da, kirişin burulma momenti altında

daha sünek davranış göstermesine neden olduğu, çatlama sonrası ise burulma rijitliklerinde artış sağladığı görülmüştür. Eşit enine donatı aralığına sahip betonarme kirişlerde gövde donatısı kullanımı çatlama öncesi ve çatlama sonrasında burulma rijitliklerini artırmıştır.

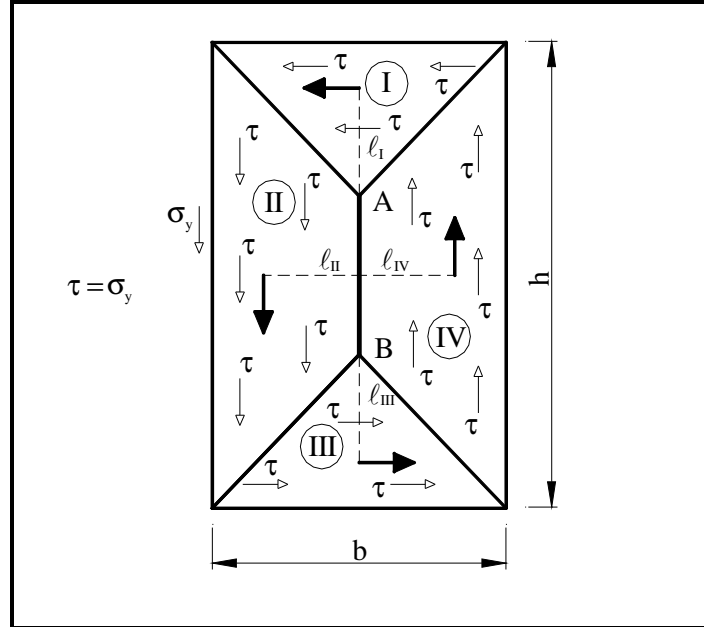
Burulma deneyine tabi tutulan T1 serisi B6, B9, B10, B12 ve B13 kirişlerinin ve T2 serisi B6, B10, B12 ve B13 kirişlerinin çatlama kadar olan burulma rijitlikleri diğer kirişlerinkine göre oldukça büyüktür. Diğer bir değişle daha rijit davranış göstermişlerdir. Bunun nedeni bu kirişlerin diğerlerine göre asal donatıları hariç enine donatılarının farklı şekilde düzenlenmesinden kaynaklanmaktadır. Burada T1 serisi B9 kirişindeki burulma rijitliği diğerlerine büyük iken, T2 serisi B9 kirişlerinde bu davranış diğer kirişlerin davranışına benzer olmuştur. Bu davranış farklılığı bu donatı düzeninde en kesit boyutunun önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Kiriş enkesiti içinde enine donatı ile birlikte iki yönde diyagonal donatı kullanılarak oluşturulan (bkz. Çizelge 8) B11 kirişinin davranışı ise her iki seride de diğer farklı donatılı kirişlerinkine göre oldukça sünek olmuştur.

Deney kirişlerinde çatlama sonrası elde edilen rijitliğin, çatlama öncesi rijitliğe oranı teknik literatürde geleneksel betonlar için, 1/10 ile 1/30 arasında olduğu belirtilmektedir [1]. Bu çalışma kapsamında, yüksek performanslı betonlar için elde edilen bu oranlar ise, donatı düzenine bağlı olarak, yaklaşık 1/3 ile 1/30 arasında değişmiştir (bkz Çizelge 12).

### **3.2. Burulma Momentinin Tahmini**

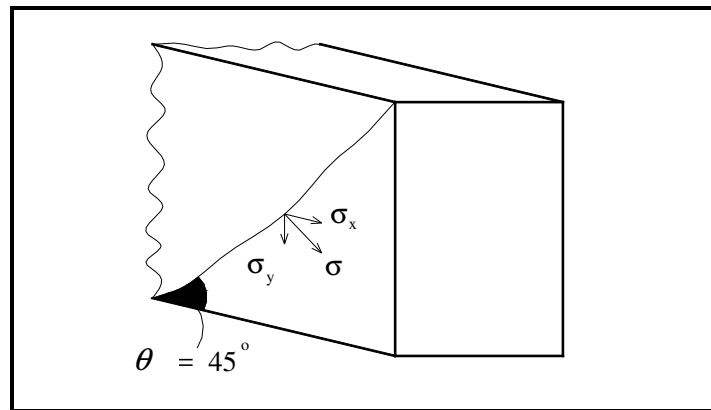
Bu çalışma kapsamında basit burulma momenti altında beton kirişlerin kırılma momenti ve betonarme kirişlerin maksimum momentlerinin tahmini için bir yöntem geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla kiriş kesitindeki gerilme dağılımının plastisite teorisindeki gibi kiriş kesiti içersinde homojen yayıldığı kabul edilmiştir (Şekil 96). Basit burulma momenti altında beton kirişlerin yan yüzlerindeki şekildeğiştirme oranının yaklaşık olarak 0.0001 değerine ulaşınca kırıldığı, kabul edilmiştir. Gerçekten de burulma deneyleri esnasında donatısız T1B1 kirişlerinin yan yüzlerindeki birim uzama ve birim kısalma değerleri sırasıyla  $9.5 \times 10^{-5}$  ve  $8.5 \times 10^{-5}$ , T2B1 kirişlerinkiler ise sırasıyla  $9.2 \times 10^{-5}$  ve  $9.9 \times 10^{-5}$  olarak elde edilmiştir (bkz. Şekil 43). Burulma deneylerinde kiriş yüzeylerinde oluşan çatlakların genelde kiriş eksenine ile yaklaşık olarak 45 derecelik açı yaptığı deney sonuçlarına bağlı olarak kabul edilmiştir.

Bu kabullere bağı olarak burulma etkisindeki kirişlerin teorik kırılma momentlerinin hesaplanmasında, uygulamada da yaygın olarak kullanılan ve/ya da kullanılabilirliği olan her iki serideki B1 kirişleri dikkate alınmıştır.



Şekil 96. Plastikite teorisine göre dikdörtgen bir kesitteki gerilme bölgeleri, ve bu bölgelerdeki toplam gerilmelerin AB doğrusuna uzaklıkları

Teorik olarak burulma esnasında kiriş yüzündeki asal gerilmeler, kiriş yüzeyinde oluşan çatlaklara dik olduğu kabul edilmektedir [1]. Bu asal gerilmeler x ve y bileşenlerine ayrılarak  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma \cos(45^\circ)$  eşitliği elde edilmektedir (Şekil 97).



Şekil 97. Kiriş yüzlerindeki çatlak oluşumları ve gerilme yönleri

Bu durumda x ve y yönündeki şekildeğiştirmeler birbirine eşit olurlar ( $\varepsilon_x = \varepsilon_y$ ). Kesit kenarında kesitin uzun kenarı doğrultusundaki gerilme ile kiriş yüzündeki  $\sigma_y$  gerilmesi birbirinin aynıdır. Dolayısıyla burulma momentinden dolayı oluşan ve kesit içersinde düzgün şekilde dağılmış olan  $\tau$  gerilmesi kiriş yan yüzündeki  $\sigma_y$  gerilmesi ile birbirinin aynıdır.

