

139215

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KISMEN ÖNGERİLMELİ YÜKSEK BAŞARIMLI  
BETON KİRİŞLERİN DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

İnş Yük. Müh. Yasemin AKGÜN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“Doktor”

Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

139215

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 03.10.2003  
Tezin Savunma Tarihi : 14.11.2003

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ing. Ahmet DURMUŞ  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Yusuf AYVAZ  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Temel SAVAŞKAN  
Jüri Üyesi : Prof. Dr. Tuncer ÇELİK  
Jüri Üyesi : Doç. Dr. Metin HÜSEM

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Yusuf AYVAZ

Trabzon 2003

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

## ÖNSÖZ

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

“Kısmen Öngerilmeli Yüksek Başarımlı Beton Kirişlerin Davranışlarının Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi” konusundaki bu çalışmayı bana önererek, diğer önemli görevlerine rağmen, çalışmamı başlangıcından sonuna kadar sürekli takip edip, çalışmam boyunca bilimsel düşünce disiplini aşıl原因an, tezimin her aşamasında bilgi ve deneyiminden yararlandığım yönetici hocam Prof. Dr. Ing. Sayın Ahmet DURMUŞ' a minnet ve şükranlarımı sunmayı çok zevkli bir görev sayarım.

Tez çalışmamı inceleyerek bilgi ve tavsiyelerini paylaşan Saygıdeğer Hocalarım Prof. Dr. Sayın Yusuf AYVAZ' a, Prof. Dr. Sayın Tuncer ÇELİK' e, Prof. Dr. Sayın Temel SAVAŞKAN' a ve Doç. Dr. Sayın Metin HÜSEM' e teşekkür ederim.

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

Bu çalışmanın deneyleri için gerekli malzemelerden silis dumanını temin ettiğimiz Kocaeli Kar Beton A.Ş.'ne, öngerilme donatısını temin ettiğimiz Trakya Çelik Halat A. Ş' ne, beton katkı maddelerini temin ettiğimiz Ordu Orbetaş Hazır Beton A.Ş.' ne öngerilme tertibatı için gerekli birtakım aygıtları temin ettiğimiz Ordu Köroğlu Silah Sanayi A.Ş.' ne ve beton agregalarını temin ettiğimiz Trabzon Polat İnşaat A.Ş. yönetici ile personeline teşekkür etmek isterim.

Laboratuvar çalışmaları sırasında önemli desteklerini gördüğüm Doç. Dr. Sayın Metin HÜSEM, Yrd. Doç. Dr. Selim PUL, laboratuvar teknisyeni Hayri ÇAKIR' a ve çok değerli arkadaşım Arş Gör. Tayfun DEDE' ye teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince beni sabır ve şefkatle destekleyen ailemin tüm fertlerine, özellikle de anneme ve babama teşekkür ederim. Ayrıca, tüm manevi desteği yanında, laboratuvar çalışmalarım sırasında çok büyük desteklerini gördüğüm eşim Makine Yüksek Mühendisi Mithat AKGÜN' e müteşekkir olduğumu belirtir, bu çalışmanın ülkemize yararlı olmasını gönülden dilerim.

Yasemin AKGÜN

Trabzon, 2003

## AÇIKLAMA

Bu tezde, Türkçe Sözlükte de [132] belirtilmiş olduğu gibi, nitelik sözcüğünün eşanlamlısı özellik sözcüğü tek “I” ile, bilhassa sözcüğünün eşanlamlısı olan özellikle sözcüğü ise çift “II” ile yazılmıştır. Bu yazılımın doğruluğu Kaynak [133]’ de daha ayrıntılı açıklamayla da desteklenmektedir.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	II
İÇİNDEKİLER .....	IV
ÖZET .....	IX
SUMMARY .....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	XI
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	XVII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XX
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Kısmen Öngerilmeli Beton Tekniğinin Tarihsel Gelişimi ve Kullanım Alanları .....	2
1.3. Kısmen Öngerilmeli Beton Yapı Tekniğinde Öngerilme Düzeyi İçin Önerilen Bazı Bağıntılar .....	4
1.4. Kısmen Öngerilmeli Beton Yapı Tekniğinin Üstünlükleri ve Geleceği .....	7
1.5. Yüksek Başarımlı Betonlar Hakkında Bazı Hatırlatmalar .....	7
1.6. Kısmen Öngerilmeli Yüksek Başarımlı ve Geleneksel Beton Kirişler Konusunda Daha Önce Gerçekleştirilmiş Olan Bazı Çalışmalar.....	14
1.7. Bu Çalışmanın Amaç ve Kapsamı .....	20
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME.....	21
2.1. Çalışmamıza Konu Olan Kirişlerde Kullanılan Betonların Üretimi ve Özellikleri .....	21
2.1.1. Yüksek Başarımlı ve Geleneksel Beton Üretimi .....	21
2.1.1.1. Kullanılan Agrega Özellikleri .....	21
2.1.1.1.1. Petrografik ve Mineralojik Özellikler .....	21
2.1.1.1.2. Fiziksel Özellikler .....	22
2.1.1.1.3. Mekanik Özellikler.....	23
2.1.1.1.4. Agrega Granülometrik Bileşimi.....	23
2.1.1.2. Kullanılan Çimento ve Katkı Maddesinin Özellikleri.....	26
2.1.1.3. Kullanılan Karma Suyu Özellikleri.....	27

**Sayfa No**

2.1.1.4.	Yüksek Başarımli ve Geleneksel Betonların Bileşimi .....	28
2.1.1.5.	Betonların Üretimi, Saklanması ve Deney Anındaki Yaşları .....	29
2.1.1.5.1.	Betonların Üretimi .....	29
2.1.1.5.2.	Betonların Saklanması ve Deney Anındaki Yaşları.....	30
2.1.1.6.	Kullanılan Betonların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri .....	30
2.1.1.6.1.	Fiziksel Özellikler .....	30
2.1.1.6.2.	Mekanik Özellikler.....	30
2.1.1.6.2.1.	Merkezi Basınç Dayanımları.....	30
2.1.1.6.2.2.	Gerilme- Şekildeğiştirme Eğrileri .....	32
2.1.1.6.2.3.	Eğilme ve Yarmada Çekme Dayanımları .....	32
2.1.1.7.	Yüksek Başarımli ve Geleneksel Betonların Özelliklerinin Karşılaştırılması ve İrdemeler .....	33
2.2.	Beton, Betonarme, Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Deney Kirişleri ve Eğilme Davranışları .....	34
2.2.1.	Beton ve Betonarme Deney Kirişleri .....	34
2.2.1.1.	Beton ve Betonarme Deney Kirişlerinin Özellikleri ve Donatı Planı .....	34
2.2.1.2.	Beton ve Betonarme Deney Kirişlerinin Üretiminde Kullanılan Beton ve Donatı Özellikleri .....	35
2.2.1.2.1.	Beton Özellikleri .....	37
2.2.1.2.2.	Donatı Özellikleri.....	37
2.2.1.3.	Beton ve Betonarme Deney Kirişlerinin Üretimi.....	40
2.2.1.3.1.	Kalıp.....	40
2.2.1.3.2.	Betonların Karılması ve Yerine Konması .....	40
2.2.1.4.	Beton ve Betonarme Kirişlerin Saklanması ve Deney Anındaki Yaşları....	40
2.2.1.5.	Beton ve Betonarme Kirişlerin Eğilme Deney Düzeneği .....	42
2.2.1.5.1.	Ölçme Aygıtları ve Ölçüm Yerleri.....	42
2.2.1.5.1.1.	Yerdeğiştirme Ölçerleri.....	42
2.2.1.5.1.2.	Şekildeğiştirme Ölçerleri .....	42
2.2.1.6.	Beton ve Betonarme Kirişlerin Yüklenmesi .....	43
2.2.1.7.	Betonarme Kirişlerin Dengeli, Kritik ve Minimum Donatı Oranları.....	45
2.2.1.8.	Beton ve Betonarme Kirişlerin Yük- Şekildeğiştirme ve Yük-Sehim Eğrileri .....	46
2.2.1.9.	Beton ve Betonarme Kirişlerin Kırılmalarının İncelenmesi .....	52

**Sayfa No**

2.2.1.9.1.	Beton ve Betonarme Kirişlerin Kırılma ve Kullanım Momentlerinin Hesabında İzlenen Yol.....	52
2.2.1.9.2.	Beton ve Betonarme Kirişlerin Kırılma ve Kullanım Momentleri .....	61
2.2.1.9.3.	Betonarme Kirişlerin Deneysel Emniyet Katsayıları.....	62
2.2.1.10.	Beton ve Betonarme Kirişlerin Çatlama Durumlarının İncelenmesi .....	63
2.2.1.10.1.	Teorik Hatırlatmalar .....	63
2.2.1.10.1.1.	Betonarmede Çatlama ve Ortalama Çatlak Genişliğinin Hesabı .....	63
2.2.1.10.1.2.	Eğilme ve Nervürlü Donatı Çatlakları .....	68
2.2.1.10.2.	Beton Kalitesinin Betonarme Kirişlerin Çatlama Durumu Üzerindeki Etkisi .....	74
2.2.1.10.3.	Beton ve Betonarme Kirişlerin İlk Çatlama Momentleri.....	77
2.2.1.11.	Beton ve Betonarme Kirişlerin Denetim Deneyleri .....	77
2.2.1.12.	Yüksek Başarımlı ve Geleneksel Betonarme Kiriş Davranışlarının Karşılaştırılması ve İrdelemeler.....	78
2.2.2.	Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Deney Kirişleri.....	80
2.2.2.1.	Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Deney Kirişlerinin Özellikleri ve Donatı Şemaları.....	81
2.2.2.2.	Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Deney Kirişlerinin Üretiminde Kullanılan Beton ve Donatı Özellikleri .....	83
2.2.2.2.1.	Beton Özellikleri .....	83
2.2.2.2.2.	Aktif ve Pasif Donatı Özellikleri.....	83
2.2.2.3.	Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Deney Kirişlerinin Üretimi ....	84
2.2.2.3.1.	Kiriş Aktif Donatılarına Öngerilme Verilmesi .....	84
2.2.2.3.2.	Betonların Karılması, Yerine Konması ve Kirişlerin Saklanması .....	87
2.2.2.3.3.	Öngerilme Kuvvetinin Kirişe Aktarılması ve Deney Anındaki Yaşları ....	88
2.2.2.4.	Öngerilme Kayıpları ve Kirişlerdeki Başlangıç Gerilmeleri .....	88
2.2.2.4.1.	Öngerilme Kayıpları Hakkında Hatırlatmalar ve Bunların Değerlendirilmesi.....	89
2.2.2.4.1.1.	Hatırlatmalar .....	89
2.2.2.4.1.2.	Öngerilme Kayıplarının Değerlendirilmesi.....	90
2.2.2.4.2.	Kirişlerdeki Başlangıç Gerilmeleri .....	95
2.2.2.5.	Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Eğilme Deney Düzenegi ve Dış Yükleme .....	98

2.2.2.6.	Öngerilme Kuvveti Aktarılan ve Eğilme Momenti Uygulanan Kirişlerin Davranışları .....	98
2.2.2.7.	Öngerilme Kuvveti, Özağırlık ve Materyal Ağırlığı Altında Kirişlerin Orta Kesitlerindeki Gerilme Dağılımları .....	98
2.2.2.8.	Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Dengeli Donatı Oranları .....	105
2.2.2.9.	Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Yük-Şekildeğiştirme ve Yük-Sehim Eğrileri .....	106
2.2.2.10.	Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Kırılmalarının İncelenmesi .....	117
2.2.2.10.1.	Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Kırılma ve Kullanım Momentlerinin Hesabında İzlenen Yol .....	117
2.2.2.10.2.	Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Kırılma ve Kullanım Momentleri .....	124
2.2.2.10.3.	Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Deneysel Emniyet Katsayıları .....	125
2.2.2.11.	Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Çatlama Durumlarının İncelenmesi .....	126
2.2.2.11.1.	Kısmen Öngerilmeli Betonda Çatlama .....	127
2.2.2.11.2.	Beton Kalitesinin Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Çatlama Durumu Üzerindeki Etkisi .....	127
2.2.2.11.3.	Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin İlk Çatlama Momentleri .....	131
2.2.2.12.	Kısmen Öngerilmeli Beton Kiriş Eğriliklerinin Öngerilmeli Beton Kirişinkine Oranlarının Kısmen Öngerilme Oranı ve Kirişlere Uygulanan Momente Göre Değişimlerinin Belirlenmesi .....	132
2.2.2.13.	Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Denetim Deneyleri .....	136
2.2.2.14.	Onuncu Seri Kısmen Öngerilmeli Yüksek Başarımlı ve Geleneksel Beton Deney Kirişleri .....	137
2.2.2.14.1.	Onuncu Seri Kısmen Öngerilmeli Yüksek Başarımlı ve Geleneksel Beton Deney Kirişlerine İlişkin Yük- Şekildeğiştirme ve Yük-Sehim Diyagramları .....	138
2.2.2.14.2.	Onuncu Seri Kısmen Öngerilmeli Yüksek Başarımlı ve Geleneksel Beton Deney Kirişlerinin Kırılma ve Kullanım Momentleri .....	155
2.2.2.14.2.1.	Onuncu Seri Kısmen Öngerilmeli Yüksek Başarımlı ve Geleneksel Beton Kirişlerin Deneysel Emniyet Katsayıları .....	155

**Sayfa No**

2.2.2.14.3.	Onuncu Seri Kısmen Öngerilmeli Yüksek Başarımlı ve Geleneksel Beton Deney Kirişlerinin Çatlama Durumlarının İncelenmesi .....	156
2.2.2.14.4.	Onuncu Seri Kısmen Öngerilmeli Yüksek Başarımlı ve Geleneksel Beton Deney Kirişlerinin Denetim Deneyleri .....	156
2.2.2.15.	Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kiriş Davranışlarının Karşılaştırılması ve İrdelemeler .....	162
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	168
4.	KAYNAKLAR .....	170
	ÖZGEÇMİŞ .....	180





## ÖZET

Betonarme yapı tekniğinin kullanımının sakıncalı olduğu durumlarda öngerilmeli beton yapı tekniğinin tercih edildiği, oysa bu yapıların sünekliklerinin çok daha düşük olduğu dolayısıyla da adaptasyon yapma imkanına sahip olmadıkları bilinmektedir. Bu durum, özellikle Türkiye ve Türkiye gibi aktif deprem kuşağında bulunan ülkelerde öngerilmeli beton yapı tekniğinin kullanılması yerine, kesitlerinde hem aktif hem de pasif donatıyı bulunduran dolayısıyla da betonarme yapılardaki kadar olmasa bile adaptasyon yapma özeliğine de sahip olan, kısmen öngerilmeli beton yapı tekniğinin kullanılmasının daha uygun olduğunu tartışılmaz kılmaktadır. Zira sahip olduğu özellikler bakımından bu yapı tekniğinin kullanımı, bazı sınır ve koşullar altında, betonarme ve tam öngerilmeli beton yapı tekniklerine göre daha rasyonel ve daha ekonomik olmaktadır. Kısmen öngerilmeli beton konusunda bugüne kadar bir çok araştırma gerçekleştirilmiş olmasına rağmen bu tekniğin halen çözüm bekleyen bir çok problemi de bulunmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı da salt eğilme etkisindeki kısmen öngerilmeli yüksek başarılı beton kirişlerin dayanım, şekildeğiştirme ve çatlama durumlarını geleneksel betonlarla üretilenlerinkilerle karşılaştırmalı olarak, teorik ve deneysel yöntemlerle, incelemekten ibarettir.

Bu amaçla gerçekleştirilen bu çalışma üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm genel bilgiler bölümü olup, ikinci bölümde ilk aşamada çalışmalarımıza konu olan kirişlerin üretiminde kullanılan yüksek başarılı ve geleneksel betonların yapımı ve özellikleri açıklanmakta, ikinci aşamada ise bu betonlarla üretilen beton, betonarme, kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerin davranışları karşılaştırmalı olarak incelenmekte ve elde edilen bulgular da bu bölümde irdelenmektedir. Çalışmanın bütününden çıkartılan bazı sonuçlar ve öneriler ise üçüncü bölümde özetlenmekte ve bu son bölümü kaynaklar listesi izlemektedir.

Elde edilen bulguların irdelenmesi, geleneksel betonlarla üretilen kısmen öngerilmeli beton kirişler için %60 civarında olan optimum kısmen öngerilme oranının yüksek başarılı betonlarla üretilenlerde %70 civarında olduğunu ve bazı durumlarda optimum kısmen öngerilmeli yüksek başarılı beton yapı tekniğinin kullanımının daha uygun olacağını ortaya koymuş bulunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler :** Kısmen Öngerilmeli Beton Kirişlerin Davranışları, Salt Eğilmede, Deneysel ve Teorik Karşılaştırmalı, Yüksek Başarılı ve Geleneksel Betonlarla Üretilen.

## **SUMMARY**

### **Investigation of Behaviour of Partially Prestressed with High Performance Concrete Beams**

It is known that prestressed concrete building technique is preferred in objectionable cases of reinforced concrete building technique. It is also known that ductility of prestressed concrete buildings are lower than reinforced concrete buildings, so it means that those buildings don't have adaptation property, either. This case especially in active earthquake zone such as Turkey and the countries like Turkey, makes use of partially prestressed concrete building technique compulsory instead of use of prestressed concrete building technique because it has both passive steel and active steel in beam sections and adaptation property even it doesn't have as much as prestressed concrete building technique. Moreover, use of partially prestressed concrete building technique is more rational and more economical than the other building techniques under certain conditions. Despite the fact that so many investigations have been performed on partially prestressed concrete up to now, this building technique has many problems that are waiting for solution. The primary objective of this study is to investigate the strength, deformation and fissuration of partially prestressed concrete beams that are exposed to pure flexure with the theoretical and experimental methods, comparing with the ones that are produced traditionally.

This study consists of three chapters. There is general knowledge in chapter one. In chapter two, at first step, the properties and productions of high performance concrete and traditional concrete are explained. At second step, behaviour of concrete, reinforced concrete, partially prestressed concrete and prestressed concrete beams are studied comparative and the finds are examined. The general conclusions obtained from the study together with the recommendations are summarized in chapter three and chapter three is followed by a list of references.

The study of the outcomes obtained indicates that optimum partially prestressed ratio is approximately %60 for partially prestressed concrete beams that are produced with traditional concrete but optimum partially prestressed ratio is approximately %70 for partially prestressed concrete beams that are produced with high performance concrete and in some circumstances the use of optimum partially prestressed with high performance concrete building technique is found to be more convenient in many aspects.