Yüksek performanslı betonarme kiriş kesitindeki gerilme, daha önce yapılan bir çalışmadan elde edilen değiştirilmiş Hognestad modeli kullanılarak hesaplanmıştır [111, 112]. Bu modelde;  $42\text{MPa} \leq f_{ck} \leq 110\text{MPa}$  için;  $k = 2 - \left(\frac{f_{ck} - 40}{70}\right)$ ,  $f_{ck} > 110\text{MPa}$  için  $k = 1.1$  ve  $\varepsilon_{co} = (2.2 + 0.015(f_{ck} - 40))10^{-3}$  olmak üzere beton içersindeki gerilme,

$$\sigma_c = f_{ck} \left( k \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - (k - 1) \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right) \quad (48)$$

olarak verilmiştir. Bu bağıntıda gerilmenin belirlenmesi için, betonun birim şekildeğiştirmesi,

$$\varepsilon_c = \frac{1.4 \times 10^{-4} f_{ck}}{(f_{ck} + 40)} \quad (60\text{MPa} \leq f_{ck} \leq 94\text{MPa}) \quad (49)$$

olarak dikkate alınmıştır. Burulma momenti altında çatlama momentinin tahmini için, çatlama anındaki şekildeğiştirmelere bağlı olarak hesaplanan, beton kesitindeki gerilmelerin, dört bölgeye ayrılmış olan kiriş kesitini AB doğrusu etrafında döndürmeye çalıştığı düşünülmüştür (bkz. Şekil 96). Bu durumda, her bir bölgedeki gerilmelerin oluşturduğu bileşke kuvvetin AB doğrusuna en yakın uzaklıkla çarpımı o bölgenin taşıyabileceği burulma momentine karşılık gelmektedir. Tüm kesitin taşıdığı burulma momenti ise her bir bölgenin taşıdığı burulma momentlerinin toplamına eşittir. Başka bir ifade ile,  $A_i$ ;  $i$  bölgesinin alanını,  $\sigma_c = \tau$ ; kesitteki sabit gerilmeyi,  $l_i$ ;  $i$  bölgesinin ağırlık merkezinin AB doğrusuna en kısa uzaklığını göstermek üzere kesitin taşıdığı toplam burulma momenti;

$$T_C = \tau \sum A_i l_i = A_I \tau l_I + A_{II} \tau l_{II} + A_{III} \tau l_{III} + A_{IV} \tau l_{IV} \quad (50)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Beton bir kesitin kırılma momentini gösteren bu bağıntı kesit boyutları cinsinden yazılırsa,

$$T_c = \tau \frac{b^3 + 3hb^2}{12} \quad (51)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntı, 49 bağıntısıyla tanımlanan şekildeğiştirme düzeyine kadar geçerlidir.

Bu çalışma kapsamında yüksek performanslı betonarme kirişlerin taşıyabileceği burulma momentini daha iyi tahmin edilebilmek için mevcut yaklaşımlar [27, 92] üzerinde çalışmalar da yapılmıştır. Burulma momenti etkisinde kiriş yüzeyinde oluşan çatlamayla birlikte burulma momentinin bu noktadan sonra tamamen donatıyla taşındığı, kiriş yüzeyinde oluşan çatlakların kiriş eksenine yaklaşık 45 derecelik açılar yaptığı, betonarme eleman taşıma gücünü kaybetmeden önce boyuna ve enine donatının aktığı, kabul edilmektedir (Şekil 98). Betonarme kirişte  $c$ ; beton örtü kalınlığını,  $x = b - 2c$  ve  $y = h - 2c$  göstermek üzere kirişin her bir yan yüzünde kırılma çatlaklarını kesen enine donatı kolu sayısı  $n_{1,yan,2,yan} = y/s$  kadar, kirişin alt ve üst yüzlerinin her birinde kırılma çatlaklarını kesen enine donatı sayısı ise,  $n_{alt,üst} = x/s$  kadar olmaktadır. Her yüzde kırılma çatlaklarını kesen enine donatılarla taşınan kuvvetin, enine donatının dönme eksenine olan uzaklığıyla çarpımı betonarme kirişteki enine donatının taşıdığı burulma momentidir ve

$$T_i = \frac{2xy A_t f_{yt}}{s} \quad (52)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır [92].

Betonarme kirişte boyuna donatının kırılma çatlaklarına dik olarak taşıdığı kuvvet;

$$F_l = k A_t f_{yt} \quad (53)$$

bağıntısıyla, bu donatı tarafından taşınan burulma momenti,  $n$ ; boyuna donatı sayısını,  $l_i$ ; donatının kiriş dönme eksenine uzaklığını,  $\theta$  kırılma çatlaklarının kiriş eksenine ile yapmış olduğu açığı göstermek üzere;



$$T_l = \sum_{i=1}^n A_{l(i)} f_{yl(i)} l_{(i)} k \cos(\theta) \quad (54)$$

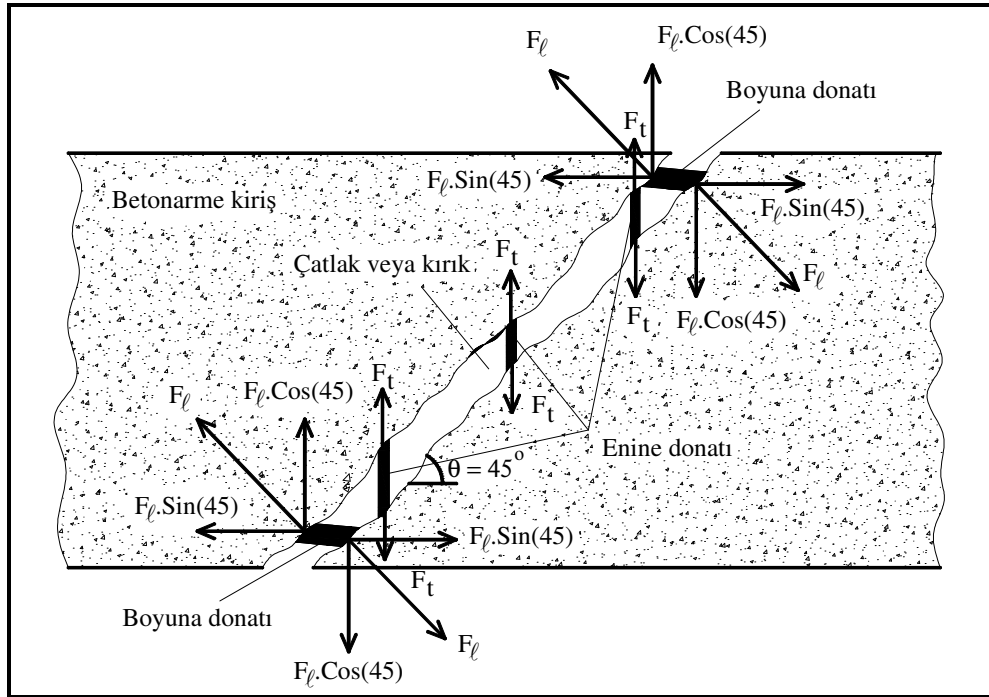
bağıntısıyla belirlenebilmektedir. Bu bağıntılardaki k sayısı, etriye aralığına (s), boyuna donatıların çaplarına ( $D_{l(i)}$ ) ve akma dayanımlarına ( $f_{yl(i)}$ ) bağlı olarak;

$$k = 6.8510^{-3} s + 1.2510^{-6} \sum_{i=1}^n D_{l(i)} f_{yl(i)} \quad (55)$$

bağıntısıyla hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada  $\theta = 45$  derece alınmıştır. Betonarme kirişin taşıdığı toplam burulma momenti ise;

$$T = \frac{2xy A_t f_{yt}}{s} + \sum_{i=1}^k A_{l(i)} f_{yl(i)} l_{(i)} k \cos(\theta) \quad (56)$$

bağıntısıyla belirlenebilmektedir.