**Key Words :** Behavior of Partially Prestressed Concrete Beams, on Pure Flexure, Compare with Experimental and Theoretical, Produced with High Performance and Traditional Concretes.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1.	Kısmen öngerilmeli beton kiriş enkesiti, iç kuvvet ve moment kolları .....	5
Şekil 2.1.	Kalker kayacının tipik ince kesiti.....	22
Şekil 2.2.	Kum eşdeğerliği deney düzeneği .....	22
Şekil 2.3.	Birim şekil değiştirme ölçeri (ekstansometre) ve 12 kanallı Wheatstone köprüsü.....	24
Şekil 2.4.	Üniversal deney aleti.....	24
Şekil 2.5.	Eğilmede çekme dayanımının belirlenmesinde kullanılan deney aleti .....	25
Şekil 2.6.	Yüksek başarılı ve geleneksel betonların üretiminde kullanılan agreganın granülometri eğrisi ve bileşimi .....	25
Şekil 2.7.	Hidrolik pres .....	31
Şekil 2.8.	Betonların tipik gerilme-şekil değiştirme diyagramları .....	32
Şekil 2.9.	Beton ve betonarme deney kirişlerinin kalıp planı ve donatıları .....	36
Şekil 2.10.	Nervürlü donatının (Ø8) görünen ve gerçek gerilme-şekil değiştirme diyagramları .....	39
Şekil 2.11.	Nervürlü donatının (Ø10) görünen ve gerçek gerilme-şekil değiştirme Diyagramları .....	39
Şekil 2.12.	Deney kirişlerinin üretiminde kullanılan kalıp .....	41
Şekil 2.13.	Islak çuvallar altında saklanan kirişlerden bir görünüm .....	41
Şekil 2.14.	Deney kirişlerinin yükleme düzeneği ve ölçme aygıtları.....	44
Şekil 2.15.	Şekil değiştirme ölçerlerinin kiriş çekme bölgesindeki konumları.....	45
Şekil 2.16.	Betonarme kirişlerin deneye hazır hale getirilmiş bir görünümü .....	45
Şekil 2.17.	Yüksek başarılı YB1 ve geleneksel G1 beton kirişlerin yük- şekil değiştirme diyagramları.....	47
Şekil 2.18.	Yüksek başarılı YB2 (A) ve geleneksel G2 (A) betonarme kirişlerin yük-şekil değiştirme diyagramları .....	48
Şekil 2.19.	Yüksek başarılı YB3 (A) ve geleneksel G3 (A) betonarme kirişlerin yük-şekil değiştirme diyagramları .....	49
Şekil 2.20.	Yüksek başarılı betonarme YB2 (A) ve YB3 (A) kirişlerinin yük-sehim diyagramları .....	50
Şekil 2.21.	Geleneksel betonarme G2 (A) ve G3 (A) kirişlerinin yük-sehim diyagramları .....	50

Şekil 2.22. Kırılma sınır durumunda kesitin şekildeğiştirme diyagramının alabileceği çeşitli konumlar “Üç dönme noktası kuralı” .....	53
Şekil 2.23. Salt eğilme etkisindeki betonarme bir kesitte şekildeğiştirmeler, gerilmeler ve bileşkeleri.....	55
Şekil 2.24. Pasif donatının ”orijine göre simetrik” şematik karakteristik ve tasarım diyagramları .....	56
Şekil 2.25. Betonarme bir kesitin şematik şekildeğiştirme diyagramı ve kırılma anında kesitte oluşan gerilmeler ve bileşkeleri .....	57
Şekil 2.26. Betonarme bir kesitin kırılma anındaki şekildeğiştirme diyagramının araştırılması .....	59
Şekil 2.27. Yüksek başarılı betonarme kirişler için teorik kırılma momentinin hesabında kullanılan bilgisayar programı akış diyagramı .....	60
Şekil 2.28. Eğilme etkisindeki bir elemanda çatlama olayı .....	64
Şekil 2.29. Merkezi çekme etkisindeki bir elemanda çatlaklar .....	67
Şekil 2.30. Eğilme etkisindeki kiriş enkesitinde çatlakla ilgili alan.....	70
Şekil 2.31. Tarafsız eksen düzeyine doğru gidildikçe azalan eğilme çatlakları.....	70
Şekil 2.32. Nervürlerin betona uyguladığı eğik kuvvetler, bileşenleri ve iç basınçlar .....	71
Şekil 2.33. Merkezi çekme etkisindeki bir elemanda kılcal iç çatlaklar .....	71
Şekil 2.34. Nervürlü donatıdan doğan çeşitli çatlaklar .....	72
Şekil 2.35. Yüksek başarılı beton ve betonarme kirişlerin şematik çatlama durumu .....	75
Şekil 2.36. Geleneksel beton ve betonarme kirişlerin şematik çatlama durumu.....	76
Şekil 2.37. Yüksek başarılı ve geleneksel beton ve betonarme kirişlerin kırılma yükü altında momentin sabit olduğu bölgedeki çatlama durumlarına ilişkin bir fotoğraf.....	76
Şekil 2.38. Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarılı ve geleneksel beton kirişlerin donatı şemaları ve aktif donatı dışmerkezlikleri.....	81
Şekil 2.39. Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerin üretiminde kullanılan 7 mm çaplı aktif donatının görünen gerilme-şekildeğiştirme diyagramı .....	84
Şekil 2.40. Öngerilme verme düzeneğinin genel görünümleri .....	85
Şekil 2.41. Öngerilme verme düzeneğinin gövdesi üzerindeki çekme düzeneği.....	86
Şekil 2.42. Bu çalışmada kullanılan konik sıkışan ankrajlardan bir görünüm.....	86

- Şekil 2.43. Ön çekme yöntemindeki öngerilme kayıplarından dolayı aktif donatıdaki gerilmelerin zamanla değişimini gösteren şema ..... 90
- Şekil 2.44. Deneysel kirişlerinin şekil değiştirmeden önceki, öngerilme kuvveti ve eğilme momentinin ayrı ayrı uygulanması halinde meydana gelen şematik şekil değiştirme durumu..... 99
- Şekil 2.45. Öngerilmeli beton kirişlerin öngerilme kuvveti altındaki tipik davranışları.... 100
- Şekil 2.46. Öngerilme kuvveti, kiriş özağırlığı ve materyal ağırlığı (P+Mg) etkisiyle kiriş orta kesitlerinde oluşan normal gerilmelerin hesap ilkesi..... 101
- Şekil 2.47. Denge altı donatılı kirişlerin şekil değiştirme ya da eğriliklerinin momentle ya da yüklerle değişim diyagramı..... 106
- Şekil 2.48. Öngerilme oranı %40 olan B tipi kısmen öngerilmeli, 1Ø7 aktif ve 2Ø10 pasif donatıya sahip, yüksek başarımlı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekil değiştirme diyagramı [KÖYB110 (B)]..... 107
- Şekil 2.49. Öngerilme oranı %50 olan C tipi kısmen öngerilmeli, 1Ø7 aktif ve 2Ø8 pasif donatıya sahip, yüksek başarımlı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekil değiştirme diyagramı [KÖYB18 (C)]..... 108
- Şekil 2.50. Öngerilme oranı %50 olan C tipi kısmen öngerilmeli, 1Ø7 aktif ve 2Ø8 pasif donatıya sahip, geleneksel beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekil değiştirme diyagramı [KÖG18 (C)] ..... 109
- Şekil 2.51. Öngerilme oranı %60 olan D tipi kısmen öngerilmeli, 2Ø7 aktif ve 2Ø10 pasif donatıya sahip, yüksek başarımlı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekil değiştirme diyagramı [KÖYB210 (D)] ..... 110
- Şekil 2.52. Öngerilme oranı %70 olan E tipi kısmen öngerilmeli, 2Ø7 aktif ve 2Ø8 pasif donatıya sahip, yüksek başarımlı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekil değiştirme diyagramı [KÖYB28 (E)]..... 111
- Şekil 2.53. Öngerilme oranı %100 olan F tipi öngerilmeli, 1Ø7 aktif donatıya sahip, yüksek başarımlı ve geleneksel beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekil değiştirme diyagramı [ÖYB1 (F)-ÖG1 (F)] ..... 112
- Şekil 2.54. Kirişlerin yük-sehim diyagramlarının genel durumu..... 113
- Şekil 2.55. Öngerilme oranı %40, %50, %100 olan B,C ve F tipi kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarımlı beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları [KÖYB110 (B), KÖYB18 (C) ve ÖYB1(F)]..... 113
- Şekil 2.56. Öngerilme oranı %60, %70 ve %100 olan D, E ve F tipi kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarımlı beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları [KÖYB210 (D), KÖYB28 (E) ve ÖYB2 (F)] ..... 114
- Şekil 2.57. Öngerilme oranı %50 ve %100 olan C ve F tipi kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarımlı ve geleneksel beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları [KÖYB18 (C), KÖG18 (C), ÖYB1 (F) ve ÖG1(F)] ..... 114

**Sayfa No**

Şekil 2.58. Öngerilme oranı %100 olan F tipi öngerilmeli yüksek başarımı ve geleneksel beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları [ÖYB1 (F) ve ÖG1(F)] .....	115
Şekil 2.59. Öngerilme oranı %100 olan F tipi öngerilmeli yüksek başarımı ve geleneksel beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları [ÖYB2 (F) ve ÖG2(F)] .....	115
Şekil 2.60. Kısmen öngerilme oranı ile sehimlerin değişimi .....	116
Şekil 2.61. Kısmen öngerilmeli beton bir kesitte şekildeğiştirmeler,gerilmeler ve bileşkeleri .....	117
Şekil 2.62. Öngerilmeli beton bir kesitte şekildeğiştirmeler, gerilmeler ve bileşkeleri ....	118
Şekil 2.63. Kısmen öngerilmeli beton bir kesitin şematik şekildeğiştirme diyagramı, kırılma anında kesitte oluşan, gerilmeler ve bileşkeleri .....	119
Şekil 2.64. Kısmen öngerilmeli beton bir kesitin kırılma anındaki şekildeğiştirme diyagramının araştırılması .....	122
Şekil 2.65. Kısmen öngerilmeli yüksek başarımı beton kirişler için teorik kırılma momentinin hesabında kullanılan bilgisayar programı akış diyagramı .....	123
Şekil 2.66 Çatlak sayılarının kısmen öngerilme oranıyla değişimi.....	128
Şekil 2.67 Deneysel çatlak mesafelerinin kısmen öngerilme oranıyla değişimi.....	129
Şekil 2.68 Deneysel çatlak genişliklerinin kısmen öngerilme oranıyla değişimi .....	129
Şekil 2.69. Kısmen öngerilmeli beton kirişlerin şematik çatlama durumu .....	130
Şekil 2.70. Öngerilmeli beton kirişlerin şematik çatlama durumu .....	130
Şekil 2.71. Betonarme kiriş sehimlerinin karşılaştırılması .....	133
Şekil 2.72. Basit bir kirişte eğrilik diyagramı .....	134
Şekil 2.73 Kısmen öngerilmeli yüksek başarımı beton kiriş eğriliklerinin öngerilmeli yüksek başarımı beton kirişinkine oranının kısmen öngerilme oranı ve kirişlere uygulanan momente göre değişimleri.....	135
Şekil 2.74. Öngerilme oranı %40 ve aktif donatı kapasitenin %30' u oranında çekilmiş B' tipi kısmen öngerilmeli, 1Ø7 aktif ve 2Ø10 pasif donatıya sahip, yüksek başarımı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı .....	138
Şekil 2.75. Öngerilme oranı %40 ve aktif donatı kapasitesinin %50'si oranında çekilmiş B' tipi kısmen öngerilmeli, 1Ø7 aktif ve 2Ø10 pasif donatıya sahip, yüksek başarımı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB50110 (B')] .....	139
Şekil 2.76. Öngerilme oranı %40 ve aktif donatı kapasitesinin %60'ı oranında çekilmiş B' tipi kısmen öngerilmeli, 1Ø7 aktif ve 2Ø10 pasif donatıya sahip, yüksek başarımı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB60110 (B')].....	140

- Şekil 2.77. Öngerilme oranı %50 ve aktif donatı kapasitesinin %30'u oranında çekilmiş C' tipi kısmen öngerilmeli, 1Ø7 aktif ve 2Ø8 pasif donatıya sahip, yüksek başarılı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB3018 (C')]..... 141
- Şekil 2.78. Öngerilme oranı %50 ve aktif donatı kapasitesinin %50'si oranında çekilmiş C' tipi kısmen öngerilmeli, 1Ø7 aktif ve 2Ø8 pasif donatıya sahip, yüksek başarılı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB5018 (C')]..... 142
- Şekil 2.79. Öngerilme oranı %50 ve aktif donatı kapasitesinin %60'ı oranında çekilmiş C' tipi kısmen öngerilmeli, 1Ø7 aktif ve 2Ø8 pasif donatıya sahip, yüksek başarılı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB6018 (C')]..... 143
- Şekil 2.80. Öngerilme oranı %50 ve aktif donatı kapasitesinin %30'u oranında çekilmiş C' tipi kısmen öngerilmeli, 1Ø7 aktif ve 2Ø8 pasif donatıya sahip, geleneksel beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖG3018 (C')]..... 144
- Şekil 2.81. Öngerilme oranı %50 ve aktif donatı kapasitesinin %50'si oranında çekilmiş C' tipi kısmen öngerilmeli, 1Ø7 aktif ve 2Ø8 pasif donatıya sahip, geleneksel beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖG5018 (C')]..... 145
- Şekil 2.82. Öngerilme oranı %50 ve aktif donatı kapasitesinin %60'ı oranında çekilmiş C' tipi kısmen öngerilmeli, 1Ø7 aktif ve 2Ø8 pasif donatıya sahip, geleneksel beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖG6018 (C')]..... 146
- Şekil 2.83. Öngerilme oranı %60 ve aktif donatı kapasitesinin %30'u oranında çekilmiş D' tipi kısmen öngerilmeli, 2Ø7 aktif ve 2Ø10 pasif donatıya sahip, yüksek başarılı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB30210 (D')]..... 147
- Şekil 2.84. Öngerilme oranı %60 ve aktif donatı kapasitesinin %50'si oranında çekilmiş D' tipi kısmen öngerilmeli, 2Ø7 aktif ve 2Ø10 pasif donatıya sahip, yüksek başarılı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB50210 (D')]..... 148
- Şekil 2.85. Öngerilme oranı %60 ve aktif donatı kapasitesinin %60'ı oranında çekilmiş D' tipi kısmen öngerilmeli, 2Ø7 aktif ve 2Ø10 pasif donatıya sahip, yüksek başarılı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB60210 (D')]..... 149
- Şekil 2.86. Öngerilme oranı %70 ve aktif donatı kapasitesinin %30'u oranında çekilmiş E' tipi kısmen öngerilmeli, 2Ø7 aktif ve 2Ø8 pasif donatıya sahip, yüksek başarılı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB3028 (E')] ..... 150

- Şekil 2.87. Öngerilme oranı %70 ve aktif donatı kapasitesinin %50'si oranında çekilmiş E' tipi kısmen öngerilmeli, 2Ø7 aktif ve 2Ø8 pasif donatıya sahip, yüksek başarılı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB5028 (E')] ..... 151
- Şekil 2.88. Öngerilme oranı %70 ve aktif donatı kapasitesinin %60'ı oranında çekilmiş E' tipi kısmen öngerilmeli, 2Ø7 aktif ve 2Ø8 pasif donatıya sahip, yüksek başarılı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB6028 (E')] ..... 152
- Şekil 2.89. Öngerilme oranı %40 olan ve aktif donatıları kapasitelerinin çeşitli oranlarında çekilmiş B' tipi kısmen öngerilmeli, 1Ø7 aktif ve 2Ø10 pasif donatıya sahip, yüksek başarılı beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları [KÖYB(30110,50110,60110) (B')]..... 153
- Şekil 2.90. Öngerilme oranı %50 olan ve aktif donatıları kapasitelerinin çeşitli oranlarında çekilmiş C' tipi kısmen öngerilmeli, 1Ø7 aktif ve 2Ø8 pasif donatıya sahip, yüksek başarılı beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları [KÖYB(3018,5018,6018) (C')]..... 153
- Şekil 2.91. Öngerilme oranı %50 olan ve aktif donatıları kapasitelerinin çeşitli oranlarında çekilmiş C' tipi kısmen öngerilmeli, 1Ø7 aktif ve 2Ø8 pasif donatıya sahip, geleneksel beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları [KÖG(3018,5018,6018) (C')] ..... 154
- Şekil 2.92. Öngerilme oranı %60 olan ve aktif donatıları kapasitelerinin çeşitli oranlarında çekilmiş D' tipi kısmen öngerilmeli, 2Ø7 aktif ve 2Ø10 pasif donatıya sahip, yüksek başarılı beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları [KÖYB(30210,50210,60210) (D')] ..... 154
- Şekil 2.93. Öngerilme oranı %70 olan ve aktif donatıları kapasitelerinin çeşitli oranlarında çekilmiş E' tipi kısmen öngerilmeli, 2Ø7 aktif ve 2Ø8 pasif donatıya sahip, yüksek başarılı beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları [KÖYB(3028,5028,6028) (E')] ..... 155
- Şekil 2.94. KÖYB30110 (B'), KÖYB50110 (B') ve KÖYB60110 (B') kirişlerinin kırılma yükü altında ön yüzlerinin şematik çatlama durumu..... 159
- Şekil 2.95. KÖYB3018 (C'), KÖYB5018 (C') ve KÖYB6018 (C') kirişlerinin kırılma yükü altında ön yüzlerinin şematik çatlama durumu..... 159
- Şekil 2.96. KÖG3018 (C'), KÖG5018 (C') ve KÖG6018 (C') kirişlerinin kırılma yükü altında ön yüzlerinin şematik çatlama durumu ..... 160
- Şekil 2.97. KÖYB30210 (D'), KÖYB50210 (D') ve KÖYB60210 (D') kirişlerinin kırılma yükü altında ön yüzlerinin şematik çatlama durumu ..... 160
- Şekil 2.98. KÖYB3028 (E'), KÖYB5028 (E') ve KÖYB6028 (E') kirişlerinin kırılma yükü altında ön yüzlerinin şematik çatlama durumu ..... 161



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 1.1. Kısmen öngerilme oranına göre üretilen deney kirişleri.....	6
Çizelge 2.1. Agregada üretiminde kullanılan kalker kayacının mineralojik bileşimi.....	21
Çizelge 2.2. Bu çalışmaya konu olan yüksek başarımlı ve geleneksel betonların üretiminde kullanılan agreganın bazı fiziksel özellikleri .....	23
Çizelge 2.3. Yüksek başarımlı ve geleneksel betonların üretiminde kullanılan agreganın bazı mekanik özellikleri.....	24
Çizelge 2.4. Yüksek başarımlı ve geleneksel beton üretiminde kullanılan çimentoların fiziksel ve mekanik özellikleri .....	26
Çizelge 2.5. Yüksek başarımlı beton üretiminde kullanılan silis dumanının yaklaşık elek analiz sonuçları, birim kütlesi ve kimyasal bileşimi .....	27
Çizelge 2.6. Yüksek başarımlı ve geleneksel betonların karılmasında kullanılan suyun kimyasal özellikleri .....	27
Çizelge 2.7. Deney kirişlerinin üretiminde kullanılan yüksek başarımlı ve geleneksel betonların bileşimleri.....	29
Çizelge 2.8. Yüksek başarımlı ve geleneksel betonların kuru ve doymuş kuru yüzeyli birim kütleleri .....	30
Çizelge 2.9. Betonların, standart silindir ( $\varnothing = 15$ mm, $h = 300$ mm) numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerle belirlenen, bazı mekanik özellikleri.....	31
Çizelge 2.10. Betonların eğilmede ve yarmada ortalama çekme dayanımları .....	32
Çizelge 2.11. Deney kirişlerinde kullanılan donatı miktarları ve donatı oranları .....	35
Çizelge 2.12. Deney kirişlerinde kullanılan nervürlü donatının görünen ve gerçek bazı mekanik özellikleri.....	38
Çizelge 2.13. Deney kirişlerinin dengeli, kritik ve minimum donatı oranları.....	46
Çizelge 2.14. Yüksek başarımlı ve geleneksel beton ve betonarme kirişlerin deneysel kırılma yükleri ve sehimleri .....	51
Çizelge 2.15. Yüksek başarımlı ve geleneksel betonlar için eşdeğer dikdörtgen gerilme diyagramının belirlenmesinde kullanılan katsayılar .....	55
Çizelge 2.16. Deney kirişlerinde kullanılan beton ve donatının ortalama, karakteristik ve tasarım dayanımları.....	62
Çizelge 2.17. Beton ve betonarme deney kirişlerinin kırılma ve kullanım momentleri..	62
Çizelge 2.18. Yüksek başarımlı ve geleneksel betonarme kirişler için deneysel emniyet katsayıları .....	63