Şekil 98. Burulma çatlakındaki donatılarda oluşan kuvvet bileşenleri

Beton ve betonarme kirişlerin taşıyabilecekleri burulma momentinin tahmini için literatürde bir çok model ve bağıntı geliştirilmiştir. Bunlardan bazıları Çizelge 13 'de verilmiştir. Bu çalışma kapsamında belirlenen bağıntılarla (51 ve 56 nolu bağıntılar) ve literatürde burulma momentinin tahmini için verilen bağıntılarla T1 ve T2 serisi kirişlerinin B1, B2, B3, B4 ve B5 kirişleri için hesaplanan maksimum burulma momentleri Çizelge 14 'de verilmiştir.

Bu çizelgelerden görüldüğü gibi, yüksek performanslı beton kirişlerin kırılma anındaki burulma momentinin tahmini için elastik teori ile önerilen bağıntı, plastik teori ile önerilen bağıntıya göre deneylerden elde edilen burulma momenti değerlerine daha yakın sonuçlar vermiştir. Buda yüksek performanslı beton kirişlerin burulma deneyi esnasında plastik teoriden çok elastik teoriye yakın davranış gösterdiğini ortaya koymuştur. Yanal eğilme teorisi kullanılarak Hsu [24] tarafından önerilen bağıntılarla elde edilen moment değerleri elastisite ile plastisite teorisinden elde edilen değerlerin arasında kalmışlardır. Yanal eğilme teorisi kullanılarak önerilen denklemlerin birbirlerinden farklı olması betonun kırılma dayanımının ifadesindeki farklılıktan kaynaklanmıştır. Kafes benzeşimi teorisinde [27] ve TS500 [101] 'de önerilen bağıntılar ile hesaplanan burulma momenti değerleri ise diğerlerine göre deney sonuçlarından daha uzaktırlar.

Bu çalışma kapsamında betonarme kirişlerdeki burulma momentinin tahmini için önerilen bağıntıların deney sonuçlarına daha yakın olduğu görülmüştür. Betonarme kirişler için Rausch [92] ve Hsu [24] tarafından önerilen bağıntılarla hesaplanan burulma momentleri tüm kirişler için deney sonuçlarından farklı olduğu, ACI [11] ve Cowan [24] tarafından boyuna donatı dikkate alınmaksızın önerilen bağıntılarla hesaplanan burulma momentleri, yalnızca enine ve boyuna donatı kullanılarak üretilen T2B2 kirişleri için yaklaşık sonuçlar, diğer kirişler için ise oldukça farklı sonuçlar verdiği görülmüştür (bkz. Çizelge 14). Literatürde önerilen bağıntılardan, elde edilen sonuçlar deney sonuçlarından oldukça farklıdır. Bu da önerilen bağıntıların bu çalışma kapsamında üretilen yüksek performanslı betonarme kirişlerin burulma momenti için literatürde geleneksel betonlar için önerilen bağıntılardan daha iyi sonuç verdiğini göstermektedir.

Burulma deneylerine tabi tutulan diğer kirişlere ait burulma momentinin teorik hesabı uygulanabilirliğinin zor olması nedeniyle bu çalışma kapsamında verilmemiştir.

Çizelge 13. Beton ve betonarme kirişler için burulma momenti bağıntıları

Beton kirişler		Betonarme kirişler	
Öneren	Bağıntı	Öneren	Bağıntı
Elastik teori[16,24 ]	$T = \alpha(x^2 y)(6\sqrt{f_c'})$	Rausch [92]	$T = \frac{2A_t f_{yv} y_0 x_0}{s}$
Plastik teori[16,24 ]	$T = \left(0.5 - \frac{x}{6y}\right)(x^2 y)(6\sqrt{f_c'})$	Cowan [24]	$T = \alpha(5\sqrt{f_c'})x^2 y + 1.6 \frac{A_t f_{yv} y_0 x_0}{s}$
ACI 318-99 [27]	$T = 4\sqrt{f_c'} \frac{A_c^2}{P_c}$	Kafes Benzeşimi (ACI 318-99) [27]	$T = \sum_{i=1}^4 \frac{A_t f_{yv} y_0 x_0}{2s} \cot \theta_i$
TS500-2000 [101]	$T = (1.35)(0.35\sqrt{f_c'}) \left(\frac{b^2 h}{3}\right)$	Basınç Alanı T. (ACI 318-95) [18]	$T = \frac{2A_t f_{yv} y_0 x_0}{s} \sqrt{\frac{A_t f_{yl} s}{A_t f_{yv} P_h}}$
Hsu <sub>SB-1</sub> [24]	$T = \left(\frac{x^2 y}{3}\right)(0.85) \left(21 \left(1 + \frac{10}{x^2}\right) \sqrt[3]{f_c'}\right)$	ACI 318-89 [11]	$T = 0.8\sqrt{f_c'} x^2 y + \alpha_t A_t \frac{x_0 y_0}{s} f_{yv}, \alpha_t = 0.66 + 0.33 \frac{x_0}{y_0} \leq 1.5$
Hsu <sub>SB-2</sub> [24]	$T = \left(\frac{x^2 y}{3}\right)(0.85)(7.5\sqrt{f_c'})$	Yanal eğilme teorisi Hsu [16,24]	$T = 0.8\sqrt{f_c'} x^2 y + \alpha_t A_t \frac{x_0 y_0}{s} f_{yv}$
Hsu <sub>SB-3</sub> [24]	$T = 6(x^2 + 10)y \sqrt[3]{f_c'}$		$\alpha_t = \sqrt{m} \frac{f_{yl}}{f_{yv}} \left(1 + 0.2 \frac{y_0}{x_0}\right) \leq 1.6 \quad m = \frac{2 \bar{A}_t s}{2A_t (x_0 + y_0)}$
Bu çalışmada	$T = \tau \frac{b^3 + 3hb^2}{12}$	EuroCode-2 [100]	$T = 2(x_0 y_0) \sqrt{(A_t f_{yv} / s)} \sqrt{A_{sl} f_{yl} / (2(x_0 + y_0))}$
	$\tau = f_{ck} \left( k \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} - (k-1) \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} \right)^2 \right)$	Bu çalışmada	$T = \frac{2.x y A_t f_{yl}}{s} + \sum_{i=1}^n A_{l(i)} f_{yl(i)} l_{(i)} k \cos(\theta)$

Çizelge 14. B1, B2, B3, B4 ve B5 kirişleri için deneysel ve teorik burulma momenti değerleri(kNm)

Beton kirişler			Betonarme kirişler										
Öneren	T1B1	T2B1	Öneren	T1B2	T1B3	T1B4	T1B5	T2B2	T2B3	T2B4	T2B5		
Elastik teori[16,24]	5,33	6,69	Rausch[92]	6,65	9,97	6,65	9,97	8,31	12,47	8,31	12,47		
Plastik teori[16,24]	9,07	11,33	Cowan[24]	8,24	11,57	8,24	11,57	10,40	14,55	10,40	14,55		
ACI 318-99 [27]	4,72	6,04	Kafes Benzş.[27]	8,36	12,43	7,85	13,73	8,61	11,13	10,26	13,72		
TS500-2000 [101]	2,58	3,10	D.Basınç Alanı[18]	11,26	13,79	13,25	16,23	13,54	16,59	15,77	19,31		
Hsu <sub>SB-1</sub> [24]	8,03	9,63	ACI-89[11]	7,45	9,65	7,45	9,65	9,85	12,94	9,85	12,94		
Hsu <sub>SB-2</sub> [24]	6,29	7,55	Hsu[11]	5,23	5,72	5,62	6,20	6,40	7,02	6,89	7,61		
Hsu <sub>SB-3</sub> [24]	6,34	7,61	EuroCode-2[22]	5,88	7,20	6,92	8,47	6,41	7,85	7,46	9,14		
Bu çalışmada	Teorik	5,95	6,98	Bu çalışmada	Teorik	9,36	12,02	10,23	12,77	11,81	15,12	12,78	15,75
	Deneysel	6,32	7,19		Deneysel	9,36	12,80	10,85	13,31	12,19	15,36	15,80	17,53

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerden elde edilen sonuçlara bağlı olarak belirlenen burulma momenti bağıntısının (bağıntı 55), diğer araştırmacılar tarafından yapılan burulma deneyleri sonunda elde ettikleri sonuçlar için geçerli olup olmadığı araştırılmıştır. (Çizelge 15).