Çizelge 2.19. Yüksek başarım ve geleneksel betonarme kirişlerde momentin sabit olduğu bölgede kırılma yükü altında oluşan çatlak sayısı, ortalama çatlak mesafeleri, deneysel, teorik ve karakteristik çatlak genişlikleri.....	75
Çizelge 2.20. Yüksek başarım ve geleneksel beton ve betonarme kirişlerin ilk çatlama momentleri ve ilk çatlama oluşturulan maksimum birim uzamalar.....	77
Çizelge 2.21. Beton ve betonarme deney kirişlerinin üretiminde kullanılan yüksek başarım ve geleneksel betonların ortalama merkezi basınç dayanımları.....	78
Çizelge 2.22. Deney kirişlerinde kullanılan kısmen öngerilme oranları, donatı miktarları.....	82
Çizelge 2.23. Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerin üretiminde kullanılan aktif donatının bazı özellikleri.....	83
Çizelge 2.24. Beton dökümünden önce öngerilmeli kiriş aktif donatılarına uygulanan öngerilme kuvvetleri ve birim uzama miktarları.....	87
Çizelge 2.25. Ön çekme yöntemi için genel öngerilme kayıpları ve bu kayıpların meydana geliş nedenleri.....	89
Çizelge 2.26. Öngerilme kayıplarının, ilk öngerilme kuvvetinin yüzdesi (%) olarak, değerleri.....	91
Çizelge 2.27. Büzülme şekil değiştirmesi.....	93
Çizelge 2.28. Ortam nemine bağlı sünme ve büzülme katsayıları.....	93
Çizelge 2.29. Teorik kalınlığa bağlı sünme ve büzülme katsayıları.....	94
Çizelge 2.30. Zamana ve teorik kalınlığa bağlı sünme ve büzülme katsayıları.....	94
Çizelge 2.31. Geleneksel beton kullanılarak üretilen deney kiriş kesitlerindeki başlangıç gerilmeleri.....	95
Çizelge 2.32. Yüksek başarım beton kullanılarak üretilen deney kiriş kesitlerindeki başlangıç gerilmeleri.....	96
Çizelge 2.33. Kısmen öngerilmeli yüksek başarım ve geleneksel beton deney kiriş kesitlerindeki başlangıç gerilme diyagramları.....	97
Çizelge 2.34a. Deney kirişlerinin orta kesitlerinde $P+M_g$ etkisiyle oluşan teorik normal gerilme değerleri.....	103
Çizelge 2.34b. Deney kirişlerinin orta kesitlerinde $P+M_g$ etkisiyle oluşan teorik normal gerilme diyagramları.....	104
Çizelge 2.35. Deney kirişlerinin orta kesitlerinde $P+M_g$ etkisiyle oluşan $\sigma_{ci}$ normal gerilmeler ve ölçülen $\epsilon_{scx}$ ortalama şekil değiştirmeler.....	105
Çizelge 2.36. Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarım ve geleneksel beton kirişlerin dengeli donatı oranları.....	105

Çizelge 2.37.	Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarılı ve geleneksel beton deney kirişlerine ilişkin kırılma yükleri, deneysel kırılma momentleri ve sehimler.....	116
Çizelge 2.38.	Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton deney kirişlerinin kırılma ve kullanım momentleri .....	125
Çizelge 2.39.	Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişler için deneysel emniyet katsayıları .....	125
Çizelge 2.40	Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerde kırılma yükleri altında momentin sabit olduğu bölgede oluşan çatlak sayısı, ortalama çatlak mesafeleri, deneysel, teorik ve karakteristik çatlak genişlikleri .....	128
Çizelge 2.41.	Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerin donatı oranları, deneysel ve teorik ilk çatlama momentleri ile ilk çatlama oluşturulan maksimum birim uzamalar.....	132
Çizelge 2.42.	Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton deney kirişlerinin üretiminde kullanılan yüksek başarılı ve geleneksel betonların ortalama merkezi basınç dayanımları.....	136
Çizelge 2.43.	Aktif donatıları tam kapasiteyle çekilmeyen kısmen öngerilmeli yüksek başarılı ve geleneksel beton kirişlerin bazı özellikleri.....	137
Çizelge 2.44.	Onuncu seri kısmen öngerilmeli yüksek başarılı ve geleneksel beton deney kirişlerine ilişkin deneysel kırılma yükleri, kırılma momentleri ve bunlara karşılık gelen sehimler.....	156
Çizelge 2.45.	Onuncu seri kısmen öngerilmeli yüksek başarılı ve geleneksel beton deney kirişlerinin kırılma ve kullanım momentleri.....	157
Çizelge 2.46.	Onuncu seri kısmen öngerilmeli yüksek başarılı ve geleneksel beton deney kirişlerinin deneysel emniyet katsayıları .....	157
Çizelge 2.47.	Onuncu seri kısmen öngerilmeli yüksek başarılı ve geleneksel beton kirişlerde kırılma yükleri altında momentin sabit olduğu bölgede oluşan çatlak sayıları, ortalama çatlak mesafeleri, ortalama ve karakteristik çatlak genişlikleri .....	158
Çizelge 2.48.	Onuncu seri kısmen öngerilmeli yüksek başarılı ve geleneksel beton kirişlerin donatı oranları, deneysel ve teorik ilk çatlama momentleri ve ilk çatlama oluşturulan maksimum birim uzamalar .....	158
Çizelge 2.49.	Onuncu seri kısmen öngerilmeli beton deney kirişlerinin üretiminde kullanılan yüksek başarılı ve geleneksel betonların ortalama merkezi basınç dayanımları.....	161

## SEMBOLLER DİZİNİ

$A_s$	: Pasif donatı alanı
$A_p$	: Aktif donatı alanı
$A$	: Agrega, beton ya da harçta hacimce agregası miktarı
$b_w$	: Kesit genişliği
$c$	: Pas payı
$d$	: Faydalı yükseklik
$d_p$	: Aktif donatı için kesit faydalı yüksekliği
$d_s$	: Pasif donatı için kiriş faydalı yüksekliği
$ESV$	: Agrega yüzey kirliliği değeri (Görünen kum eşdeğeri)
$E_c$	: Betonun başlangıç elastisite modülü
$E_p$	: Aktif donatı elastisite modülü
$E_s$	: Pasif donatı elastisite modülü
$e$	: Dışmerkezlik
$F_r$	: Kiriş kırılma yükü
$F_c$	: Betondaki basınç gerilmelerinin bileşkesi
$F_s$	: Pasif donatı gerilmelerinin bileşkesi
$F_p$	: Aktif donatı gerilmelerinin bileşkesi
$f_c$	: Beton basınç dayanımı
$f_{ck}$	: Beton karakteristik basınç dayanımı
$f_{yk}$	: Pasif donatı karakteristik akma dayanımı
$f_{pk}$	: Aktif donatı karakteristik akma dayanımı
$f_{pd}$	: Aktif donatı hesap akma dayanımı
$f_{cd}$	: Beton hesap basınç dayanımı
$f_{yd}$	: Pasif donatı hesap akma dayanımı
$f_{ctk}$	: Beton karakteristik çekme dayanımı
$f_{ctd}$	: Beton hesap çekme dayanımı
$G_i$	: Geleneksel betonarme kiriş
$h$	: Kesit yüksekliği
$I_{ef}$	: Etkili eylemsizlik momenti
$I_{cr}$	: Çatlamış kesit eylemsizlik momenti

$I_c$	: Brüt kesit eylemsizlik momenti
$I_i$	: İtibari kesit eylemsizlik momenti
$\dot{I}$	: eylemsizlik yarıçapı
$l$	: Kiriş mesnetleri arası mesafe
$M_{cr}$	: Çatlama momenti
$M_{max}$	: Kiriş maksimum momenti
$M_{rd}$	: Teorik hesap kırılma momenti
$M_{rk}$	: Teorik karakteristik kırılma momenti
$M_{re}$	: Deneysel kırılma momenti
$M_{rt}$	: Teorik kırılma momenti
$M_s$	: Kullanım momenti
$M_z$	: Kiriş kesitine etkileyen eğilme momenti
$M_g$	: Kirişin kendi ağırlığı ve materyal ağırlığından oluşan eğilme momenti
$N$	: Modüler oran
$\ddot{O}YB_i$	: Tam öngerilmeli yüksek başarılı beton kiriş
$\ddot{O}G_i$	: Tam öngerilmeli geleneksel beton kiriş
$P$	: Öngerilme kuvveti
$PPR$	: Öngerilme oranı
$V_w$	: $1m^3$ betondaki su hacmi ( $m^3$ )
$V_h$	: $1m^3$ betondaki hava hacmi ( $m^3$ )
$W_m$	: Çatlak genişliği
$W_c$	: $1m^3$ betondaki çimento kütlesi ( $kg/m^3$ )
$W_a$	: $1m^3$ betondaki agrega kütlesi ( $kg/m^3$ )
$x$	: Tarafsız eksen derinliği
$y$	: Kesitin ağırlık merkezinin en çok çekme etkisinde bulunan life uzaklık
$YB_i$	: Yüksek Başarılı betonarme kiriş
$Z_p(r)$	: Aktif donatı ağırlık merkezinin $F_c$ 'nin tatbik noktasına uzaklığı
$Z_s(r)$	: Pasif donatı ağırlık merkezinin $F_c$ 'nin tatbik noktasına uzaklığı
$\beta_i$	: Her bir agrega tane sınıfının kütlece oranı
$\Delta_i$	: Ani sehim (mm)
$\epsilon_p$	: Aktif donatı şekildeğiştirmesi
$\epsilon_s$	: Pasif donatı şekildeğiştirmesi
$\epsilon_c$	: Betonun şekildeğiştirmesi

$\epsilon_{co}$	: Beton dayanımına karşılık gelen birim kısalma
$\epsilon_{cu}$	: Nihai birim kısalma
$\gamma_c$	: Çimentonun doygun kuru yüzeyli (DKY) birim kütlesi ( $kg/m^3$ )
$\gamma_a$	: Agreganın doygun kuru yüzeyli (DKY) birim kütlesi ( $kg/m^3$ )
$\gamma_{ai}$	: Her bir agrega tane sınıfının birim kütlesi
$\gamma_s$	: Deneysel emniyet katsayısı
$\gamma_r$	: Deneysel emniyet katsayısı
$\gamma_r^*$	: Deneysel emniyet katsayısı
$\gamma_r^{**}$	: Deneysel emniyet katsayısı
$\rho$	: Donatı oranı
$\rho_b$	: Dengeli donatı oranı
$\rho_c$	: Kritik donatı oranı
$\rho_s$	: Pasif donatı oranı
$\rho_p$	: Aktif donatı oranı
$\sigma_s$	: Pasif donatıdaki gerilme
$\sigma_p$	: Aktif donatıdaki gerilme
$\sigma_{cs}$	: Kesitin üst liflerindeki beton basınç gerilmesi
$\sigma_{ci}$	: Kesitin alt liflerindeki beton basınç gerilmesi
Not	: Bu dizinde yer almayan bazı semboller metin içinde ilgili oldukları yerde açıklanmışlardır.

## 1.GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Yapıların başta duraylılık (stabilite) olmak üzere; yeterli dayanım, belirli bir enerji tüketimi için, yeterli bir süneklik ve yanal ötelemelerin sınırlı kalabilmesi için ise yeterli bir rijitliğe sahip olması gerektiği bilinmektedir. Oysa öngerilmeli beton yapıların betonarme yapılara göre sünekliklerinin çok daha düşük olduğu dolayısıyla da bu yapıların pratik olarak adaptasyon (yeniden dağılım) yapma imkanına sahip olmadıkları da bilinmektedir. Bu durum, özellikle Türkiye ve Türkiye gibi aktif deprem kuşağında bulunan ülkelerde öngerilmeli beton yapı tekniğinin kullanılması yerine, kesitlerinde hem aktif hem de pasif donatıyı bulunduran dolayısıyla da betonarme yapılardaki kadar olmasa bile adaptasyon yapma özeliğine sahip olan, kısmen öngerilmeli beton (öngerilmeli betonarme) yapı tekniğinin kullanılmasının daha uygun olduğunu tartışılmaz kılmaktadır. Zira sahip olduğu özellikler bakımından kısmen öngerilmeli beton yapı tekniğinin kullanımı, bazı sınır ve koşullar altında, betonarme ve öngerilmeli beton yapı tekniklerine göre daha rasyonel ve daha ekonomik olmaktadır.

Bugüne kadar üzerinde bir çok araştırmanın yapıldığı kısmen öngerilmeli beton yapı tekniğinin geçerli ve yaşayabilir bir teknik olduğu uzun yıllar önce kararlaştırılmış olmasına rağmen bu yapı tekniğinin halen çözüm bekleyen bir çok problemi bulunmaktadır [1,2]. Bunlardan başlıcaları; pasif donatıların aktif donatılar üzerindeki etkisi, pasif donatı varken çekme etkisindeki betonun dayanımı, büzülme (rötre), sünme ve rölaksasyonun (gevşeme) aktif ve pasif donatı üzerindeki etkisi, çatlaklar bölgesindeki öngerilme donatısının korozyon ve yorulma nedenleriyle kopma tehlikesi, statik ve tekrarlı yükler altında çatlama momenti ve oluşan çatlakların gelişmesi, Avrupa Beton Komitesine (CEB) ilişkin hesap yöntemindeki emniyet katsayısının gerçek değeri, kirişlerin plastik şekildeğiştirme kapasiteleri ve servis yükleri altındaki şekildeğiştirmeleri ve tekrarlı yüklemeler altında beton-donatı aderansı şeklinde sıralanabilmektedir. Gerçekten söz konusu problemler üzerindeki incelemeler, irdelemeler ve bu suretle elde edilen bulgular halen tartışmaya açık bulunmaktadır.

Bu bölümde, kısmen öngerilmeli beton yapı tekniğinin tarihsel gelişimi, kullanım alanları, bu yapı tekniğinin üstünlükleri, sakıncaları ve geleceği verildikten sonra, yüksek

başarılı betonlar hakkında bazı hatırlatmalar yapılmakta, kısmen öngerilmeli yüksek başarılı ve geleneksel beton kirişler konusunda daha önce gerçekleştirilmiş olan bazı çalışmalar ile bu çalışmanın amaç ve kapsamı üzerinde durulmaktadır.

## **1.2. Kısmen Öngerilmeli Beton Yapı Tekniğinin Tarihsel Gelişimi ve Kullanım Alanları**

Bilindiği gibi beton sahip olduğu birçok iyi özeliği yönünden inşaat için elverişli bir yapı malzemesidir. Ancak bütün iyi özellikleri yanında betonun zayıf noktası çekme dayanımının hem çok küçük hem de güvenilir cinsten olmamasıdır.

Oysa yapı elemanlarının çoğunda büyük eğilme momentleri bunun sonucu olarak da çekme gerilmeleri oluşmaktadır. Bu tür yapılarda beton kullanmak için çekme gerilmelerini karşılamak üzere yapı elemanlarının çekme etkisinde kalacak olan bölgelerine bu etkiler doğrultusunda ve bunları karşılayacak miktarda çelik donatı konmuş, donatıyla beton arasındaki aderanstan yararlanarak ortak çalışma sağlanmış ve bu suretle betonarme yapı tekniği doğmuştur. Uygulamaları giderek yaygınlaşan betonarme bugün de modern mimarinin aranan malzemesi olma özeliğini korumaktadır [3]. Ancak, betonarme yapı elemanları donatı sayesinde çekme gerilmelerine dayanabilmekle beraber maalesef çekme bölgesindeki betonun çatlaması önlenmiş olamamaktadır. Betonarmenin bu sakıncası ile birlikte kendi özağırlığının fazla oluşu, bu tür elemanların aşırı şekilde değişime yapması, donatıların korozyon riski gibi birçok sakıncasının varlığı da bilinmektedir. Tüm bu sakıncaların ortak yanını çekme etkisindeki betonun sistematik olarak çatlaması teşkil etmektedir.

Betonarmenin yukarıda belirtilmeye çalışılan sakıncalarının özellikle çatlamasını önlemek düşüncesi öngerilmeli beton yapı tekniğinin doğmasına neden olmuştur. Bu teknikde yapı elemanlarının, dış yükler altında çekme etkisinde kalacak bölgelerine, beton çekme etkisinde kalmayacak düzeyde dış yüklerle beraber yada onlardan önce yapay olarak betonun dayanabileceği sınırlar içinde ard yada ön çekme yöntemlerinden biriyle basınç gerilmeleri uygulanmaktadır [4]. Durum böyle olunca dış yükler altında eleman kesitlerinde sadece basınç boşalması meydana gelmekte, istendiği takdirde çekme gerilmesi oluşmasına izin verilmemektedir. Böylece bu yapı tekniği ile çatlama sorunu tamamen önlenemediği yapı elemanına yada yapıya daha yüksek bir rijitlik kazandırılabilen ve hatta eğilmeye çalışan elemanlarda kritik açıklık denilen bir açıklık



değerine kadar sabit yükün etkisi de tamamen telafi edilebilmekte, diğer bir deyişle bedava taşınabilmektedir [5].

Bununla beraber günümüzde bazı koşul ve sınırlar dahilinde çatlakların oluşmasına izin verilebilen örneğin kısa süreli büyük geçici (hareketli) yüklerin etkisindeki yada kötü hava koşullarından korunmuş yapılarda öngerilmeli betonun kullanılması rasyonel ve ekonomik bulunmamaktadır. Buna gerekçe olarak da öngerilmeli betona ilişkin sabit yükün kısmen yada tamamen telafi edilmesi, yüksüz durumda çatlamanın önlenmesi gibi özelliklerin birçoğunun daha ekonomik ve adaptasyon (yeniden dağılım) özeliğinden dolayı daha emniyetli olan kısmen öngerilmeli beton (öngerilmeli betonarme) ile elde edilebilir oluşu gösterilmektedir [5]. Kısmen öngerilmeli beton yapı tekniğinde beton kesit, pasif donatı adı verilen betonarme donatısıyla, aktif donatı adı verilen öngerilme donatısının birlikte içermekte olduğundan ekonomi ilk olarak toplam öngerilme donatısının azaltılmasıyla temin edilmektedir. Pasif donatının kesite dağıtılma kolaylığı, malzeme savurganlığına meydan vermeden tüm kesitlerde kesit etkilerinin etkin bir şekilde dengelenmesini mümkün kılmaktadır. Diğer taraftan, öngerilmenin azaltılması bazı öngerilmeli yapılarda normal kullanım koşullarını sağlamayan şekildeğiştirmelere neden olabilen sünmeyi de azaltmaktadır. Nihayet, yukarıda da belirtilmeye çalışıldığı gibi, betonarmeye oranla daha düşük düzeyde olmakla beraber kısmen öngerilmeli beton yapılarda, öngerilmeli beton tekniğinde olmayan, liften life, kesitten kesite, elemandan elemana ve sistemden sisteme adaptasyonun varlığı da dünyanın bir çok laboratuvarında gerçekleştirilmiş olan deneylerle ortaya konmuş bulunmaktadır.

Kısmen öngerilmeli beton fikri, 1939' da Eperger tarafından ortaya atılmış olmakla beraber çok kısa bir zaman sonra 1948 yılından itibaren, bu yapı tekniği ile normal açıklıklı köprülerin inşaa edildiği, İngiltere' de Abeles tarafından da benimsenmiştir [6,7]. Fransa' da ise, bir taraftan o günün koşullarının bu yapı tekniği üzerinde deneysel araştırma yapmaya imkan vermemesi diğer taraftan 1926 yılında öngerilmeli beton yapı tekniğini keşfeden Fransız mühendis E. Freyssinet' in kısmen öngerilmeli beton yapı tekniğine karşı olması nedenleriyle, 1960 yılına kadar bu tekniğin uygulamaları yoktur. Bu tarihten itibaren, Avrupa Uluslararası Beton Komitesi / Uluslararası Öngerilmeli Beton Fedarasyonu (CEB/FIP) karma komitesinin önerileriyle, bu konuda teorik ve deneysel çalışmalara başlanmıştır. Kısmen öngerilmeli betonun geçerli bir teknik olduğuna 1965' de Brüksel' de bir çok araştırmacının katılmasıyla yapılan toplantıda karar verilmiş olmasına rağmen [1], daha önce de belirtilmeye çalışıldığı gibi bu tekniğin halen çözüm bekleyen

problemleri mevcut olmakla beraber pratik hayatta bir çok yapı bu teknikle inşa edilmektedir. Köprüler, prefabrike konutlar gibi yapılar kullanım alanlarına birer örnek teşkil etmektedir.

### 1.3. Kısmen Öngerilmeli Beton Yapı Tekniğinde Öngerilme Düzeyi İçin Önerilen Bazı Bağıntılar

Kısmen öngerilmeli beton yapı tekniğinde öngerilme düzeyi teknik literatürde çeşitli şekilde ve çeşitli adlarla tanımlanmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmektedir:

Öngerilme düzeyi tanımlamalarından biri [8,9,10,11] no' lu kaynaklarda kısmen öngerilme göstergesi olarak adlandırılan ve genel hali;  $F_p$  ve  $F_s$  sırasıyla aktif ve pasif donatıdaki bileşke kuvvetlerini,  $A_p$  ve  $A_s$  sırasıyla aktif ve pasif donatı alanlarını,  $\sigma_p$  ve  $\sigma_s$  sırasıyla aktif ve pasif donatı gerilmelerini göstermek üzere,

$$I = \frac{F_p}{F_p + F_s} = \frac{A_p \cdot \sigma_p}{A_p \cdot \sigma_p + A_s \cdot \sigma_s} \quad (1.1)$$

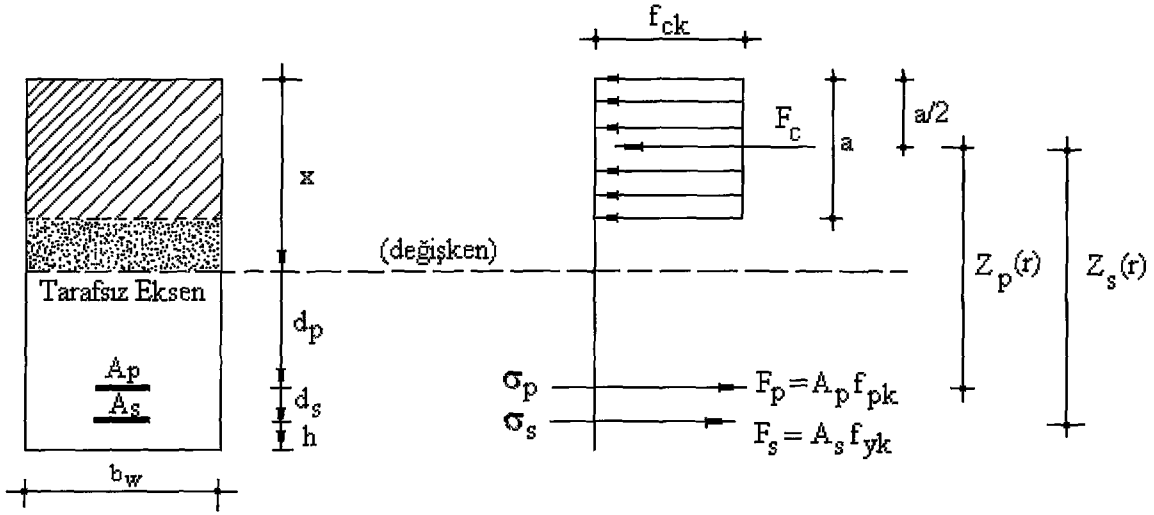
şeklinde olan bağıntıdır. Bu bağıntıdaki aktif ve pasif donatı gerilmeleri ( $\sigma_p$  ve  $\sigma_s$ ) yerine, donatıların tasarım çekme dayanımları ( $f_{pd}$  ve  $f_{yd}$ ) yada kesit taşıma gücüne eriştiği andaki akma dayanımları ( $f_{py}$  ve  $f_{sy}$ ) konulduğunda bağıntı,

$$I = \frac{A_p \cdot f_{pd}}{A_p \cdot f_{pd} + A_s \cdot f_{yd}} \quad (1.2)$$

$$I = \frac{A_p \cdot f_{py}}{A_p \cdot f_{py} + A_s \cdot f_{sy}} \quad (1.3)$$

şekillerini almaktadır. Bu bağıntılardaki sembollerin anlamları Şekil 1.1' de verilmektedir.

Bu bağıntılardan da görüldüğü gibi kısmen öngerilme göstergesi diye yalnız aktif donatıdaki bileşke kuvvetin, aktif ve pasif donatılardaki toplam bileşke kuvvetine oranına denilmektedir.



Şekil 1.1. Kısmen öngerilmeli beton kiriş enkesiti, iç kuvvet ve moment kolları

Söz konusu öngerilme düzeyi Kaynak [12]' de ise kısmen öngerilme derecesi olarak adlandırılmakta ve  $f_{pk}$  ve  $f_{yk}$  sırasıyla aktif ve pasif donatıda %0,2 kalıcı şekildeğiştirme oluşturan karakteristik akma dayanımlarını,  $d_p$  ve  $d_s$  sırasıyla aktif ve pasif donatı için kesitin faydalı yüksekliklerini göstermek üzere,

$$\lambda = \frac{A_p \cdot f_{pk} \cdot d_p}{A_p \cdot f_{pk} \cdot d_p + A_s \cdot f_{yk} \cdot d_s} \quad (1.4)$$

bağıntısıyla ifade edilmektedir.

Bu bağıntıdan, kısmen öngerilme derecesinin, moment kolu yerine faydalı yükseklik kullanılarak hesaplanan, kesitte sadece aktif donatı bulunması halinde taşıyabileceği momentin, aktif ve pasif donatının birlikte bulunması halinde taşıyabileceği toplam momente oranı olarak tanımlandığı görülmektedir.

Son olarak, bu çalışmada da kullanılan ve bir çok araştırmacı [13,14] tarafından da tercih edilen, (1.4) nolu bağıntıda faydalı yükseklikler yerine kırılma anındaki moment kolları ( $Z_p(r)$  ve  $Z_s(r)$ ) yazılmak suretiyle,

$$PPR = \frac{M_p}{M_p + M_s} = \frac{A_p \cdot f_{pk} \cdot Z_p(r)}{A_p \cdot f_{pk} \cdot Z_p(r) + A_s \cdot f_{yk} \cdot Z_s(r)} \quad (1.5)$$

şeklinde ifade edilen kısmen öngerilme oranıdır. Bu bağıntıdaki  $Z_p(r)$  ve  $Z_s(r)$  yerine,  $a$  eşdeğer beton basınç bloğu derinliğini göstermek üzere,  $Z_p(r) = (d_p - \frac{a}{2})$  ve  $Z_s(r) = (d_s - \frac{a}{2})$  konulduğunda,

$$PPR = \frac{A_p \cdot f_{pk} \cdot (d_p - \frac{a}{2})}{A_p \cdot f_{pk} \cdot (d_p - \frac{a}{2}) + A_s \cdot f_{yk} \cdot (d_s - \frac{a}{2})} \quad (1.6)$$

şeklini alacağı açıktır.

Bu bağıntıdan da görüldüğü gibi, kısmen öngerilme oranı aktif donatı tarafından dengelenen kırılma momentinin kesitin taşıyabileceği toplam kırılma momentine oranı olarak tanımlanmaktadır.

Bu bağıntılarla ifade edilen öngerilme düzeylerinin birlikte değerlendirilmesinden aktif ve pasif donatı derinliklerinin aynı olması halinde (bkz. Şekil 1.1) (1.5) bağıntısının (1.1) bağıntısıyla aynı olduğu kolayca anlaşılmaktadır. Diğer taraftan (1.5) bağıntısıyla tanımlanan kısmen öngerilme oranı daha gerçekçi olmakla birlikte bunun (1.4) bağıntısıyla tanımlanan kısmen öngerilme derecesinden çok farklı olmadığı ortadadır.

Burada, öngerilme düzeyi tanımlamalarına ilişkin bağıntıların tümünde  $A_p = 0$  durumunun betonarme kirişlere karşılık geldiği ve  $I = \lambda = PPR = 0$  olduğu,  $A_s = 0$  durumunun tam öngerilmeli beton kirişlere karşılık geldiği ve  $I = \lambda = PPR = 1$  olduğu,  $A_p \neq 0$  ve  $A_s \neq 0$  durumunun ise kısmen öngerilmeli beton kirişlere karşılık geldiği ve  $0 < I = \lambda = PPR < 1$  olduğu belirtilmelidir.

Bu çalışmada öngerilme düzeyi tanımlamalarından kısmen öngerilme oranına göre üretilen deney kirişleri aşağıda Çizelge 1.1' de verilmektedir.

Çizelge 1.1. Kısmen öngerilme oranına göre üretilen deney kirişleri

Kiriş Tipi	A	B	C	D	E	F
Kısmen Öngerilme Oranı (%PPR)	0	40	50	60	70	100
A; Betonarme, B,C,D,E; Kısmen Öngerilmeli Beton, F; Öngerilmeli Beton						

#### **1.4. Kısmen Öngerilmeli Beton Yapı Tekniğinin Üstünlükleri ve Geleceği**

Kısmen öngerilmeli beton yapı tekniğinin öngerilmeli beton yapı tekniğine göre başlıca üstünlükleri aşağıda özetlenmektedir.

1) Kısmen öngerilmeli beton yapıların betonarme yapılar kadar olmasa da öngerilmeli beton yapılarda bulunmayan adaptasyon yapma özeliği mevcuttur.

2) Bu yapı tekniğinin öngerilmeli beton yapı tekniği kadar yüksek başarılı betonlara gereksinimi bulunmamaktadır. Yüksek başarılı (performanslı) betonlar geleneksel betonlara göre daha erken dayanım kazandıklarından bunlarla üretilen yapı elemanlarında kalıp rotasyonları hızlı yapılabilmekte ve böylece belirli bir ekonomi temin edilmektedir.

3) Kısmen öngerilmeli beton yapı tekniğinde pasif donatı kullanılması aktif donatının azaltılmasına imkan tanıdığından daha ekonomik bir çözüm elde edilmektedir.

4) Bu teknikde, özellikle ön çekme yönteminde, betonun kısılmasından doğan ani kayıplar önemli derecede azalmaktadır.

5) Öngerilmeli beton ile elemanlara kazandırılan çatlamanın ve korozyonun önlenmesi gibi bir çok özellik bu teknikle daha ucuz olarak sağlanabilmektedir.

6) Bu teknikde donatıların yorulma riski öngerilmeli beton yapı tekniğinkinden daha düşüktür.

Tarih sırasına göre, betonarme, öngerilmeli beton ve kısmen öngerilmeli beton yapı tekniklerinin doğduğu bilinmektedir. Bu tekniklerden birinin diğerinin yerini alması mümkün değildir. Her teknik kendi koşullarında kullanılmış, kullanılıyor ve bu durum gelecekte de giderek daha yaygın olarak kullanılacaklarını düşündürmektedir.

Bunlardan özellikle tam öngerilmeli beton yapı tekniği yerine, adaptasyon yapabilme kapasitesine sahip olan, kısmen öngerilmeli beton yapı tekniğinin, aktif deprem kuşaklarından biri üzerinde bulunan Türkiye’de, yekpare ve prefabrike yapı elemanlarının üretiminde kullanılmasının çok daha uygun olacağı belirtilmelidir.

#### **1.5. Yüksek Başarılı Betonlar Hakkında Bazı Hatırlatmalar**

Bu başlık altında deneysel ve teorik çalışmalarımıza konu olan kirişlerin üretiminde kullanılan yüksek başarılı betonların tarihsel gelişimi, bileşimleri, üstünlükleri ve

sakıncaları, kullanım alanları, geleceği ile bu betonlar konusunda daha önce gerçekleştirilmiş olan bazı çalışmalar üzerinde durulmaktadır.

### 1.5.1. Tarihsel Gelişimi

Üretimi XIX. yüzyıl sonlarından itibaren giderek yaygınlaşan kullanılmakta olan betonun basınç dayanımını yükseltmek için gerekli araştırmalara başlanmış ve bu amaca ulaşabilmek için s/ç (kütlece su/çimento) oranının azaltılmasının gerektiği anlaşılmış ve beton dayanımını bu orana bağlayan bir takım bağıntılar geliştirilerek teknik literatürde yayınlanmıştır. Deneylerin gösterdiği ve söz konusu bağıntılara yansıtıldığı gibi s/ç oranı arttıkça dayanımın azaldığı aksi halde arttığı dünyaca kabul edilen bir gerçektir. Ancak betonun dayanım ve işlenebilirlik gibi iki temel özeliğinden vazgeçilemediğinden sadece s/ç oranını azaltmak suretiyle her iki özeliğe sahip betonu üretmenin mümkün olmadığı da bilinmektedir. Durum böyle olunca hidrasyon için gerekli karma suyuna karşılık gelen s/ç oranının altına inmeden beton dayanımını artırabilmek için bir taraftan bileşimine akışkanlaştırıcı yada süperakışkanlaştırıcı adı verilen, işlenebilirliği artıran katkı maddeleri ilave edilmiştir. Diğer taraftan, beton bileşimine, boşluk oranını da azaltmak suretiyle dayanımı artırmak için, silis dumanı gibi mineral katkıları ilave edilmek suretiyle yüksek dayanımlı betonlar üretilebilmiştir.

İşlenebilen ve dayanımları yüksek olan bu betonlar dayanıklı da olduklarından daha sonra yüksek başarımlı betonlar adını almışlardır. Bu betonların kolayca üretimi ancak 1960'lı yıllarda mümkün olabilmıştır. Gerçekten Amerika' da bu yıllarda dayanımı 40-50 MPa olan betonlar uygulamada kullanılmaya başlanmıştır [15]. 1970 ve 1980' li yıllarda dayanımı 50-70 MPa' ya ulaşan sanayi betonları üretilebildiğinden prefabrike yapıların inşası da yaygınlaşmıştır [16]. 1980 ve 1990' lı yıllarda 70-100 MPa dayanımlı betonlar, günümüzde ise laboratuvarlarda çok özel agrega, çimento ve katkıları kullanılarak 250 MPa – 280 MPa dayanımlı betonlar üretilebilmektedir [ 3,16,17].

### 1.5.2. Bileşimleri

Betonun genel olarak çimento, agrega, su ve gerekli durumlarda katkı maddeleriyle elde edilen bir yapı malzemesi olduğu bilinmektedir. Bu bileşenlerin farklı oranlarda bileşime katılmasıyla oluşan ve 28 günlük standart silindir (150mmx300mm) numune

karakteristik merkezi basınç dayanımı 50 MPa' dan küçük olan betonlar genellikle geleneksel betonlar adıyla anılmaktadır. Bunların dışında hafif ve ağır betonlar adıyla anılan bir takım özel betonların varlığı da bilinmektedir. Dayanım ve dayanıklılıkları çok yüksek olan betonlar da özel beton olmakla beraber bu iki özeliğe sahip betonlar, yukarıda da belirtilmeye çalışıldığı gibi, yüksek başarımlı betonlar olarak adlandırılmışlardır.

Burada yüksek başarımlı betonların bileşimlerinin geleneksel betonlardan farklı yanlarını belirtmek için betonun kırılma mekanizmasının hatırlatılmasının uygun olduğu düşünülmektedir. Bilindiği gibi beton bir numunenin kırılması bağlayıcı olan sertleşmiş çimento hamuru dayanımının yetersizliği, agrega dayanımının yetersizliği yada sertleşmiş çimento hamuru-agrega aderans dayanım yetersizliğinden biri yada birkaçının aynı anda ortaya çıkmasıyla meydana gelmektedir [131]. Durum böyle olunca beton dayanımını yükseltmek için agregaların yüksek dayanımlı kayalardan üretilmiş olması, bu agreganın sertleşmiş çimento hamuruyla aderansının yüksek olması, sertleşmiş çimento hamuru dayanımının yüksek olması için ise yeterli miktarda ( $400-550 \text{ kg/m}^3$ ) kaliteli çimento kullanılması, su/çimento oranının olabildiğince küçük tutulması ve betondaki boşluk oranının da en aza indirilmesi gerekmektedir. Gerçekten yüksek başarımlı betonların bileşimindeki agregalar yüksek dayanımlı, çimentolar kaliteli olduğu gibi bu betonlarda akışkanlaştırıcılar sayesinde su/çimento oranı, silis dumanı sayesinde ise boşluk oranları olabildiğince azaltılmıştır.

### **1.5.3. Yüksek Başarımlı Betonların Bazı Üstünlükleri, Sakıncaları, Kullanım Alanları ve Geleceği**

#### **1.5.3.1. Üstünlükleri**

Yüksek başarımlı betonların başlıca üstünlükleri aşağıda özetlenmektedir.

1) Daha öncede belirtilmeye çalışıldığı gibi, dayanım ve dayanıklılıkları geleneksel betonlarınkinden çok yüksektir.

2) Maliyetleri geleneksel betonlarınkine göre daha yüksek olmakla beraber, özel mühendislik yapılarının inşasında kullanıldıklarından, bu betonlarla inşa edilen yapıların toplam maliyeti çoğu zaman geleneksel betonlarla inşa edilenlerinkinden genellikle daha düşük düzeyde kalmaktadır. Zira, yüksek başarımlı betonlar çok katlı yapılardaki kolon boyutlarının küçülmesine imkan verdiğinden daha büyük yer kazanımı dolayısıyla da beton

sarfiyatının azalması ve yürürlükte bulunan yönetmeliklerdeki minimum donatının kullanılması ile donatıda ekonomi sağlamaktadır.

3) Öngerilmeli beton yapılarda kullanılmasıyla eleman boyutlarının küçülmesinden dolayı daha büyük açıklıkların, sabit yükün bedava taşınması (telafi edilmesi) suretiyle, geçilmesine imkan vermektedir.

4) Öngerilmeli beton yapı elemanlarında bu betonların kullanılmasından dolayı büzülme ve sünmeden doğan zamana bağlı öngerilme kayıpları azalmaktadır.

5) Daha önce de belirtilmeye çalışıldığı gibi, erken dayanım kazandıklarından hızlı kalıp değişimine imkan tanımakta ve bu suretle kalıpta ekonomi sağlamaktadır.

6) Donatı ile olan aderansı daha iyidir.

### 1.5.3.2. Sakıncaları

Yüksek başarımli betonların başlıca sakıncaları aşağıda özetlenmektedir.

1) Bu betonların şekildeğiştirme kapasiteleri ( $\epsilon_{cu}$ ) geleneksel betonlarınkinden daha küçüktür. Bu husus yüksek başarımli betonları daha gevrek kılmaktadır.

2) Yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılıkları daha düşüktür.

3) Birim maliyetleri daha yüksektir.

4) Geleneksel betonlara göre daha özenli bakıma ihtiyaç göstermektedirler. Zira bu betonların büzülmeleri daha fazla olduğundan katılaşma (priz) başlangıcından itibaren sulanmazlarsa çatlamak suretiyle özelliklerinin bir çoğunu kaybedebilmektedirler.

### 1.5.3.3. Kullanım Alanları ve Geleceği

Bu betonların daha önce özetlenmeye çalışılan üstünlük ve sakıncaları dikkate alındığında bunların emniyet ve ekonomi bakımından bir çok özel mühendislik yapılarında kullanılmasının daha uygun olacağı anlaşılmaktadır. Bunlardan açık deniz yapıları, limanlar, tüneller, köprüler, viyadükler, nükleer santraller, aşınmaya dayanıklı yol betonları, sanayi döşemeleri, baraj boşaltma kanalları, arıtma tesisleri, prefabrike yapılar, özel temeller, uçak alanları, ayaklı su depoları, öngerilmeli beton yapılar ve betonarme çok yüksek yapılar yüksek başarımli betonların kullanım alanlarına birer örnek teşkil etmektedir [18].