Çizelge 15. Bu çalışma kapsamında burulma momentinin tahmini için önerilen bağıntıların daha önce yapılmış olan deneysel çalışmalarla karşılaştırılması

Araştırmacılar	Deneylerden elde edilen ortalama burulma momenti $T_D$ (kNm)	Bu çalışmada verilen bağıntı (bağıntı 55) ile elde edilen burulma momenti $T_T$ (kNm)	$T_T / T_D$
Whang-Hsu[42]	46.58	53.03	1.14
Koutchoukali [48]	21.14	24.24	1.15
Rasmussen-Baker [36]	21.38	22.43	1.05

Bu çizelgeden görüldüğü gibi Whang ve Hsu [42], Koutchoukali [48] ve Rasmussen ve Baker [36]'in elde ettiğı deney sonuçlarının kullanılmasıyla bu çalışma kapsamında ortaya konulmuş olan bağıntı ile hesaplanan teorik burulma momenti arasında sırasıyla % 14, % 15 ve % 5 oranlarında farklılık bulunmaktadır. Bu fark eleman boyutu, donatı çap ve düzeninden kaynaklanabildiğı gibi, farklı araştırmacıların oluşturdukları farklı deney şartlarından da kaynaklanabilecek bir farklılıktır.

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın temel amacı, farklı şekilde donatılmış yüksek performanslı betonarme kirişlerin, basit burulma momenti etkisindeki davranışlarının incelenmesidir. Bu amaçla, çalışmanın birinci bölümünde, literatürde mevcut olan burulma etkisindeki beton ve betonarme kirişlerin burulma momenti etkisindeki davranışları hakkında genel bilgiler ve konu ile ilgili yapılmış olan bazı çalışmalar verilmiştir. İkinci bölümde çalışmanın amacı doğrultusunda yapılan deneysel çalışmalar anlatılmış, üçüncü bölümde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular karşılaştırmalı olarak değerlendirilerek, yüksek performanslı beton ve betonarme kirişlerin burulma dayanımlarının tahmini için önerilen bazı teorik bağıntılar irdelenmiştir.

Gerçekleştirilmiş olan deneysel ve teorik çalışmaların bütününden çıkarılan bazı sonuç ve öneriler aşağıda özetlenmiştir.

1) Bu çalışma kapsamında, basit burulma deney numuneleri için karakteristik basınç dayanımı yaklaşık 66 MPa olan yüksek performanslı beton kullanılmıştır.

2) Yüksek performanslı beton ile donatısız olarak üretilmiş her iki seri B1 kirişlerinde basit burulma momenti etkisiyle oluşan kırılma yüzeyi düzlem olmayıp geleneksel betonunki ile hemen hemen aynıdır(bkz Şekil 40).

3) Her iki serideki donatısız kirişlerin, yan yüzlerindeki birim uzama ve birim kısalma şekildeğişimleri mutlak değer olarak 0.0001 değerine ulaşmadan, aniden kırılmaları enkesit boyutlarındaki artışın, şekildeğişimler üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığını göstermiştir.

4) Yüksek performanslı beton ile üretilen geleneksel ve farklı donatı düzenine sahip iki seri on üç tip beton ve betonarme kirişlerden, gövde donatısı bulunan ve etriye sıklaştırması yapılan B5 kirişlerinde, her iki seride de (T1 ve T2) en büyük burulma momenti, ve en büyük dönme açısı elde edilmiştir.

5) Enkesit yüksekliği küçük olan ve enine donatı sıklaştırması yapılan kirişlerden elde edilen burulma momenti, etriye sıklaştırması yapılmamış ve gövde donatısı kullanılan kirişlerin burulma momentinden daha büyük olmuştur. Bu da, enkesit boyutları küçük olan betonarme kirişlerin burulma momenti taşıma kapasitesine etriye sıklaştırmasının katkısının, gövde donatısının katkısına göre daha fazla olduğunu göstermiştir. En kesit

yüksekliği daha büyük olan kirişlerde gövde donatısının burulma momenti taşıma kapasitesine katkısı daha fazla olmuştur.

6) Gövde donatılı kirişlerde enine donatı aralığının sıklaştırılmasıyla sağlanan burulma momentindeki artış, gövde donatısız kirişlerde enine donatı aralığının sıklaştırılmasıyla sağlanan burulma momenti artışından daha küçüktür. Bu da gövde donatısı, enine donatı ile taşınan burulma momentinin bir kısmını kendi taşıyarak enine donatıdaki gerilmeyi azalttığını düşündürmektedir. Pratik uygulama açısından gövde donatısı kullanımı enine donatı sıklaştırılmasına göre daha kolay olduğundan, basit burulma momenti yönünden, enine donatı aralığını çok küçük tutmak işçilik ve ekonomik açıdan beklenen ölçüde yarar sağlamayacağını göstermektedir.

7) Enine donatının kiriş eksenine ile 45 derece açı yapacak şekilde yerleştirilmesiyle (bkz. B6 kirişleri Çizelge 8), aynı etriye aralığına sahip geleneksel olarak donatılan kirişlerin (bkz. B2 kirişleri Çizelge 8), taşıdığı burulma momentinden daha az burulma momenti taşınmıştır. Bu nedenle B6 kirişlerinde kullanılan donatı düzeni burulma açısından etkili olmadığı için önerilmemektedir.

8) Kiriş yan yüzlerinde enine donatı arasına tek yönde diyagonal donatı yerleştirilerek üretilen deney numunelerinden elde edilen burulma momentlerinde beklenen artış gözlemlenmediğinden ve pratikte uygulanabilirliğinin zor olması nedeniyle, bu tür donatı düzeninin kullanması önerilmemektedir.

9) Kiriş yan yüzlerinde enine donatı arasına çift yönde diyagonal donatı yerleştirmeye B2 kirişlerine göre T1 serisinde 0.33, T2 serisinde 0.25 kat daha fazla burulma momenti taşınmıştır. Ancak taşınan bu burulma momenti değeri sık enine donatısına sahip gövde donatılı B5 kirişlerinininkinden küçük olmuştur. Dolayısıyla da bu tür donatı düzeni pratikte de uygulanabilirliğinin zorluğu nedeniyle önerilmemektedir.

10) Yüksek performanslı betonarme B9 kirişleriyle taşınan burulma momenti, B3, B4, B5 kirişleriyle taşınan burulma momenti değerinden daha küçüktür. Diğerlerine göre yeterli burulma momenti taşıma gücüne sahip olmayan bu donatı düzeninin kullanılmasının yararlı olmayacağı düşünülmektedir.