Bu betonlar üzerinde özellikle son 20 yıldan beri araştırmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. İnsanoğlunun hayal gücü ve araştırma tutkusu dikkate alındığında gelecekte de bu betonlar üzerindeki araştırmaların daha yaygın bir şekilde sürdürüleceği ve kullanım alanlarının giderek daha çok artacağı düşünölmektedir. Bugüne kadar yapılan bir çok çalışma sonucunda yüksek başarımlı betonların geleneksel betonların gelişmiş bir türü olmadığını gösterdiğinden, üretimi ve özellikleri yönünden bunları geleneksel betonların bir uzantısı olarak saymanın ve gelecekte geleneksel betonların yerini alabileceğini düşünmenin dayanıksız olduğu anlaşılmaktadır. [19]. Ancak, bu betonların üretimi, davranışı ve maliyeti gibi konularda halen bir çok problemlerinin bulunduğu da bir gerçektir. Bu nedenle daha önce de belirtilmeye çalışıldığı gibi bu betonlara ilişkin araştırmaların gelecekte de sürdürölmesi ve 21. yüzyılda yapı mühendisliğinde daha geniş bir uygulama alanı bulması beklenmektedir.

#### **1.5.4. Yüksek Başarımlı Betonlar Konusunda Daha Önce Gerçekleştirilmiş Olan Bazı Çalışmalar**

Buil ve Zelwer [20] yüksek başarımlı betonlarda dış yük altında meydana gelen gerilme dağılımı ve şekildeğiştirmelerin geleneksel betonlara göre farklı olduğunu bu nedenle geleneksel betonlara ilişkin bağıntılarının bunlar için geçerli olmadıklarını savunmaktadırlar.

Öztekın [21] basit eğilmeye maruz yüksek başarımlı betonarme kirişler üzerinde gerçekteştirilen deney sonuçlarına göre, bunlarla inşa edilen yapıların tasarımı için, bugün yürürlükte bulunan betonarme yönetmeliğinde [22] önerilen bağıntılarının bir çoğunun geçerli olmadığını belirterek, geliştirmiş oldukları eşdeğer dikdörtgen blok yardımıyla, teknik literatürde mevcut geleneksel betonlar için geçerli olan bir takım bağıntılarını bu betonlara uyarlamıştır.

Larrard ve Aitcin [23] tarafından yapılan çalışmada yüksek başarımlı betonların 28 günlük basınç dayanımlarının zamanla pratik olarak artmadığı, ancak numunelerin su içinde saklanması durumunda dayanımlarının bir miktar artacağını ortaya koymuşlardır. Bununla beraber taşınma, yerine konma ve bakımları farklı olan yapılardaki beton durumunun aynı olmayacağı açıktır. Gerçekten yapı betonları su içinde saklanamamakta, havada saklanan ve silis dumanı içeren beton dayanımlarında ilerleyen yaşlarda, dayanımın geri dönüşü adı verilen, azalma da gözlenebilmektedir. Bu araştırmacılar söz konusu azalmayı numunelerin su kürüne geç başlanması, içsel kuruma ile yüzeydeki kurumaların

dayanım azalmasına sebep olduğu düşüncesiyle su kürünü takiben beton yüzeylerin geçirimsiz bir örtüyle kaplanmasının yararlı olacağını önermektedirler.

Yüksek başarılı betonların çekme dayanımları geleneksel betonlarda olduğu gibi merkezi çekme, eğilme yada yarma deneyleri ile belirlenmektedir. Teknik literatürde eğilme ve yarma deneylerinden elde edilen çekme dayanımlarını basınç dayanımına ve merkezi çekme dayanımına bağlayan bir çok bağıntının varlığı bilinmektedir [17,22,24,25].

Akman [26] ve Tazawa [27] tarafından beton numuneler üzerinde yapılan çalışmalarda yüksek başarılı betonların katılaşmaları başlar başlamaz su içinde saklanmaları gerektiği, aksi halde bu betonların büzülmelerinin geleneksel betonlarınkinden çok daha yüksek değerler alarak aşırı çatlamalar meydana getirebileceği, suda saklanma süresinin en az 24 saat olması gerektiği, daha sonra bu numunelerin 3-7 gün süreyle suya doymun örtüler altında saklanmalarının uygun olacağı kanısına varılmaktadır.

Larrard ve Malier [28] beton numuneler üzerinde yapmış oldukları araştırmalarda yüksek başarılı betonların büzülme hızının dikkate alınması gerektiğini, kısa süreli deneylerden elde edilen bulguların karşılaştırmalarının yanıltıcı olabileceği sonucuna varmışlardır.

Pigeon [29] yüksek başarılı betonların donmaya yol açacak oranda su içermediklerini, suyun ancak saklanma sırasında emilmiş olabileceğini, bu açıdan donmaya karşı önlem almaya gerek olmadığını vurgulamaktadır. Benzer şekilde Prenchio ve Klieger [30] de ürettikleri yüksek başarılı betonların donma-çözülme dayanımlarının mükemmel olduğunu belirtmekte ve bunu beton yapısının oldukça boşluksuz olmasına bağlamaktadırlar.

Breitenbücker [31] betonarme bir yapıda betonun, içindeki boşluk ve serbest suyun hareketi sayesinde, çeliği bir oranda yangından koruduğunu, s/ç oranı 0.30 civarında olan yüksek başarılı betonların ise bu özeliğe sahip olmadığını, bu nedenle de yangına dayanıklılıklarının tartışma konusu olduğunu, bu betonların yangına dayanıklılıklarını arttırmak amacıyla karışımlarına, yüksek sıcaklıkta ergiyen ve bu suretle boşluklar, kanalcıklar oluşturarak buharın kaçmasına imkan veren, polipropilen fiberler katılmasını önermektedir.

Larrard ve Malier [28] yüksek başarılı betonların alkali agrega reaksiyonu (AAR) açısından durumunun pek açık olmadığını, Fransa ve Norveç' de yaptıkları araştırmalara göre AAR ihtimali bulunan durumlarda geleneksel betondan üstün olduğunu

söylemektedirler. Bu betonla inşa edilmiş bir köprüde yapmış oldukları incelemelerde geleneksel betona göre oldukça düşük derecede karbonatlaşma olduğunu ve yüksek başarımı betonda silis dumanının varlığı ile betonun elektrik direncinin arttığını dolayısıyla da donatı korozyonunun azaldığını savunmaktadırlar.

Malier [32] ve Swamy [33,34] yüksek başarımı betonlarda kullanılan silis dumanının çimento hamurundaki fazla suyu emerek, suyun agrega tanelerine doğru hareket etmesini önlediğini bunun da aderans bölgesinde zayıf geçiş tabakası oluşumunu engellediğini, böylece agrega-çimento hamur bağlantısının yüksek nitelikte olduğunu, oysa geleneksel betonlarda agrega-sertleşmiş çimento hamuru aderans bölgesinin zayıf olduğunu, bu bakımdan agrega dayanımının yüksek başarımı betonun özelliklerini geleneksel betondan çok daha fazla etkileyeceğini ve bu betonlarda kullanılacak agregaların çok üstün kaliteli olmak zorunda olduğunu belirtmektedirler

Üzümeri ve Özden [15] yüksek başarımı betonlardaki sünmenin geleneksel betonlardan daha az olduğunu, bunun nedenini düşük s/ç dolayısıyla da boşluk oranına bağlamaktadırlar.

Carrasquillo [25] dayanımları 50-70 MPa arasında olan yüksek başarımı betonların poisson oranlarını geleneksel betonlarınkine (0,20) eşit olarak alınabileceğini, CEB/ FIP [35] ise bu konuda fazla sayıda araştırmanın olmadığını belirterek yüksek başarımı betonların poisson oranının 0,18-0,24 arasında değiştiğini savunmaktadır.

Mugurumu ve Watanabe [36] yüksek başarımı betonların donatı-beton aderansı üzerinde gerçekleştirilen araştırmalar sonucu elde edilen mevcut bilgilerin sınırlı olduğunu belirterek, betonarme kiriş numuneler üzerinde gerçekleştirdiği çalışma sonucunda yüksek başarımı beton-donatı aderansının, geleneksel beton-donatı aderansından daha fazla olduğunu ileri sürmektedir.

Bir taraftan Ersoy ve Tankut [37] diğer taraftan Ahmad ve Shah [38] yüksek başarımı betonların gerilme-şekildeğiştirme ( $\sigma - \epsilon$ ) eğrisini analitik olarak tanımlayabilmek için beton numuneler üzerinde gerçekleştirmiş oldukları deneysel ve teorik çalışmalarda söz konusu eğrinin tepe noktasından sonraki davranışının geleneksel betonlarınkinden çok farklı olduğunu, zira eğrinin numunenin kırılmasından sonra ani bir düşüş gösterdiğini, dolayısıyla da kırılmalarının gevrek olduğunu, agrega-çimento hamuru aderansının daha iyi olması nedeniyle, aderans sökülmesinden doğan, kılcal çatlakların geleneksel betonlardakinden daha az olduğunu gözlemlemiş ve gerilme-şekildeğiştirme

diyagramının doğrusal bölümünün genellikle beton dayanımının %80-%90'ına kadar uzayabildiğini belirlemişlerdir.

Bugüne kadar yüksek başarımı betonlar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar bu betonların dayanım ve elastisite modüllerinin teknik literatürde mevcut geleneksel betonlara ilişkin bağıntılarla yaklaşık da olsa hesaplanamayacağını ortaya koymuş bulunmaktadır. [39,40,41]

Daha önce de belirtmeye çalışıldığı gibi, betonarme yapı elemanlarının dayanımlarının istenen düzeyde olmaları yeterli olmayıp, özellikle deprem etkileri altında, kendilerinden beklenen davranışı gösterebilmeleri için yeterli süneklik ve rijitliğe de sahip olmaları gerektiği bilinmektedir. Oysa yüksek başarımı betonların süneklikleri geleneksel betonlarınkinden daha az olduğundan boyutlandırmalarda bu durumun dikkate alınması kaçınılmaz olmaktadır [42,43,44,45]

### **1.6. Kısmen Öngerilmeli Yüksek Başarımı ve Geleneksel Beton Kirişler Konusunda Daha Önce Gerçekleştirilmiş Olan Bazı Çalışmalar**

Durmuş [46] döşemelerle beraber çalışan öngerilmeli beton ve kısmen öngerilmeli beton kirişlerin mekanik davranışlarının kiriş-plak sisteminin güvenliğine olan etkilerini deneysel ve teorik olarak incelemek suretiyle gerçekleştirdiği çalışmasında döşeme plakları tarafından enine sıkışmaya maruz inceleme konusu kirişlerin çatlama dayanımlarının, aktif ve pasif donatı oranı ne olursa olsun, bu etki altında olmayanlarından daima daha büyük olduğunu ve bu artışın enine etki ile doğru orantılı olarak değiştiğini, eğilmedeki kırılma dayanımlarının ise bu etki altında olmayanlarından .pasif donatı oranına bağlı olarak daha büyük olduğunu, kısmen öngerilmeli beton kirişlerin enine etkiye maruz olanlarında kırılma anındaki birim kısalmalarının bu etki altında olmayanlarından daha büyük olduğunu belirtmektedir.

Durmuş, Doğangün ve Akkurt [47] farklı öngerilme oranlarına sahip kısmen öngerilmeli beton kiriş numunelerin eğilmede göçme emniyetinin ve göçme şekildeğiştirmelerinin incelenmesine ilişkin makalelerinde çatlayan bir kesitte hesaplanan şekildeğiştirmenin ölçülene çok yakın ve betonarme kirişlerinkine benzer olmasından dolayı söz konusu kirişlerde de, kesitte yeterli miktarda pasif donatının bulunması durumunda, adaptasyon özeliğinin bulunduğunu belirtmektedirler.

Tufan [48] betonarme, öngerilmeli beton ve kısmen öngerilmeli beton yapı teknikleriyle üretilen eğilme etkisindeki kirişlerin davranışlarını karşılaştırmaktadır.

Çalışmanın bulgularına göre kısmen öngerilmeli beton kirişlerde de kırılmanın betonarme kirişlerdekine benzer olduğunu, ortalama çatlak mesafesi ve ilk çatlama momenti değerlerinin ise teorik olarak hesaplananlara yeterince yakın çıktığını belirtmektedir.

Abeles, Nilson ve Bardhan-Roy [49] tarafından yapılan, çeşitli parametreleri değişkenlik gösteren, kısmen öngerilmeli beton kirişlerin eğilmedeki davranışlarına ilişkin deneysel ve teorik çalışmalarda, geleneksel betonarme yapılarda izin verilen beton çekme gerilmesi sonucu oluşan çatlaklara aynı şekilde kısmen öngerilmeli beton yapılarda da izin verilebileceğini ortaya koymuşlardır.

Chakrabarti, Whang, Brown, Arsad ve Amezeua [50] kısmen öngerilmeli beton kirişler üzerinde yaptıkları deneysel çalışmada geleneksel ve yüksek başarılı beton kullanımı, farklı aktif ve pasif donatı oranı ile daha önce Madde 1.2.1.' de tanımlanan kısmen öngerilme göstergesi bağıntısından hesaplanan öngerilme oranı gibi parametrelerdeki değişimin söz konusu kirişlerin eğilme davranışlarına olan etkilerini incelemiştir. Bu inceleme deney kirişlerinde yüksek aderanslı pasif donatı kullanımının çatlak genişliklerini azalttığını, %25-%70 arasında öngerilme oranına sahip kısmen öngerilmeli yüksek başarılı beton kirişlerin dayanımlarının arttığını, aynı öngerilme oranına sahip kısmen öngerilmeli geleneksel beton kirişlerin ise dayanımlarının daha düşük, sünekliklerinin daha yüksek olduğunu göstermiştir.

Müller ve Dux [51] kısmen öngerilmeli beton kirişlere aktif donatıların doğrusal ve eğrisel yörüngeler boyunca yerleştirilmesi durumları için ayrı ayrı yorulma davranışlarını incelemek suretiyle çatlama aşamasında aktif donatıdaki şekildeğiştirmelerin hesabına yönelik özel bir bağıntı geliştirmişlerdir. Çalışmanın bulgularının irdelenmesiyle, periyodik üniform yükleme etkisindeki kirişlerin aktif donatılarının doğrusal bir yörünge boyunca yerleştirilmesi durumunda yorulmaya karşı dayanıklılıklarının, eğrisel yörünge boyunca yerleştirilenlerinkinden önemli derecede daha büyük olduğu, bu nedenle ağır kullanım yükleri altındaki kısmen öngerilmeli beton kiriş tasarımlarında aktif donatıları eğrisel yörüngeli olan kirişlerden kaçınılması gerektiği sonucuna varılmıştır. Zorunlu durumlarda aktif donatının, söz konusu yükler altında, çatlamaya izin verilen bölgeye yerleştirilmemesi gerektiği de vurgulanmıştır.

Scholz, [52] bir taraftan kısmen öngerilmeli hiperstatik beton kirişler üzerinde gerçekleştirdiği teorik çalışmada öngerilmenin sünekliğe olan etkisini araştırmış, diğer taraftan kısmen öngerilmeli beton yapı tekniğinin tasarımına ilişkin, emniyet ve ekonomi yönünden daha uygun olduğunu savunduğu, bir model geliştirilmiştir. Söz konusu modelin

geçerliliğini doğrulamak için, komple bir deneysel programın yapılması gerekliliğine de dikkat çekmiştir.

Scholz, [53] eğilme etkisindeki kısmen öngerilmeli beton kirişlerde;  $f_{ct} \rightarrow MPa$  betonun çekme dayanımını,  $\sum A_s = A_s + A_p \rightarrow mm^2$  kesitteki toplam donatı alanını,  $b \rightarrow mm$  kesitin enini,  $h \rightarrow mm$  kesitin yüksekliğini,  $w \rightarrow mm$  çatlak genişliğini göstermek üzere bu genişliğin yaklaşık olarak  $w = 0,0125 f_{ct} / \left( \frac{100 \sum A_s}{b.h} \right)$  bağıntısıyla hesaplanabileceğini önermektedir. Oysa yerli ve yabancı yönetmeliklerin tümünde çatlak genişliklerinin hesaplanması için önerilen bağıntılar Scholz' un önerdiği bağıntıdan çok daha karmaşıktır.

Chowdhury ve Wu [54] tarafından yapılan çalışmada da betonarme ve kısmen öngerilmeli beton kiriş elemanlarda kullanım yükleri altında eğilmede çekme bölgesinde oluşan çatlak açıklıklarının sınırlı kalabilmesi için sağlanması gereken koşulların belirlenebilmesi amacıyla deneysel bir programla doğrulanmış bir takım bağıntılar geliştirilmiştir.

Alkokani [55] deneysel ve teorik olarak gerçekleştirilen bu çalışmada; çeşitli aktif ve pasif donatı oranlarına sahip basit mesnetli kısmen öngerilmeli beton kirişlerin eğilmedeki davranışları incelenmiştir. Çalışma deney kirişlerinin ilk çatlama momentleri, çatlak genişlikleri ve mesafeleri, sehimleri ve öngerilme kayıpları gibi parametrelerinin belirlenmesi şeklinde yürütülmüştür. Buna göre kısmen öngerilmeli beton kirişlerdeki aktif donatının varlığı çatlama momentinin değerini arttırdığı, sehimleri ve çatlak genişliklerini azalttığı, pasif donatıların ise öngerilme kayıplarını azalttığı, söz konusu kirişlerdeki çatlak dağılımının da betonarme ve öngerilmeli beton kirişlerinkinden daha düzgün olduğu belirtilmiştir.

El Shahawi [56] deneysel ve teorik olarak yürüttüğü bu çalışmasında çeşitli öngerilme oranlarına sahip kısmen öngerilmeli beton kirişlerin çatlama ve yorulma davranışlarını incelemiştir. Yorulma davranışlarını belirlemek için yapılan deneylerde kirişler tekrarlı yüklere maruz bırakılarak çatlama ve sehimler ile pasif donatı gerilmeleri takip edilmiştir. Buna göre kısmen öngerilmeli beton kirişlerdeki sehimlerin yönetmeliklerde verilen sınır değerlerle uyum göstermediği ve deneysel çalışma çerçevesindeki eğilme etkisi altındaki tüm kirişlerde optimum öngerilme oranı değerinin %40 ile %60 arasında olduğu belirtilmiştir. Çalışmanın sonunda deneysel verilere

dayanılarak çatlak genişliklerinin hesabı için, pasif donatıdaki gerilmenin fonksiyonu olarak değişim gösteren, bir bağıntı da geliştirilmiştir.

Taerwe, [12] tarafından gerçekleştirilen teorik çalışmada, kısmen öngerilmeli beton yapı tekniği kullanılarak üretilen yapının ömrü süresince çatlamamış durumdan, çatlamış duruma defalarca yinelenen bir geçiş olduğundan bu tip yapılarda tasarım aşamasında korozyonun, yorulmanın, öngerilme kayıplarının, betonun geciken şekildeğişirmelerinin (rötre, sünme) neden olduğu kesitten kesite adaptasyonun ve pasif donatı etkilerinin mutlaka dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır. Oysa uygulamada tasarımcılar, karmaşıklığı nedeniyle, yapısal çözümlerinde özellikle adaptasyon olayını ihmal etmektedirler. Bu nedenle bu araştırmacı CEB-FIP yönetmeliğinde [57,58,59] mevcut zamana bağlı öngerilme kayıplarının hesabına ilişkin bağıntıları, adaptasyon ve pasif donatı etkilerini dikkate almak suretiyle, yeniden düzenlemiştir. Böylece kısmen öngerilmeli beton kesitlerin yeterli doğrulukla daha kolay çözümlenebilmelerini amaçlamış ve bu bağıntılarla kirişler üzerinde yaptığı hesaplamalar sonucunda kesitteki pasif donatının çatlama momentinin değerini çok önemli ölçüde arttığını göstermiştir.

Harajli, Kanj [60] kısmen öngerilmeli beton ve öngerilmeli beton kirişlerin eğilme dayanımları konusundaki deneysel çalışma sonuçlarını içeren bu çalışmada, eleman açıklığının derinliğe oranı, uygulanan yükün tipi, aktif ve pasif donatı oranı gibi çeşitli parametreler dikkate alınmıştır. Buna göre kirişlerin açıklık/derinlik oranı arttıkça aktif donatı gerilmesinin yaklaşık %35 azaldığı, çatlak dağılımının eğilme açıklığı içinde kaldığı, aktif ve pasif donatı oranlarının artmasıyla çatlak sayılarının da arttığı ve kendi çalışmalarında uygulanan yük tipinin sonuçlar üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı kanısına varmış ve çalışma sonunda, deneysel verilere dayanılarak, aktif donatıdaki gerilme değerinin hesabına ilişkin yeni bir bağıntı geliştirmiştir.

Naaman [61] basit eğilme ve merkezi basınç etkisindeki betonarme, öngerilmeli beton ve kısmen öngerilmeli beton kiriş ve kolonlarda maksimum ve minimum donatı oranları ile eğilmede aktif donatıdaki gerilmelerin hesaplanması için ACI 318-89 (Amerika Beton Enstitüsü) yönetmeliğinde [62] önerilen bağıntılar yerine yeni bir takım bağıntılar önererek yapmış olduğu karşılaştırmalar sonucunda önerdiği bağıntıların emniyetten taviz vermeden tasarımlarda kolaylık sağladığını savunmuştur.

Rao ve Dilger [63] kısmen öngerilmeli beton kirişlerin eğilme davranışlarını özellikle çatlama momenti ve sehimlerin hesabına yönelik olarak incelemiştir. Farklı araştırmacıların çeşitli çalışmalarında üretilmiş 55 adet kısmen öngerilmeli beton kirişin

deneysel sonuçlarının verilerine dayanılarak, teknik literatürde mevcut, söz konusu hesaplamalarda kullanılan 4 farklı yöntemin doğruluklarını karşılaştırma yoluyla araştırmışlardır. Buna göre Branson ve Sheikh' e [64] ait olan yöntem kısmen öngerilmeli beton elemanların ön tasarım aşamasında, Tadros, Ghali ve Meyer' e [65] ait olan yöntemin ise daha ayrıntılı ve güvenilir olduğundan, kesin tasarım aşamasında tercih edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

Rao [8] kısmen öngerilmeli beton kesitlerin seçimi ve tasarımında dayanım ve dayanıklılık özelliklerini de dikkate alarak bazı araştırmacıların daha önce ileri sürdükleri hesap yöntemleriyle [66,67,68] karşılaştırmak suretiyle uygulama kolaylığı olan ve daha az malzeme kullanımına imkan veren basit bir hesap yöntemi geliştirmiştir.

Rao ve Jayaraman [69] kısmen öngerilmeli beton kirişler üzerinde betondaki sünme ve rötre problemlerini incelemek suretiyle bu problemlerden kaynaklanan zamana bağlı şekildeğişirmelerin hesabı için bir yöntem önermişlerdir. Dayandığı ilkeler bakımından betonarme ve öngerilmeli beton için geçerli olan mevcut yöntemlere benzer olmakla beraber önerilen yöntemin daha basit olduğunu ve deney sonuçlarıyla da desteklendiğini belirtmişlerdir.

Xin ve Gilbert [70] artan yük geçmişi etkisindeki kısmen öngerilmeli beton bir kirişin geciken şekildeğişirmelerinin hesabı için deneysel ve teorik çalışmalar yapmışlar ve bu amaçla deney kirişleri uzun süre eğilme yüküne maruz bırakılmış, böylece yük geçmişi parametresini dikkate alarak betonda hem çatlama öncesi hem de çatlama sonrası sünme ve rötreden doğan etkileri incelemişlerdir. Buna göre incelemelere konu olan kirişlerin uzun süreli zamana bağlı davranışlarını doğru olarak hesaplamanın yük geçmişinin güvenilir ölçümlerle belirlenmiş olmasına bağlı olduğunu vurgulamışlardır.

Tan, Paramasivam ve Murugappan [11] kısmen öngerilmeli beton kirişlerde, betonun çatlama sonrası çekme dayanımını iyileştirmeye yardımcı olan, 30 mm boyunda, 0,5 mm çapında çelik teller kullanarak bir dizi deneysel çalışma yapmışlardır. Çelik tel donanımlı geleneksel beton kirişlerin davranışlarının incelenmesine ilişkin teknik literatürde oldukça geniş bir bilgi birikimi mevcut olmasına rağmen, çelik tel donanımlı kısmen öngerilmeli yüksek başarımli beton kirişlerin davranışları konusunda çok az bilgi mevcuttur [71,72,73,74,75,76,77]. Bu konunun ilklerinden olan Balaguru ve Ezeldin [76] kısmen öngerilmeli beton kirişlerde merkezi basınç dayanımı 62 MPa olan yüksek başarımli beton, çeşitli kısmen öngerilme göstergeleri (%0-%25-%50-%100) ve çeşitli çelik tel oranları kullanmak suretiyle incelemeler yapmışlardır. Buna göre kısmen öngerilmeli beton



kirişlerde de çelik tel kullanımının, öngerilme oranı ne olursa olsun, kiriş kesme dayanımını arttırdığı, çatlak genişliğini azalttığı, deney kirişlerinin tümünde ilk çatlakların sabit moment bölgesindeki çekme liflerinde meydana geldiği, kısmen öngerilme göstergesinin ve çelik tel oranının artmasıyla kiriş çatlama yükünün de arttığı, ancak bu kirişlerde kesme donatısı olarak çelik tel kullanımının verimli olduğunu açıklayabilmek için daha fazla çalışmanın yapılması gerektiği belirtilmiştir.

Olivier [78] Güney Afrika' da kısmen öngerilmeli beton yapı tekniği kullanılarak inşa edilmiş üç tipik yol köprüsü üzerinde köprü tasarım esaslarını dikkate alarak incelemeler yapmak suretiyle söz konusu yapı tekniğinin kullanımının bazı durumlarda öngerilmeli beton yapı tekniğine göre daha ekonomik bir çözüm olduğu kanısına varmıştır.

Khaleel [79] kısmen öngerilmeli beton köprü kirişlerinin yorulma davranışları üzerinde kısmen öngerilme göstergesini dikkate almak suretiyle yapmış olduğu incelemelerde, söz konusu kirişlerin yorulma dayanımlarının artırılabilmesi için gösterge değerinin yüksek tutulması gerektiğini belirtmiştir.

Marianos [80] son yıllarda inşa edilen modern köprülerin yaklaşık %50' sinin yapımında öngerilmeli beton ve kısmen öngerilmeli beton yapı tekniğinin kullanılmış olduğunu, ancak kısmen öngerilmeli beton yapı tekniğinde çatlaklara izin verildiği için tekrarlı yükler altında elemanın yorulma ile göçme ihtimalinin arttığını hatırlatan araştırmacı çalışmasında yalnızca eğilmedeki yorulma davranışını dikkate almak suretiyle trafik yükü taşıyan kısmen öngerilmeli beton köprü kirişlerinin bu yük altındaki davranışının analitik bir modellemesini yapmıştır. Yapılan bu modellemede betonun sünme ve rötresinden doğan geciken şekildeğiştirmelerinin kiriş davranışları üzerindeki etkilerini de dikkate almıştır.

Teng ve Branson [81] bu çalışmada kısmen öngerilmeli beton kiriş davranışlarını, eğilme etkisindeki elemanlarda hesaplamaları zor olduğundan tasarım aşamasında genellikle ihmal edilen, çatlaklar ile ani ve geciken şekildeğiştirmeleri dikkate almak suretiyle incelemişler ve deneysel verilerle de desteklenen yeni sayılabilecek bir yöntem geliştirmişlerdir. Betonun çekme dayanımını, çatlağın gelişmesini ve kesitteki pasif donatı etkilerini de içeren bu yöntemin kolayca uygulanabilir olduğunu da belirtmişlerdir.

## 1.7. Bu Çalışmanın Amaç ve Kapsamı

Bu çalışmanın temel amacı; salt eğilme etkisindeki kısmen öngerilmeli yüksek başarılı beton kirişlerin dayanım, şekildeğiştirme ve çatlama durumlarını geleneksel betonlarla üretilenlerinkiyle karşılaştırmalı olarak, teorik ve deneysel yöntemlerle, inceleyerek optimum öngerilme oranını belirlemek ve böylece aktif deprem kuşağında bulunan Türkiye’ de öngerilmeli beton yekpare ve prefabrike yapı elemanları yerine daha çok, süneklik özeliğine sahip olduğundan adaptasyon da yapabilen, kısmen öngerilmeli beton yekpare ve prefabrike yapı elemanlarının üretimine geçilmesi için katkıda bulunmaktan ibarettir.

Bu amaçla gerçekleştirilen bu çalışma yüksek başarılı ve geleneksel betonlar kullanılarak üretilen beton, betonarme, kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerin salt eğilme etkisindeki davranışlarının karşılaştırmasını kapsamakta ve üç bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, genel bilgiler başlığı altında kısmen öngerilmeli beton yapı tekniğinin tarihsel gelişimi ve kullanım alanları, öngerilme düzeyi için önerilen bazı bağıntılar, kısmen öngerilmeli beton yapı tekniğinin üstünlükleri ve geleceği, yüksek başarılı betonlar hakkında bazı hatırlatmalar, kısmen öngerilmeli yüksek başarılı ve geleneksel beton kirişler konusunda daha önce gerçekleştirilmiş olan bazı çalışmalar üzerinde durulmaktadır.

İkinci bölümde, çalışmalarımıza konu olan kirişlerin üretiminde kullanılan yüksek başarılı ve geleneksel betonların yapımı ve özellikleri açıklanmakta ve bunu takiben bu betonlarla üretilen beton, betonarme, kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerin davranışları incelenmekte ve elde edilen bulgular irdelenmektedir.

Üçüncü bölümde, çalışmanın bütününden çıkartılabilen bazı sonuçlar ve öneriler özetlenmektedir. Bu son bölümü kaynaklar listesi izlemektedir.

## 2.YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME

### 2.1. Çalışmamıza Konu Olan Kirişlerde Kullanılan Betonların Üretimi ve Özellikleri.

#### 2.1.1. Yüksek Başarımlı ve Geleneksel Beton Üretimi

Bu başlık altında Doğu Karadeniz bölgesi kayaçlarının birinden elde edilen agreganın özellikleri verilmekte ve özellikleri bilinen bu agreganın ile üretilen yüksek başarımlı ve geleneksel betonların özellikleri üzerinde durulmaktadır.

##### 2.1.1.1. Kullanılan Agreganın Özellikleri

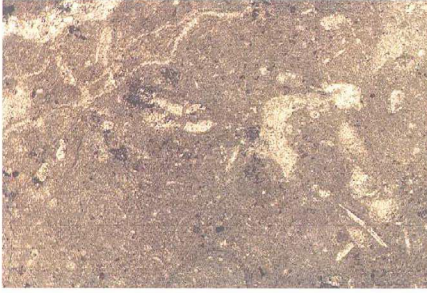
###### 2.1.1.1.1. Petrografik ve Mineralojik Özellikler

Yüksek başarımlı ve geleneksel betonların üretiminde kullanılan agreganın Trabzon ili, Maçka ilçesi, Meryemana yöresinden temin edilen kalker kayaçlarından elde edilmiştir.

Arazi çalışmaları sonucunda Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı ve Malzeme laboratuvarına getirilen kalker kayaçlarının ince kesitleri üzerinde, Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nde, yapılan incelemelerle belirlenen petrografik ve mineralojik bileşimi Çizelge 2.1'de, ince kesitlerin petrograf mikroskobu kullanılarak 50 kat büyütme oranıyla çekilmiş fotoğrafı ise Şekil 2.1'de verilmektedir.

Çizelge 2.1. Agreganın üretiminde kullanılan kalker kayacının mineralojik bileşimi [82].

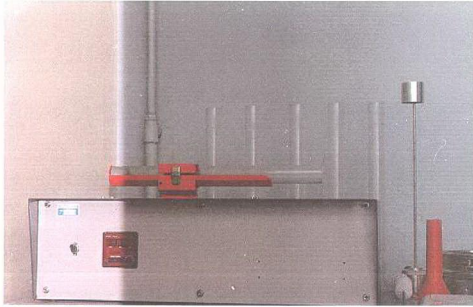
Kayaç Tipi	Mineral Türü	Mineralin kayaç içindeki durumu	Mineral yüzdesi(%)
<b>KALKER</b>	Kalsit	Mikritik çimentolu kireçtaşı, Kısmen yaşlı mikrofosiller	99,50
	Opak	-	0,50



Şekil 2.1. Kalker kayacının tipik ince kesiti

#### 2.1.1.1.2. Fiziksel Özellikler

Betonların üretiminde kullanılan agregalar bloklar halindeki kayalardan konkasörle kırılmak suretiyle elde edildikten sonra, özellikleri TS 1226 [83] ve TS 1227' de [84] verilen elek sistemiyle, TS 706' ya [85] uygun olarak, en büyük tane çapı 16 mm olacak şekilde sınıflandırılmıştır. Bu agregaların ince ( $\leq 4\text{mm}$ ) ve iri ( $>4\text{mm}$ ) kısımları üzerinde TS 3526 [86] ve TS 3529' a [87] göre yapılan deneylerle belirlenen, gevşek birim kütle, doymun ve kuru haldeki özgül kütle (tane birim kütlesi), kütlece su emme yüzdesi ve laboratuvarıda mevcut Kum Eşdeğerliği (ES) deney düzeneğiyle (Şekil 2.2), TS 8537' ye [88] göre, belirlenen agrega yüzey kirliliğini gösteren görünün kum eşdeğerliği (ESV) gibi, bazı fiziksel özellikler aşağıdaki Çizelge 2.2' de verilmektedir.



Şekil 2.2. Kum eşdeğerliği deney düzeneği

Çizelge 2.2. Bu çalışmaya konu olan yüksek başarılı ve geleneksel betonların üretiminde kullanılan agreganın bazı fiziksel özellikleri [82].

Agrega Tipi	Tane Boyutu (mm)	Gevşek Birim Kütle (kg/m <sup>3</sup> )	Özgül Kütle (kg/m <sup>3</sup> )		Kütlece Su Emme (%)	ESV (%)
			Kuru	Doymun		
KALKER	İri (>4mm)	1400	2658	2670	0.42	80
	İnce (≤4mm)	1450	2626	2640	0.52	

### 2.1.1.1.3. Mekanik Özellikler

Betonların üretiminde kullanılan agreganın basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, elastisite modülü ve Poisson oranı gibi mekanik özellikleri bu agregaların üretiminde kullanılan kayalardan alınan, çap ve yüksekliği sırasıyla 75 mm ve 150 mm olan karot ve 40mm x 40mm x 160mm boyutlarında kesilerek elde edilen prizmatik numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneyler yardımıyla belirlenmiştir. Bu belirlemede, karot numuneler üzerine enine ve boyuna doğrultuda yerleştirilen, aktif boyları 20 mm olan TML-PL20 tipi birim şekildeğiştirme ölçerleri (strain-gauge) ve 12 kanallı 30500.10<sup>-6</sup> birim uzama, 29500.10<sup>-6</sup> birim kısalma ölçme kapasiteli, ve ölçüm hassasiyeti 5.10<sup>-6</sup> olan mikro şekildeğiştirmeleri ölçebilen Wheatstone köprüsü (Şekil 2.3), basınç dayanımının belirlenmesinde 600 kN kapasiteli üniversal deney aleti kullanılmıştır (Şekil 2.4). Prizmatik kayaç numunelerin eğilmede çekme dayanımının belirlenmesinde ise TS 3285'e [89] göre orta noktasından tekil yüklü basit giriş prensibiyle çalışan deney aleti kullanılmıştır (Şekil 2.5).

Agreganın üretiminde kullanılan kalker kayacından alınan karot ve prizmatik numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen ortalama basınç, eğilmede çekme dayanımlarıyla, elastisite modülü ve poisson oranı Çizelge 2.3' de verilmektedir.

### 2.1.1.1.4. Agreganın Granülometrik Bileşimi

Yüksek başarılı ve geleneksel betonların üretiminde kullanılan agreganın granülometri eğrisi ve bileşimi Şekil 2.6' da verilmektedir.



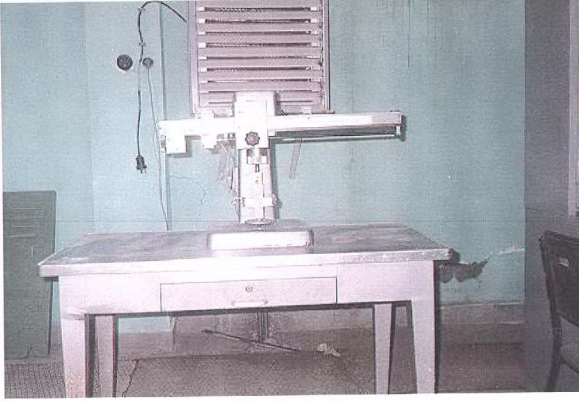
Şekil 2.3. Birim şekildeğiştirme ölçeri ve 12 kanallı Wheatstone köprüsü



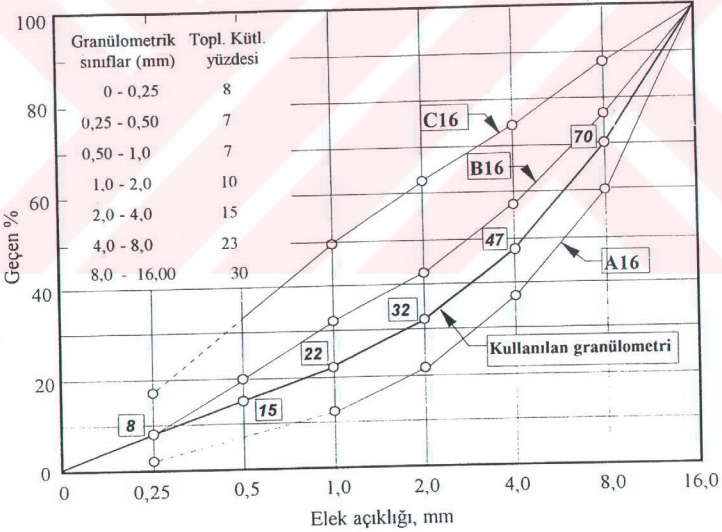
Şekil 2.4. Ünlversal deney aleti

Çizelge 2.3. Yüksek başarılımlı ve geleneksel betonların üretiminde kullanılan agreganın bazı mekanik özellikleri [82].

Kayaç Tipi	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa) (Kayaçtan alınan $\varnothing=75\text{mm}$ , $h=150\text{mm}$ boyutlarındaki karot numuneler üzerinde)	Eğilmede Ortalama Çekme Dayanımı(MPa) (Kayaçtan kesilen $40\text{mm}\times 40\text{mm}\times 160\text{mm}$ boyutlarındaki prizmatik numuneler üzerinde)	Ortalama Elastisite modülü (MPa)	Ortalama Poisson Oranı
KALKER	74	17	46000	0,17



Şekil 2.5. Eğilmede çekme dayanımının belirlenmesinde kullanılan deney aleti



Şekil 2.6. Yüksek başarımlı ve geleneksel betonların üretiminde kullanılan agreganın granülometri eğrisi ve bileşimi

### 2.1.1.1. Kullanılan Çimento ve Katkı Maddesinin Özellikleri

Yüksek başarımlı betonların üretiminde Ünye Çimento Fabrikası' nda TS 19' a [90] göre üretilen PÇ42.5 çimentosu, geleneksel betonların üretiminde ise, TS10156' ya [91] göre üretilen KÇ32.5 çimentosu kullanılmıştır. Özelliklerinin deneysel çalışmalar boyunca aynı kalmasını sağlamak amacıyla kapalı naylon torbalar içinde saklanan bu çimentoların, fabrikalarından alınan, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 2.4' de verilmektedir.