11) Dikdörtgen diyagonal şeklinde, düşey etriye kullanılmadan, enine donatısı düzenlenmiş olan B10 kirişleri(bkz. Çizelge 8), diğer tüm betonarme kirişlerden daha az burulma momenti taşımışlardır. Bu tür donatıya sahip kirişlerin kullanılmasının burulma momenti açısından pratik bir yararı bulunmamaktadır.

12) Enine donatı enkesitleri içine ve arasına, iki doğrultuda diyagonal donatı düzenlemesi ile oluşturulan B11, B12 ve B13 kirişlerinin taşıdıkları burulma momenti birbirlerine oldukça yakındır. Bu donatı düzenlerinden pratik olarak en kolay uygulanabilir olan B11 kirişlerindeki donatı düzeniyle birlikte, enine donatı sıklaştırması ve gövde donatısının da kullanılması durumunda, B5 kirişlerinin taşıdığı burulma momentlerinden, daha büyük bir burulma momentinin taşınabileceği düşünülmektedir.

13) Enkesit yüksekliği daha büyük olan kirişler(T2 serisi), maksimum burulma momentine daha küçük dönme açısı yaparak ulaşmışlardır. Ancak betonarme kirişlerin maksimum burulma momentindeki dönme açılarının aynı serideki donatısız kirişin dönme açılarına oranı T2 serisi kirişlerde, T1 serisi kirişlerinkinden daha büyüktür(bkz. Şekil 36). Bu da burulma momentine karşı enkesit boyutunun önemini ortaya koymaktadır. Zira, küçük dönmelere karşı daha büyük burulma momenti taşınabilmektedir. Ayrıca, dönme açısı bakımından, T2 serisindeki kirişlerin T1 serisindeki kirişleriyle benzer davranışı göstermemesi, kiriş enkesit yüksekliğinin T1 serisine göre daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla da, burulma donatısı tipi seçiminin enkesit boyutlarından bağımsız olamayacağı görülmüştür. (bkz. Şekil 37- Şekil 38).

14) Yüksek performanslı betonarme deney kirişlerinin maksimum burulma momentinden sonra ortalama % 40 'lık bir dayanım kaybı ile nihai burulma momentine ulaştığı, bu değerden sonra burulma momenti yaklaşık sabit kalarak, büyük miktarda dönme yaparak taşıma gücünü kaybettiği görülmüştür(bkz. Şekil 39).

15) Asal çekme donatısı ve enine donatı kullanılmış olan numunelerin kırılmaları, enkesit yüksekliğinin artmasıyla, kirişin daha az dönme yaparak, yük uygulanan enkesite doğru yaklaşmıştır. Aynı donatı düzenlerine sahip ancak gövde donatısı ilave edilen kirişlerde ise, kırılma yine diğer gövde donatısız kirişlerin davranışı ile aynı olmakla birlikte, enkesit boyutunun artmasıyla oluşan çatlak dağılımı tüm kiriş boyunca daha belirgin bir şekilde yayılmıştır. Enine donatı ve boyuna donatılarına ek olarak çeşitli konumlarda yan yüzlere yerleştirilen diyagonal donatıya sahip kirişlerdeki kırılmalar, T1B7 kirişi hariç, kiriş orta noktası ile yük uygulanan enkesit arasında gerçekleşmiştir. T1B7 kirişi ise kiriş orta noktasına yakın bir yerden mafsallaşarak taşıma gücünü kaybetmiştir. Kiriş eksenine 45 derecelik açı yapacak şekilde bir doğrultuda diyagonal şeklinde düzenlenen T1B6 ve T2B6 kirişleri donatısız kirişin davranışına benzer bir davranış göstermekle birlikte, T1B6 kirişlerinde kırılma kiriş orta noktasında yakın bir yerde oluşmuştur. Enine ve boyuna donatısına ek olarak, farklı konumlarda enkesit içine



yerleştirilen diyagonal donatılarla üretilen(B11, B12, B13 kirişleri) kirişlerde kırılma, yük uygulanan enkesite yakın yerde meydana gelmiştir. Enkesit boyutlarının artması kirişlerin, dönme açısını azaltarak daha rijit davranmasını sağlamıştır. Kiriş enkesitinde hacimsel donatı kullanmak, taşınan burulma momenti bakımından büyük bir azalma olmadan, dönme açılarını sınırlandırmış dolayısıyla da kirişlerin daha rijit bir davranış göstermesine neden olmuştur.

16) Teknik literatürde[1,2], geleneksel betonlar için burulma etkisindeki bir elemanda, çatlama anına kadar, donatı etkisinin ihmal edilebilir bir düzeyde olduğu belirtilmektedir. Ancak, yüksek performanslı betonarme kirişler üzerinde yapılan deneylerden, çatlamaya kadar, beton davranışı yanında donatı davranışının da ihmal edilemeyecek düzeyde olduğu görülmüştür.

17) Enine donatı sıklaştırmasının çatlamaya kadar burulma rijitliğini azalttığı dolayısıyla da, kirişin burulma momenti altında daha sünek davranış göstermesine neden olduğu, çatlama sonrası ise burulma rijitliklerinde artış sağladığı görülmüştür. Eşit enine donatı aralığına sahip betonarme kirişlerde gövde donatısı kullanımı çatlama öncesi ve çatlama sonrasında burulma rijitliklerini artırmıştır.

18) Burulma deneyine tabi tutulan T1 serisi B6, B9, B10, B12 ve B13 kirişlerinin ve T2 serisi B6, B10, B12 ve B13 kirişlerinin çatlamaya kadar olan burulma rijitlikleri diğer kirişlerinkine göre oldukça büyüktür. Diğer bir deyişle daha rijit davranış göstermişlerdir. Bunun nedeni bu kirişlerin diğerlerine göre asal donatıları hariç enine donatılarının farklı şekilde düzenlenmesinden kaynaklanmaktadır. Burada T1 serisi B9 kirişindeki burulma rijitliği diğerlerine göre daha büyük iken, T2 serisi B9 kirişlerinde bu davranış diğer kirişlerin davranışına benzer olmuştur. Bu davranış farklılığı bu donatı düzeninde en kesit boyutunun önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

19) Kiriş enkesiti içinde enine donatı ile birlikte iki yönde diyagonal donatı kullanılarak oluşturulan(bkz. Çizelge 8) B11 kirişinin davranışı, her iki seride de diğer farklı donatılı kirişlerinkine göre oldukça sünek olmuştur.

20) Deney kirişlerinde çatlama sonrası elde edilen rijitliğin, çatlama öncesi rijitliğe oranı teknik literatürde geleneksel betonlar için, 1/10 ile 1/30 arasında olduğu belirtilmektedir[1]. Bu çalışma kapsamında, yüksek performanslı betonlar için elde edilen bu oranlar ise, donatı düzenine bağlı olarak, yaklaşık 1/3 ile 1/30 arasında değişmiştir(bkz Çizelge 12).

21) Yüksek performanslı beton kirişlerin kırılma anındaki burulma momentinin tahmini için elastik teoride önerilen bağıntı, plastik teoride önerilen bağıntıya göre deneylerden elde edilen burulma momenti değerlerine daha yakın sonuçlar vermiştir. Buda yüksek performanslı beton kirişlerin burulma deneyi esnasında plastik teoriden çok elastik teoriye yakın davranış gösterdiğini ortaya koymuştur.