Çizelge 2.4. Yüksek başarımlı ve geleneksel beton üretiminde kullanılan çimentoların fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel Özellikler		Çimento Türü	
		PÇ 42.5	KÇ32.5
Özgül Kütle (g/cm <sup>3</sup> )		3.10	3.03
Blaine Özgül Yüzey (cm <sup>2</sup> /g)		3666	3349
200 µ elek üstünde kalan (%)		0.00	0.00
90 µ elek üstünde kalan (%)		1.10	3.20
Priz süresi (saat) (Vicac İndisi)	Başlangıç :	2:35	2:00
	Bitiş :	4:00	3:15
Toplam Hacim Genişlemesi (mm)		1.00	0.00
Mekanik Özellikler			
2. gün	Eğilme Dayanımı (MPa)	5.60	3.80
	Basınç Dayanımı (MPa)	28.9	19.3
7. gün	Eğilme Dayanımı (MPa)	7.30	5.30
	Basınç Dayanımı (MPa)	43.6	29.3
28. gün	Eğilme Dayanımı (MPa)	8.50	7.3
	Basınç Dayanımı (MPa)	52.9	41.3

Yüksek başarımlı betonların üretiminde, Kocaeli' ndeki Kar Beton A:Ş' den temin edilen, yaklaşık elek analiz sonuçları, kimyasal bileşimi ve birim hacim kütlesi Çizelge 2.5' de verilen, silis dumanı (hafif mikro silis) ile Sikament FF adıyla anılan süperakışkanlaştırıcı beton katkı maddeleri kullanılmıştır.



Çizelge 2.5. Yüksek başarımlı beton üretiminde kullanılan silis dumanının yaklaşık elek analiz sonuçları, birim kütle ve kimyasal bileşimi

Elek Analiz Sonuçları	
Kullanılan Elek Takımı Gözenek Açıklıkları (mm)	Elek Üstünde Kalan Yaklaşık (%)
0.500	0.00 - 0.50
0.250	1.00 - 2.50
0.125	1.50 - 2.50
0.074	2.50 - 7.50
0.044	3.00 - 7.00
0.038	80.00 - 92.00
Birim Hacim Kütle (gr/cm <sup>3</sup> )	
0.15 – 0.40	
Kimyasal Bileşimi	
Bileşenler	Kütlece Yüzdesi (%)
SiO <sub>2</sub>	75.00 - 86.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.20 - 2.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.50 - 4.50
CaO <sub>3</sub>	1.00 - 2.00
MgO <sub>3</sub>	4.00 - 7.00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.50 - 4.00
Kızdırma Kaybı	1.00 - 3.50
Serbest Karbon (C)	1.00 - 1.50

### 2.1.1.3. Kullanılan Karma Suyu Özellikleri

Betonların karılmasında kullanılan Karadeniz Teknik Üniversitesi yerleşkesi (kampüsü) içme suyunun Kimya Bölümü laboratuvarında belirlenen kimyasal analiz sonuçları aşağıdaki Çizelge 2.6' da verilmektedir.

Çizelge 2.6. Yüksek başarımlı ve geleneksel betonların karılmasında kullanılan suyun kimyasal özellikleri

Bileşenler	Miktarlar (mg/l)
Na <sup>+</sup>	50.00
K <sup>+</sup>	0.80
Ca <sup>+2</sup>	100.80
Mg <sup>+2</sup>	6.72
Fe <sup>+3</sup>	3.00
Cl <sup>-</sup>	125.00
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	45.00
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	210.00
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	9.50
Toplam katyon m.e.g. sayısı	7.9
Toplam anyon m.e.g. sayısı	8.1

#### 2.1.1.4. Yüksek Başarımlı ve Geleneksel Betonların Bileşimi

Yüksek başarımlı ve geleneksel betonların bileşim hesaplarında TS802' de [92] verilen mutlak hacim yöntemi kullanılmıştır. Buna göre,  $W_c$ ,  $W_a$ ,  $V_w$  ve  $V_h$  sırasıyla yerine konmuş bir  $m^3$  betondaki çimento kütlelerini ( $kg/m^3$ ), agrega kütlelerini ( $kg/m^3$ ), su hacmini ( $dm^3$ ) ve hapsedilmiş hava hacmini ( $dm^3$ ),  $\gamma_c$  ve  $\gamma_a$  ise yine sırasıyla çimento ve agreganın doymun kuru yüzeyli (DKY) özgül kütlelerini ( $kg/m^3$ ) göstermek üzere agrega mutlak hacmi;

$$V_a = \frac{W_a}{\gamma_a} = 1000 - \left( \frac{W_c}{\gamma_c} + V_w + V_h \right) \quad (2.1)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Agreganın  $i$  adet ayrı agrega sınıfından meydana geldiği dikkate alındığında her bir agrega sınıfının kütlesi farklı olacağından  $\beta_i$  ve  $\gamma_{ai}$  sırasıyla her bir agrega sınıfının kütlece oranını ve DKY özgül kütlelerini göstermek üzere toplam agrega kütlesi, (2.1) bağıntısı yerine,

$$\sum_{i=1}^n \left( \beta_i \frac{W_a}{\gamma_{ai}} \right) = 1000 - \left( \frac{W_c}{\gamma_c} + V_w + V_h \right) \quad (2.2)$$

bağıntısıyla daha hassas olarak belirlenebilmektedir.

Görüldüğü gibi bu son bağıntıdan hesaplanan toplam agrega kütlesi her bir agrega sınıfının kütlece oranı ile çarpıldığında ( $W_{ai} = \beta_i \cdot W_a$ ) her bir agrega sınıfının kütleleri elde edilmektedir. Bu şekilde belirlenen agrega kütleleri, doymun kuru yüzeyli agrega kütleleridir. Bu değerlerden doğal nem durumundaki agrega kütlesi değerlerine geçmek için ise; SE ve DN, sırasıyla agreganın kütlece su emme ve doğal nem oranlarını göstermek üzere,

$$DS = (SE - DN) W_a \quad (2.3)$$

bağıntısıyla hesaplanan doymun suyu miktarını ( $kg/m^3$ ), (2.1) bağıntısıyla belirlenen  $W_a$  değerinden çıkartmak gerekmektedir. Agrega kütlesi (2.2) bağıntısıyla hesaplandığı takdirde, doymun suyunun da buna bağlı olarak her bir agrega tane sınıfı için hesaplanması, dolayısıyla da toplam doymun suyu miktarının;

$$DS = \sum [(SE)_i - (DN)_i] W_{ai} \quad (2.4)$$

bağıntısıyla hesaplanmasının gereği açıktır.

Yukarıda açıklanan ilkeler doğrultusunda, geleneksel beton için su/çimento oranı 0.50 ve çimento miktarı  $350 \text{ kg/m}^3$ , yüksek başarımlı betonlar için ise, su/çimento oranı 0.30, çimento miktarı  $500 \text{ kg/m}^3$  alınarak, hesaplanan beton bileşimleri aşağıdaki Çizelge 2.7' de verilmektedir. Yüksek başarımlı beton bileşimlerinde ilave olarak, kütlece çimentonun %10' u oranında silis dumanı ve kütlece (çimento + silis dumanı)'nın, %3' ü oranında süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Her iki beton için bir  $\text{m}^3$  betondaki hapsedilmiş hava miktarı  $15 \text{ dm}^3$  olarak kabul edilmiştir.

Çizelge 2.7. Deney kırımlarının üretiminde kullanılan yüksek başarımlı ve geleneksel betonların bileşimleri

Bileşenler	Beton Tipi	
	Yüksek Başarımlı Betonda ( $\text{kg/m}^3$ )	Geleneksel Betonda ( $\text{kg/m}^3$ )
Agrega	1794	1849
Doyma Suyu (DS)	11.74	12.10
Su (S)	150	175
Çimento (Ç)	500	350
Silis Dumanı (SD)	50	-
Akışkanlaştırıcı	16.5	-

### 2.1.1.5. Betonların Üretimi, Saklanması ve Deney Anındaki Yaşları

#### 2.1.1.5.1. Betonların Üretimi

Beton üretimi için her bir sınıf agrega tartılarak, laboratuvarında mevcut önceden nemlendirilmiş, 60 litre kapasiteli eğik eksenli betoniyere konmuş ve doyma suyu ilave edilerek 3 dakika, daha sonra çimento ilavesiyle 3 dakika, bunu takiben betoniyer hiç durdurulmadan karma suyu ilave edilerek bir üç dakika daha karılmıştır. Yüksek başarımlı betonların üretiminde kullanılan silis dumanı çimentoya, süperakışkanlaştırıcı ise karma suyuna ilave edilmek suretiyle betoniyere konulmuştur. Bu şekilde hazırlanan betonlar, frekansı 2800 dev/dak. olan titreşim tablası üzerine yerleştirilen, 150mm çapında, 300mm

yüksekliğindeki standart silindir kalıplara her tabakası 15 saniye titreştirilerek üç aşamada yerleştirilmiştir.

### 2.1.1.5.2. Betonların Saklanması ve Deney Anındaki Yaşları

Üretildikten bir gün sonra kalıplarından çıkarılan beton numuneler, sıcaklığı  $22\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  olan kür havuzunda 21 gün, bu süre sonunda deney anına kadar, sıcaklığı  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve bağıl nemi  $\%75 \pm \%5$  olan, laboratuvar ortamında saklanmış ve 28. günde bir eksenli basınç deneyine tabi tutulmuşlardır.

### 2.1.1.6. Kullanılan Betonların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

#### 2.1.1.6.1. Fiziksel Özellikler

Çalışmalarımıza konu olan yüksek başarımlı ve geleneksel betonların kuru ve doymun kuru yüzeyli (DKY) birim kütleleri aşağıdaki Çizelge 2.8' de verilmektedir.

Çizelge 2.8. Yüksek başarımlı ve geleneksel betonların kuru ve doymun kuru yüzeyli (DKY) birim kütleleri

Birim Kütleler	Yüksek Başarımlı Betonda ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Geleneksel Betonda ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
Kuru Birim Kütle	2350	2300
DKY Birim Kütle	2465	2415

#### 2.1.1.6.2. Mekanik Özellikler

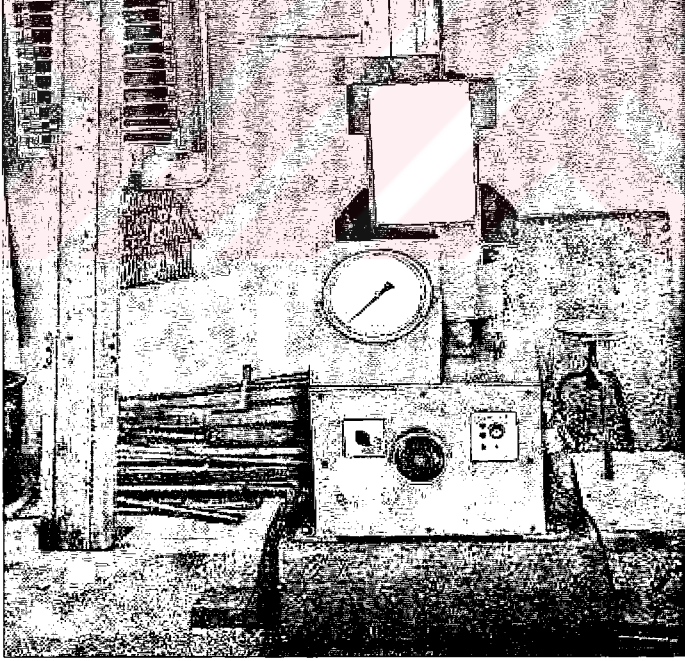
##### 2.1.1.6.2.1. Merkezi Basınç Dayanımları

Betonların standart silindir numuneler üzerinde, 3000 kN kapasiteli hidrolik pres (Şekil 2.7) kullanılarak, pratik olarak  $0.15\text{ MPa/s.}$  sabit yükleme hızıyla, gerçekleştirilen merkezi basınç deneyinden elde edilen ortalama ve karakteristik basınç dayanımları, elastisite modülü, doğrusal davranış bölgesindeki poisson oranı ve dayanıma karşılık gelen birim kısalmaları ( $\epsilon_{co}$ ) gibi mekanik özellikleri, agregaların üretiminde kullanılan

kayaçlardan alınan karot numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesine benzer olarak, saptanmıştır (bkz. Madde 2.1.1.1.3). Ancak, bu deneylerde, kayaç karotlardan farklı olarak, beton numuneler üzerine aktif boyları 90 mm olan TML-PL90 tipinde birim şekildeğiştirme ölçerleri yapıştırılmıştır. Bu betonların söz konusu mekanik özellikleri Çizelge 2.9' da verilmektedir.

Çizelge 2.9. Betonların, standart silindir ( $\varnothing = 15$  mm,  $h = 300$  mm) numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerle belirlenen, bazı mekanik özellikleri

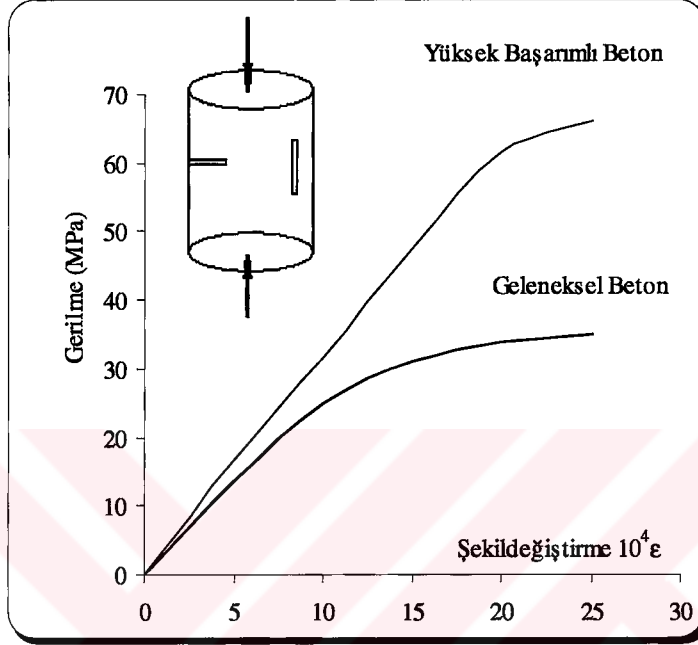
Mekanik Özellikler	Yüksek Başarımlı Betonda	Geleneksel Betonda
Ortalama basınç dayanımı (MPa)	66	35
Karak. basınç dayanımı (MPa)	61	33.60
Elastisite modülü (MPa)	31000	27000
Poisson oranı	0.22	0.20
$10^3 \epsilon_{co}$	2.42	2.30



Şekil 2.7. Betonların bir eksenli merkezi basınç dayanımlarının belirlenmesinde kullanılan hidrolik pres

### 2.1.1.6.2.2. Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrileri

Betonların, standart silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilen deneylerden elde edilen, gerilme-şekildeğiştirme diyagramları Şekil 2.8’ de verilmektedir.



Şekil 2.8. Yüksek başarımlı ve geleneksel betonların tipik gerilme-şekildeğiştirme diyagramları

### 2.1.1.6.2.3. Eğilme ve Yarmada Çekme Dayanımları

Yüksek başarımlı ve geleneksel betonların eğilmede çekme dayanımları, 10cmx10cmx40cm boyutlarında prizmatik elemanlar üzerinde, TS 3285’ e [89] göre yarmada çekme dayanımları ise, standart silindir ( $\varnothing = 15$  mm,  $h = 300$  mm) numuneler üzerinde, TS 3129’ a [93] göre gerçekleştirilen deneylerle belirlenmiştir [82]. Bu betonların eğilmede ve yarmada ortalama çekme dayanımları Çizelge 2.10’da verilmektedir.

Çizelge 2.10. Betonların eğilmede ve yarmada ortalama çekme dayanımları [82].

Ortalama Çekme Dayanımları	Yüksek Başarımlı Betonda	Geleneksel Betonda
Eğilmede (MPa)	6.9	6.7
Yarmada (MPa)	4.2	4.1

### **2.1.1.7. Yüksek Başarımlı ve Geleneksel Betonların Özelliklerinin Karşılaştırılması ve İrdelemeler**

Yüksek başarımlı ile geleneksel betonlar üzerinde gerçekleştirilen teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular yardımıyla yapılan karşılaştırmalar aşağıda verilmektedir.

Kalker agregası kullanılarak üretilen yüksek başarımlı ve geleneksel betonlar üzerinde fiziksel özellik deneyleri gerçekleştirilmek suretiyle kuru birim kütle ile doymuş kuru yüzeyli (DKY) birim kütle değerleri belirlenmiştir. Buna göre yüksek başarımlı betonun kuru birim kütlesi geleneksel betonunkinden %2,17 ve doymuş kuru yüzeyli birim kütlesi ise %2,07 daha büyüktür (bkz. Çizelge 2.8). Bunun; çimento dozajının yüksek olmasından, kullanılan mineral katkı maddelerinin beton içerisindeki boşlukları doldurmasından ve beton karma suyunun tümüyle hidrasyon olayına katılması nedeniyle buharlaşabilecek su miktarının az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yüksek başarımlı betonların ortalama merkezi basınç dayanımı 66 MPa olarak elde edilmiştir. Bu da giriş üretimlerimizde de kullanacağımız betonun bugün yürürlükte bulunan yönetmeliklere göre [22,94,95,96,96,97,98] yüksek başarımlı beton sınıfına girdiğini göstermektedir. s/ç oranı 0.50 olan geleneksel betonların ortalama basınç dayanımı ise; 35 MPa olarak elde edilmiştir (bkz. Çizelge 2.9). Buna göre yüksek başarımlı betonun ortalama merkezi basınç dayanımı geleneksel betonunkinden 1,89 kat daha büyük olarak elde edilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan yüksek başarımlı ve geleneksel betonların elastisite modülleri sırasıyla 31000 MPa ve 27000 MPa olarak elde edilmiştir (bkz. Çizelge 2.9). Bugün yürürlükte bulunan yönetmeliklerde betonun elastisite modülünü belirlemek için verilen bağıntılar [22,24,99,100] bu çalışmaya konu olan yüksek başarımlı betonların elastisite modülünü deneysel olarak bulunan değerden daha büyük hesaplamaktadır. Bu durum, bu bağıntıların yüksek başarımlı betonun elastisite modülünü hesaplamak için geliştirilmemiş olmasına bağlanmaktadır.

Bu çalışmaya konu olan yüksek başarımlı ve geleneksel betonların ortalama poisson oranları sırasıyla 0.22 ve 0.20 olarak elde edilmiştir (bkz. Çizelge 2.9). Bu bulgular daha önce yapılan çalışmalardan elde edilenlerle desteklenmekte [25,100] olup poisson oranları arasındaki farkın ihmal edilebilir düzeyde olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmaya konu olan yüksek başarımlı ve geleneksel betonların dayanımına karşılık gelen birim kısalması sırasıyla  $2.45 \times 10^{-3}$  ve  $2.30 \times 10^{-3}$  olarak elde edilmiştir (bkz. Çizelge 2.9).

Yüksek başarımlı betonlar üzerinde gerçekleştirilen yarma deneylerinden elde edilen çekme dayanımları, merkezi basınç dayanımlarına bağlı olarak, TS500' de [22] verilen  $f_{cts} = 0,53\sqrt{f_c}$  bağıntısıyla uyum içindedir (bkz. Çizelge 2.10).

Yüksek başarımlı betonun eğilmede ve yarmada çekme dayanımlarının geleneksel betonunkilerden sırasıyla %3 ve %2,4 daha büyük olduğu görülmektedir (bkz. Çizelge 2.10).