22) Bu çalışma kapsamında beton ve betonarme kirişlerdeki burulma momentinin tahmini için önerilen bağıntıların deneysel sonuçlara daha önce literatürde verilmiş olan bağıntılar ile kıyaslanabilecek düzeyde hatta bazen daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu da önerilen bağıntıların bu çalışma kapsamında üretilen yüksek performanslı betonarme kirişlerin burulma momentini için oldukça iyi sonuçlar verdiği, görülmüştür.

23) Betonarme kirişlerin taşıyabileceği burulma momentinin tahmini için EuroCode-2 'de önerilen bağıntıların emniyetli tarafta kaldığı, TS 500-2000 ise betonarme kirişlerin taşıyabileceği burulma momentini için herhangi bir bağıntının önerilmediği görülmüştür.

Özetle bu çalışmada, farklı enine ve boyuna donatı düzeni kullanılarak basit burulma momentini etkisinde denenen yüksek performanslı betonarme kirişlerin davranışları incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara bağlı olarak yüksek performanslı beton ve betonarme kirişlerin burulma momentlerinin tahmini için, bağıntılar önerilmiştir. Önerilen bağıntılar literatürde verilmiş bağıntılarla karşılaştırılmalı olarak irdelenmiştir. Literatürde verilen söz konusu bağıntıların hemen hepsi geleneksel beton ve betonarme kesitler için çıkarılmış bağıntılardır. Bu bağıntıların yüksek performanslı beton ve betonarme kesitler için geçerli olmadığı görülmüştür. Burulma momentinin etkin olduğu mühendislik yapılarında burulmadan kaynaklanan hasarın önlenmesi için, farklı enkesit boyutlarında ve farklı enine ve boyuna donatı oranları kullanılarak çok sayıda deney numuneleri üzerinde bu tür çalışmaların yapılmasıyla yüksek performanslı betonlar için daha genel burulma momentini bağıntılarının verilmesi gerekmektedir. Ayrıca yönetmeliklerde verilen burulma ile ilgili koşullar deney sonuçlarına bağlı olarak revize edilmelidir.

## 5. KAYNAKLAR

1. Ersoy, U., Betonarme Temel İlkeler ve Taşıma Gücü, 1. Cilt, Evrim Yayınevi, İstanbul, 1986.
2. Celep, Z., Kumbasar, N., Betonarme Yapılar, 2. Baskı, Sema Matbaacılık, İstanbul, 1998.
3. Mailer Y., Yüksek Performanslı Beton, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 2. Ulusal Kongresi, Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 15-22.
4. Wilby, C.B., Concrete Materials and Structures, Revised Edition, Cambridge University, Cambridge, 1991.
5. ACI Comitte 363, State of Art Report on High Strength Concrete, ACI Journal, (1984) 364-410.
6. Üzümeri,Ş.M., Özden Ş., Yüksek Dayanımlı Betonun İnşaatta Kullanımı Konusunda Standartlar ve Yönetmeliklerdeki Gelişmeler, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 2. Ulusal Beton Kongresi, Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 159-182.
7. Nilson, A.H., Design Implications of Current Research on High Strength Concrete, High Strength Concrete ACI Journal, SP-87, (1985) 85-118.
8. Swamy, R.N., High Strength Concrete-Material Properties and Structural Behaviour, High Strength Concrete ACI Journal, SP-87, (1985) 119-146
9. CEB-FIB (MC90), Model Code for Concrete Structures, Commite Euro-International du Beton, Bulletin d'Information, Lausanne, 1990.
10. TS 500, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, TSE, Ankara, Nisan 1984.
11. ACI 318-89, Bulding Code Requirements for Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Detroit, 1989.
12. Pul, S., Doğu Karadeniz Bölümü Agregalarıyla Yüksek Performanslı Beton Üretimi ve Özelliklerinin Diğer Betonlarla Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1999.
13. Öztekin E., Basit Eğilme Etkisinde Yüksek Performanslı Betonarme Kiriş Hesabı için Gerilme-Şekildeğiştirme ve Eşdeğer Gerilme Dağılım Modellerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2000.
14. Pul, S., Hüsem, M., Öztekin E., Eğilme Etkisindeki Yüksek Performanslı Betonarme Kesitlerde Gerilme Bloğu Parametreleri, S.A.U. Fen Bilimleri Dergisi, 6, 3 (2002) 128-134.

15. Kayan, İ., Cisimlerin Mukavemeti, 2. Baskı, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul 1992.
16. Ersoy, U., Betonarmede Burulma, Güven Kitabevi, Ankara, 1975.
17. Ersoy, U., Betonarme Temel İlkeler TS500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine(1998) Göre Hesap, Evrim Yayınevi, İstanbul, 2001.
18. Mitchell, D., The Behaviour of Structural Concrete Beams in Pure Torsion, Phd. Thesis., University of Toronto, Toronto, 1974.
19. Doğangün A, Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2007.
20. Little, R.M., Elasticity, Prentice-Hall, New jersey 1973.
21. Timoshenko, S., Goodier, J.N., Elastisite Teorisi, Arı Kitabevi, İstanbul 1969.
22. Popov, E.P., Engineering Mechanics of Solids, Prentice-Hall, New jersey 1990.
23. Calladine, C.R., M.A.,S.M., Engineering Plasticity, Pergamon Press, London, 1969.
24. Zhang, Y., Torsion in High Strength Concrete Rectangular Beams, Msc. Thesis, University of Nevada, Reno, 2002.
25. Hsu, T.T.C, Torsion of Structural Concrete-Plain Concrete Rectangular Sections, ACI Journal, SP-18 (1968) 203-238.
26. Hasnat, A., and Akhtaruzzaman, A.A., An Experimental Investigation to Determine the Ultimate Strength of Reinforced Concrete Beams Containing and Opening Under Bending and Torsion, King Abdulaziz University, Jeddah, 1983.
27. ACI 318-99, Bulding Code Requirements for Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Detroit, 1999.
28. Onsongo, M.W., The Diagonal Compression Field Theory for Reinforced Concrete Beams Subjected to Combined Torsion, Flexure, and Axial Load, Phd. Thesis, University of Toronto, Toronto, 1978.
29. Kirk, D.W., Lash, S.D., T-Beams Subjected to Combined Bending end Torsion, ACI Journal, 68,17 (1971) 150-159.
30. Karlson, I., Elfgren, L., and Losberg, A., Long Behavior of Reinforced Concrete Beams Subjected to Pure Torsion., ACI Journal, 71,19 (1974) 280-283.
31. Collins M.P., Mitchell, D., Shear and Torsion Design of Prestressed and Non-Prestressed Concrete Beams, PCI Journal, 25,5 (1980) 32-100.
32. Narayanan, R., Kaream-Palajian, A.S., Torsion in Beams Reinforced with Bars and Fibers, Journal of Structural Engineering, 112, 1 (1986) 53-66.

33. Selby, R.G., Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Solids, Msc. Thesis, University of Toronto, Department of Civil Engineering, Toronto, 1990.
34. Wafa, F.F., Hasnat, A., Tarabolsi, O.F., Prestressed Fiber Reinforced Concrete Beams Subjected to Torsion, ACI Journal, 89, 3 (1992) 272-283.
35. Rahal, K.N., The Behaviour of Reinforced Concrete Beams Subjected to Combined Shear and Torsion, Phd. Thesis, The University of Toronto, Department of Civil Engineering, Toronto, 1993.
36. Ramussen, L.J., Baker, G., Torsion in Reinforced Normal and High Strength Concrete Beams-Part 1: Experimental Test Series, ACI Structural Journal, 92, 1 (1995) 56-62.
37. Ramaswamy, A., Barzegar, F., Voyiadjis, G.Z., Study of Layering Procedures in Finite-Element Analysis of RC Flexural and Torsional Elements, Journal of Structural Engineering, 121, 12 (1995) 1773-1783.
38. Murtha-Smith, E., Cross Stiffeners for Beams in Torsion, Journal of Structural Engineering, 121, 7 (1995) 1119-1124.
39. Wafa, F.F., Shihata, S.A., Ashour, S.A. and Akhataruzzaman A.A., Prestressed High-Strength Concrete Beams Under Torsion, Journal of Structural Engineering, 121, 9 (1995) 1280-1286.
40. Hsu, T.T.C, Toward a Unified Nomenclature for Reinforced-Concrete Theory, Journal of Structural Engineering, 122, 3 (1996) 275-283.
41. Kozonis D., Strength Evaluation and Retrofit of Reinforced Concrete Beams Subjected to Pure Torsion, Msc. Thesis., Rice University, Texas, 1997.
42. Wang, W., C.-T.T.Hsu., Limit Analysis of Reinforced Concrete Beams Subjected to Pure Torsion, Journal of Structural Engineering 123, 1 (1997) 86-94.
43. Koutchoukali, N., Belarbi A., Effect of Concrete Strength on the behavior of RC Beams Subjected to Pure Torsion, High Strength Concrete First International Conference, July 1997, Hawaii, 38-51.
44. ACI 318-95, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, American Concrete Institute, Detroit, 1995.
45. Csikos, A., Hegedüs, I., Torsion of Reinforced Concrete Beams, 2nd Int. Phd. Symposium in Civil Engineering, 1998, Budapest, 1-9.
46. Hsu, T.T.C, Unified Approach to Shear Analysis and Design, Cement and Concrete Composites, 20 (1998) 419-435.
47. Tasdemir, M.A., Tasdemir C., Akyüz, S. Jefferson, A.D., Lydon, F.D., & Barr, B.I.G., Evaluation of Strains at Peak Stresses in Concrete: A Three-Phase Composite Approach, Cement And Concrete Composites, 20 (1998) 301-318.

48. Koutchoukali, N.-E., Non-Linear Behavior of Reinforced Concrete Beams Subjected to Pure Torsion, Phd. Thesis, Faculty of the Graduate School of the University of Missouri-Rolla, Missouri-Rolla, 1998.
49. Mobasher B., Plain & Spiral Reinforced Cylinders Subjected to Pure Torsion, CEE 591, Arizona State University, Arizona, 1998.
50. Ritchie, S.J.K., Leever, P.S., Non-uniform and Dynamic Torsion of Elastic Beams Part1: Governing Equations and Particular Solutions, Journal of Strain Analysis 34, 5 (1999) 303-311.
51. Ritchie, S.J.K., Leever, P.S., Non-uniform and Dynamic Torsion of Elastic Beams Part2: The Double Torsion Test, Journal of Strain Analysis 34, 5 (1999) 313-322.
52. Helwig, T.A., Yura, J.A., Torsional Bracing Columns, Journal of Structural Engineering, 125, 5 (1999) 547-555.
53. Maeck, J., Roeck G.D., Dynamic Bending and Torsion Stiffness Derivation From Modal Curvatures and Torsion Rates, Journal of Sound and Vibration, 225, 1 (1999) 153-170.
54. Leu, L.-L., Lee, Y.S., Torsion Design Charts for Reinforced Concrete Rectangular Members, Journal of Structural Engineering, 126, 2 (2000) 210-218
55. Trahair, N.S., Teh, L.H., Second Order Moments in Torsion Members, Engineering Structures, 23 (2000) 631-642.
56. Karayannis, C.G., Smeared Crack Analysis for Plain Concrete in Torsion, Journal of Structural Engineering, 126, 6 (2000) 638-645.
57. Karayannis, C.G., Chalioris, C.E., Experimental Validation of Smeared Analysis for Plain Concrete in Torsion, Journal of Structural Engineering, 126, 6 (2000) 646-653.
58. Hsu, H.-L., Wang, C.-L., Flexural-Torsional Behaviour Of Steel Reinforced Concrete Members Subjected to Repeated Loading, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 29 (2000) 667-682 .
59. Brabia, G., The Effects of Torsion on the Initial Geometry of Bars Having Non-Circular Cross-Sections, Journal of Materials Processing Technology, 106 (2000) 8-12.
60. Li, Z., Ko., J.M., Ni Y.Q., Torsional Rigidity of Reinforced Concrete Bars with Arbitrary Sectional Shape., Finite Element Analysis and Design, 35 (2000) 349-361.
61. Fu, C.C., Tang, Y., Torsional Analysis for Prestressed Concrete Multiple Cell Box, Journal of Engineering Mechanics, 127, 1 (2001) 111-131.
62. Panchacharam, S., Belarbi, A., Torsional Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Composites, First FIB Congress, 2002, Osaka, 13-19.

63. Kamalodeen, F., Sharma, A.K., Fiber Reinforced Concrete Rectangular Members Under Combined Bending, Shear and Torsion, 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, 2002, Newyork, 42-60.
64. Reagen, S.W., Constrained Torsion of Prismatic Bars, Phd. Thesis, The Faculty of the School of Engineering and Applied Science University of Virginia, Virginia, 2002.
65. Lee, M.K., Barr,B.I.G., Strength and Fracture Properties of Industially Prepared Steel Fibre Reinforced Concrete, Cement&Concrete Composites, 25 (2002) 321-332.
66. Ghobarah A., Ghorbel, M.N., Chidiac, S.E., Upgrading Torsional Resistance of Reinforced Concrete Beams Using Fiber-Reinforced Polymer, Journal of Composites for Construction, (2002) 257-263.
67. Wu, X., Genin, J., Force Stream Function Method, Journal of Strain Analysis, 38, 2 (2003) 181-185.
68. Mendis, P. Design of High Strentgh Concrete Members: State of Art, Concrete Construction, Article in press (2003) 15 s.
69. Spountzakis, E.J., Mokos, V.G., Warping Shear Stresses in Nonuniform Torsion of Composite Bars by BEM, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 192 (2003) 4337-4353.
70. Spountzakis, E.J.,2001, Nonuniform Torsion of Multi-Material Composite Bars by the Boundary Element Method, Computers and Structures, 79 (2001) 2805-2816.
71. Li, Q.S., Fang, J.Q., Liu, D.K., Tang J., Failure Propability Prediction of Concrete Components, Cement and Concrete Research, 33 (2003) 1631-1636.
72. Thanon, W.A., Paul D.K., Jaafar, M.S., Trikha, D.N., Influence of Torsion on the Inelastic Response of Three Diamentional R.C. Frames, Finite Element Analysis and Design, Article in Press, 2003.
73. Phatak, D.R., Dhonde, H.B., Dimensional Analysis of Reinforced Concrete Beams Subjected to Pure Torsion, Journal of Structural Engineering, 129,11 (2003) 1559-1563.
74. Rahmanian N., Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Space Frames Under Combined Actions, Msc. Thesis, Carleto University, Departman of Civil Engineering Ottawa, Ontario 2003.
75. Powanusorn, S., Effect of Confinement on Shear Dominated Reinforced Concrete Elements, Phd. Thesis, Texas A&M University, Texas, 2003.
76. Subramaniam, V., Popovics, J.S., Testing Concrete in Torsion : Stability Analysis and Experiments, Northwestern University, Evanston, 2003.
77. Pajari, M. Pure Torsion Tests on Single Hollow core slabs, Espoo VTT Tiedotteita-Research Notes 2273, Finland, 2004.

78. Colotti, V., Spadea, G., An Analytical Model for Crack Control in Reinforced Concrete Elements Under Combined Forces, Cement&Concrete Composites, 27 (2005) 503-514.
79. Rao, T.D.G., Seshu, D.R., Torsion of Steel Fiber Reinforced Concrete, Cement and Concrete Research, 33,6 (2003) 1783-1788.
80. Jing, M., Grünberg, J., Mechanical Analysis of Reinforced Concrete Box Beam Strengthened with Carbon Fiber Sheets Under Combined Actions, Composite Structures, 73 (2006) 488-494.
81. Trahair, N.S., Nonlinear Elastic Nonuniform Torsion, Journal of Structural Engineering, 131, 7 (2005) 1135-1142.
82. Kayal, S., Plastic Rotation of an RCC T-Beam Girder Under the Combined Influence of Flexure and Torsion, Journal of Bridge Engineering, 12, 1 (2007) 21-30.
83. Khaloo, A.R., Sharifian, M., Experimental Investigation of Low to High Strength Steel Fiber Reinforced Lightweight Concrete Under Pure Torsion, Asian of Civil Engineering, 6, 6 (2005) 533-547.
84. Miki, T., Niwa, J., Nonlinear Analysis of Structural Members Using 3D Lattice Model, Journal of Advanced Concrete Technology, 2, 3 (2004) 343-358.
85. Chaisomphob, T., Kritsanawonghong, S., ve Hansapinyo, C., Experimental Investigation on Rectangular Reinforced Concrete Beam Subjected to Bi-axial Shear and Torsion, Songklanakarin Journal of Science Technology, 25, 1 (2003) 41-52.
86. Massa, J., Barbero, E.J., A Strength of Materials Formulation for Thin Walled Composite Beams with Torsion, Journal of Composite Materials, 32, 17 (1998) 1560-1594.
87. Trasit, P., Kawashima, K., Combined Cyclic Bending-Torsional Loading Test of Reinforced Concrete Bridge Columns, <http://www.pwri.go.jp/eng/ujnr/tc/g/pdf/21/21-8-4kawashima.pdf>, 3 Ekim 2006.
88. Hsu, H.L., Hsieh, J.C., Juang, L., Seismic Performance of Steel-Encased Composite Members with Strengthening Cross-Inclined Bars, Journal of Constructional Steel Research 60 (2004) 1663-1679.
89. Salom, P., Gergely, J. Young, D.T., Torsional Strengthenin of Spandrel Beams with Composite Laminates, <http://quakewrap.com/papers/BEAMS/048.pdf>, 3 Ekim 2006.
90. Chen, G.D., Sun, S.S., Pommerenke, D., Drewniak, J.L., Grene, G.G., McDaniel, R.D., Belarbi, A. And Mu, H.M., Crack Detection of a Full-Scale Reinforced Concrete Girder with a d,distributed Cable Sensor, Smart Materials and Structures, 14 (2005) 88-89.
91. Deifalla, A., Ghobarah, A., Simplified Analysis for Torsionally Strengthened RC Beams Using FRP, Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures, 2005, International Institute for FRP in Construction, 373-378.



92. Greene G.G., Behaviour of Reinforced Concrete Girders Under Cyclic Torsion and Torsion Combined with Shear; Experimental Investigation and Analytical Models, Phd. Thesis, University of Missouri-Rolla, Missouri-Rolla, 2006.
93. Egretzberger, M, Kugi, A., Günthner, S., Hartman, B., Stress Measurement in a Cantilevered Silicon Beam Undergoing Coupled Motion of Torsion and Bending, Smart Materials and Structures, 16 (2007) 296-304.
94. Han, L-H, Yao, G-H, Tao, Z, Performance of Concrete-Filled Thin-Walled Steel Tubes Under Pure Torsion, Thin Walled Structures, Article in Press, (2007).
95. Hii, A.K.Y, Al-Mahaidi, R., Experimental Investigation on Torsional Behavior of Solid and Box-Section RC Beams Strengthened with CFRP Using Photogrammetry, Journal of Composites for Construction, 10, 4 (2006) 321-329.
96. Mazars, J., Kotronis, P., Ragueneau, F., Casaux, G., Using Multifiber Beams to Account for Shear and Torsion Applications to Concrete Structural Elements, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 195 (2006) 7264–7281.
97. Mo, Y.L., Fan, Y.-L., Torsional Design of Hybrid Concrete Box Girders, Journal of Bridge Engineering, 11, 3 (2006) 329,339.
98. Rao, T.D.G, Seshu, D.R., Torsion of Steel Fiber Reinforced Concrete Members, Cement and Concrete Research, 33 (2003) 1783–1788.
99. Rao, T.D.G, Seshu, D.R., Torsional Response of Fibrous Reinforced Concrete Members: Effect of Single Type of Reinforcement, Construction and Building Materials, 20 (2006) 187–192.
100. Eurocode-2, Design of Concrete Structures, European Committee for Standardisation, Brussels, 1999.
101. TS 500, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, TSE, Ankara, Şubat 2000.
102. TS EN 1097-6:2002 Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranının Tayini, TSE, Ankara, Mart 2002.
103. TS 3529 Beton Agregalarının Birim Ağırlıklarının Tayini, TSE, Ankara, Aralık 1980.
104. TS 1226 ISO 3310-2 Deney Eleklere-Teknik Özellikler ve Deneyler - Kısım 2: Delikli Metal Levhalı Deney Eleklere, TSE, Ankara, Şubat 1996.
105. TS 1227 ISO 3310-1 Deney Eleklere - Teknik Özellikler ve Deneyler - Kısım 1: Tel Örgülü Deney Eleklere TSE, Ankara, Şubat 1996.
106. TS 706 EN 12620, Beton Agregaları, TSE, Ankara, Nisan 2003.
107. TS 138 EN 10002-1, Metalik malzemeler – Çekme deneyi – Bölüm 1: Ortam sıcaklığında deney metodu, TSE, Ankara, Nisan 2004.
108. TS 708, Beton Çelik Çubukları, TSE, Ankara, Mart 1996.

109. TS 802, Beton Karışımı Hesap Esasları TSE, Ankara, Ocak 1985.
110. Durmuş A., Hüsem M. Şekildeğiştirme Ölçerleri, Birinci Baskı, K.T.Ü. Basımevi, Trabzon, 2000.
111. Oztekin E., Pul, S., Hüsem U., Determination of Rectangular Stress Block Parameters for High Performance Concrete, Engineering Structures, 25 (2003) 371-376.
112. Shah, S.P., Ahmad, S.H., Structural Properties of High Strength Concrete and Its Implications for Precast Prestressed Concrete, PCI Journal, 30-6 (1985) 92-119.

## ÖZGEÇMİŞ

Ertekin ÖZTEKİN 1976 yılında Gümüşhane 'de doğdu. Gümüşhane 'de başladığı, ilköğrenimini, orta ve lise öğrenimini 1992 yılında Trabzon 'da tamamladı. 1993-1994 eğitim öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü' ne girerek bu bölümden 1997 yılında mezun oldu. 1998-2000 yılları arasında yüksek lisans öğrenimini tamamladı. Aynı yıllarda K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında araştırma görevlisi olarak çalıştı. 2000 yılında doktora öğrenimine başlamıştır.