Bu çalışmaya konu olan yüksek başarımlı betonun gerilme-şekildeğiştirme diyagramı, geleneksel betonunkine göre çok daha dik olarak elde edilmiştir (bkz. Şekil 2.8). Söz konusu diyagram incelendiğinde yüksek başarımlı betona ait gerilme-şekildeğiştirme eğrisi betonun basınç dayanımının yaklaşık %88' ine kadar doğrusal kalmakta, geleneksel betona ait olanıkinden ise bu doğrusallık beton basınç dayanımının yaklaşık %42' sine kadar devam etmektedir. Bu durum; yüksek başarımlı betonların geleneksel betonlara göre çok daha gevrek bir kırılmaya sahip olduğunu, bu betonlarla üretilen betonarme elemanlarda yeterli sünekliğin sağlanabilmesi için geleneksel betonlara göre daha fazla sargı donatısına ihtiyaç bulunacağını göstermektedir.

## **2.2. Beton, Betonarme ve Kısmen Öngerilmeli Beton Deney Kirişleri ve Eğilme Davranışları**

### **2.2.1. Beton ve Betonarme Deney Kirişleri**

Doğu Karadeniz bölgesi kayaların birinden elde edilen agrega ile üretilen yüksek başarımlı ile geleneksel betonların fiziksel ve mekanik özellikleri daha önce Madde 2.1' de verilmişti. Burada ise bu betonlarla üretilen beton ve betonarme kirişlerin salt eğilme etkisindeki davranışları üzerinde durulmaktadır.

#### **2.2.1.1. Beton ve Betonarme Deney Kirişlerinin Özellikleri ve Donatı Planları**

Çalışmamıza konu olan deney kirişlerinin boyutları, Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı ve Malzeme Laboratuvarı' nda mevcut donanımdan ve diğer imkanlardan



yararlanabilmek amacıyla, 10cmx20cmx210cm olarak seçilmiştir. Bu kirişlerin donatı miktarları ve donatı oranları Çizelge 2.11’ de, kalıp planı ve donatıları ise Şekil 2.9’ da verilmektedir.

İlk seri deneyler, yüksek başarımlı ve geleneksel beton kirişlerin en çok zorlanan liflerindeki birim şekildeğiştirmelerin uygulanan dış yükü değişimlerini, kirişlerin üretiminde kullanılan yüksek başarımlı ve geleneksel betonların birim uzama kapasiteleri ile ilk mikro çatlağı oluşturan birim uzama ve eğilme momentinin değerini belirlemek için aktif yada pasif hiçbir donatı kullanılmayan yalnız betondan kirişler (G1veYB1) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin temel amacı ise yüksek başarımlı ve geleneksel beton kullanılarak üretilen yalnız betondan kirişlerin eğilme etkisindeki mekanik davranışlarını betonarme kirişlerinkilerle karşılaştırılması suretiyle; donatıların yüksek başarımlı ve geleneksel betonların birim uzama kapasitelerini dolayısıyla da ilk çatlama momentini değiştirip değiştirmediğini ve diğer mekanik özelliklerini denetim altında tutmaktan ibarettir.

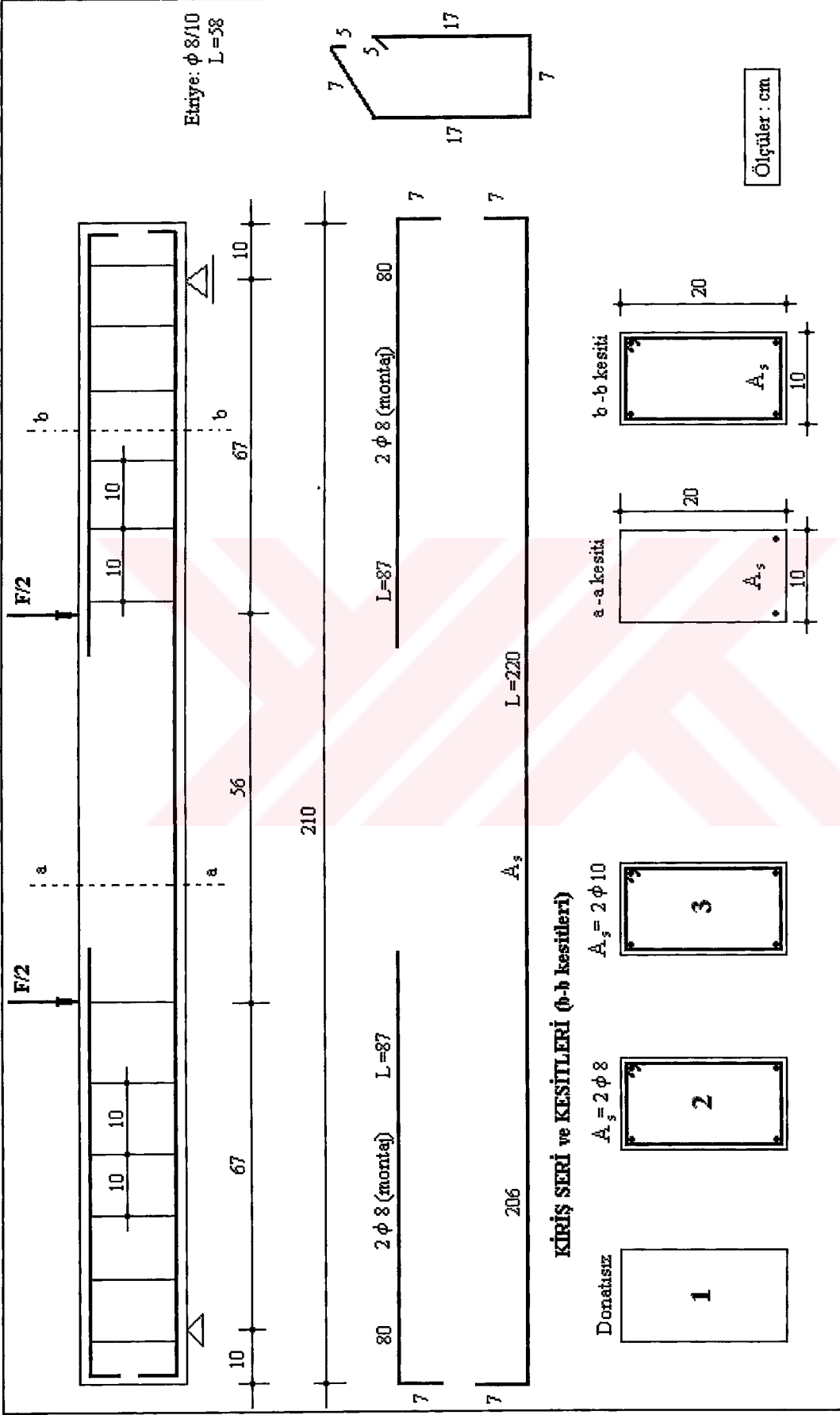
Çizelge 2.11. Deney kirişlerinde kullanılan donatı miktarları ve donatı oranları

Kiriş Serileri	Kiriş Kod ve Tipleri	Asal Çekme Donatısı ( $A_s$ )	Donatı oranı ( $\rho$ )	Kayma Bölgesindeki Etriye
1	YB1,G1	Donatısız	-	-
2	YB2,G2 (A)	2 Ø 8	0,0050	Ø8/10
3	YB3,G3 (A)	2 Ø 10	0,0079	Ø8/10

YB<sub>i</sub>; Yüksek başarımlı beton ve betonarme kirişler  
G<sub>i</sub>; Geleneksel beton ve betonarme kirişler

### 2.2.1.2. Beton ve Betonarme Deney Kirişlerinin Üretiminde Kullanılan Beton ve Donatı Özellikleri

Bu çalışmaya konu olan kirişlerin üretiminde kullanılan yüksek başarımlı ve geleneksel betonlara ilişkin özellikler ile donatı özellikleri aşağıdaki başlıklar altında verilmektedir.



Şekil 2.9. Beton ve betonarme deney kirişlerinin kalıp planı ve donatıları

### 2.2.1.2.1. Beton Özellikleri

Deney kirişlerinin üretiminde kullanılan yüksek başarımlı ve geleneksel betonların bileşimleri Madde 2.1.1.4' de, fiziksel özellikleri Madde 2.1.1.6.1' de ve mekanik özellikleri Madde 2.1.1.6.2' de verilmektedir.

### 2.2.1.2.2. Donatı Özellikleri

Farklı çaplardaki donatıların mekanik özellikleri, üzerlerine TML-YL20 tipinde şekil değiştirme ölçeri yapıştırdıktan sonra, TS 138 [101] ve TS708' e [102] göre yapılan merkezi çekme deneyleriyle belirlenmiştir. Bu deneyler yardımıyla belirlenen görünen gerilme-şekil değiştirme eğrisinden elde edilen dayanım ve birim uzama değerleri, deneye tabi tutulan donatı çubuğu enkesitinin kopma anına kadar sabit kaldığı varsayılarak, hesaplanmıştır. Bu koşullar altında belirlenen görünen gerilmeler gerçek gerilmelerden küçük, birim uzamalar ise gerçek birim uzamalardan daha büyüktür. Görünen gerilme-şekil değiştirme eğrisinden gerçek gerilme-şekil değiştirme eğrisine aşağıda verilen bağıntılar yardımıyla geçmek mümkün olmaktadır. Gerçekten de,  $A_0$  ve  $l_0$ , sırasıyla donatının ilk enkesit alanını ve ilk boyunu,  $A$  ve  $l$  aynı donatının herhangi bir  $N$  aksenal yükü altındaki enkesit alanını ve boyunu,  $V_0$  ve  $V$  ise donatının sırasıyla ilk hacmini ve  $N$  aksenal yükü altındaki hacmini göstermek üzere; şekil değiştirmeler sırasında hacim değişimi olmadığı kabulüyle;

$$A_0 \cdot l_0 = A \cdot l \quad (2.5)$$

bağıntısını yazmak mümkün olmaktadır. Bu bağıntıdan,

$$A = A_0 \cdot \frac{l_0}{l} \quad (2.6)$$

olarak elde edilir. Tanım gereği görünen gerilme;

$$\sigma = \frac{N}{A_0} \quad (2.7)$$

bağıntısıyla, gerçek gerilmeler ise,

$$\sigma_g = N/A \quad (2.8)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Bu son bağıntıda A yerine bağıntı (2.6)'daki değeri yazılarak gerekli düzenlemeler yapılır ve  $\epsilon = \Delta l/l_0$  görünen birim şekildeğiştirmeyi göstermek üzere (2.8) bağıntısı,

$$\sigma_g = \sigma(1 + \epsilon) \quad (2.9)$$

şekline gelir. Bu da, daha önce de belirtilmiş olduğu gibi, gerçek gerilmenin görünen gerilmeden daha büyük olduğunu göstermektedir. Benzer yollarla gerçek şekildeğiştirme ise,

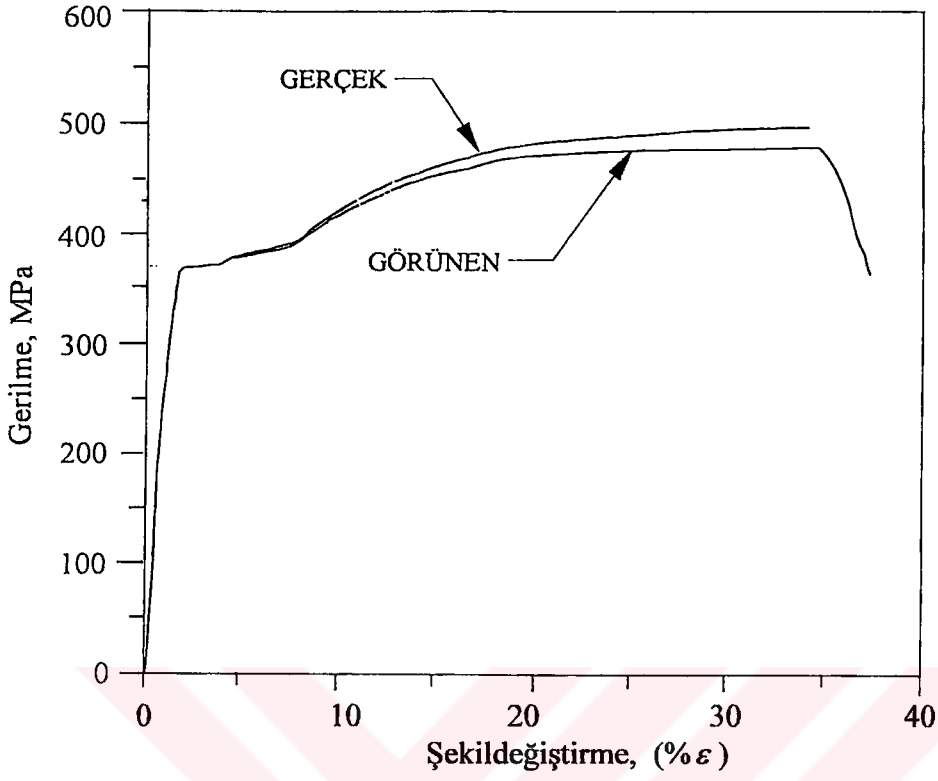
$$\epsilon_g = \ln(1 + \epsilon) \quad (2.10)$$

olarak elde edilir [103,104]. Bu ise, gerçek şekildeğiştirmelerin görünen şekildeğiştirmelerden daha küçük olduğunu göstermektedir.

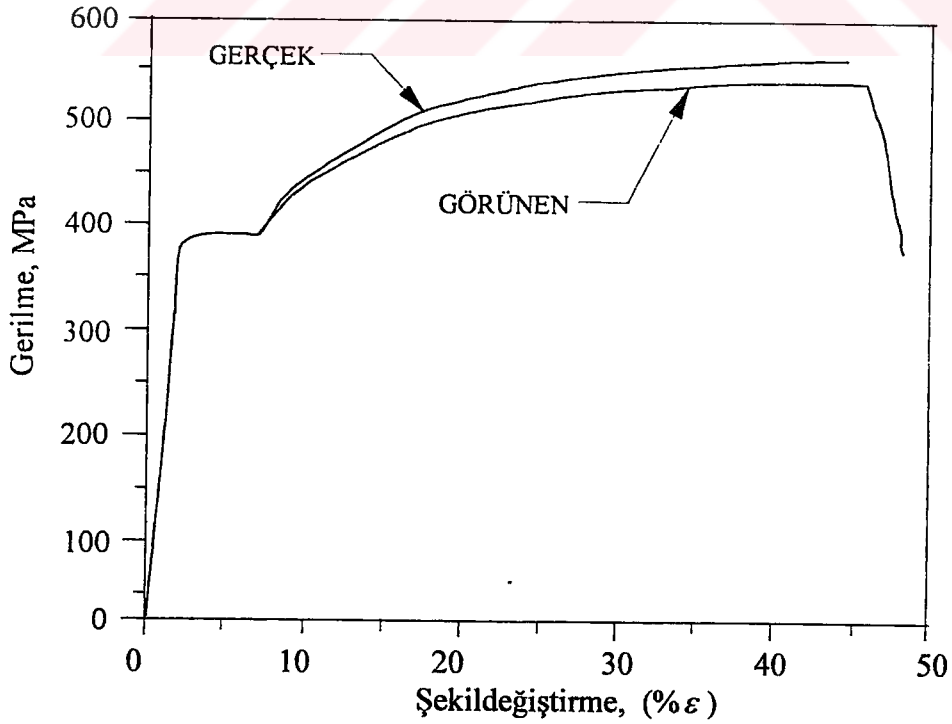
Donatı çubuklarının görünen gerilme-şekildeğiştirme ve (2.9) ve (2.10) bağıntıları yardımıyla elde edilen gerçek gerilme-şekildeğiştirme diyagramları Ø8 ve Ø10 için sırasıyla Şekil 2.10, Şekil 2.11' de, donatı çubuklarının görünen ve gerçek mekanik özellikleri ise, karşılaştırma yapmak amacıyla, Çizelge 2.12' de verilmektedir.

Çizelge 2.12. Deney kirişlerinde kullanılan nervürlü donatının görünen ve gerçek bazı mekanik özellikleri

Mekanik özellikler	Anma Çapı (mm)			
	Ø8		Ø10	
	Gör.	Ger.	Gör.	Ger.
Ortalama akma dayanımı (MPa)	355	356	363	364
Karakteristik akma dayanımı (MPa)	338	339	354	356
Hesap akma dayanımı (MPa)	294	295	308	310
Ortalama çekme dayanımı (MPa)	478	494	513	536
Karakteristik çekme dayanımı (MPa)	474	490	509	533
Ortalama kopma dayanımı (MPa)	364	814	367	895
Ortalama akma uzaması ( $10^3 \epsilon_{sy}$ )	160	159,9	180	179,8
Karakteristik kopma birim uzaması ( $\epsilon_{su}, \%$ )	24		26	



Şekil 2.10.Nervürlü donatının (Ø8) görünen ve gerçek gerilme-şekildeğiştirme diyagramları



Şekil 2.11.Nervürlü donatının(Ø10) görünen ve gerçek gerilme-şekildeğiştirme diyagramları

### **2.2.1.3. Beton ve Betonarme Deney Kirişlerinin Üretimi**

#### **2.2.1.3.1. Kalıp**

Deney kirişlerinin üretiminde kullanılan kalıplar (Şekil 2.12), üretimler boyunca şekillerinin değişmemesi için, 40 mm kalınlıklı sarı çam ahşap kullanılarak başlık kapağı ve yan kapaklar kalıp tabanına kolayca sökülüp takılabilecek şekilde geçmeli olarak düzenlenmiştir. Betonların yerleştirilmesi aşamasında kalıp eninin değişmemesi için, ayarlanabilir sıkma elemanları kullanılmıştır. Sızdırmazlığı temin edilmiş bu durumdaki kalıplara taze betonun yerleşmesini sağlamak amacıyla da iki adet vibratör yuvası monte edilmiştir.

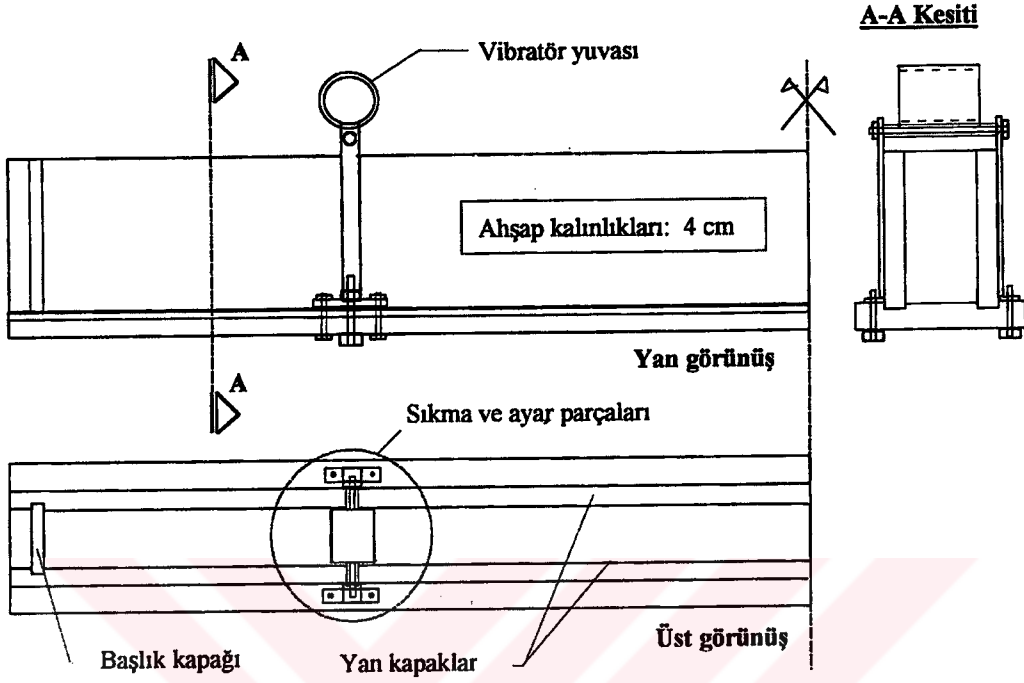
#### **2.2.1.3.2. Betonların Karılması ve Yerine Konması**

Daha önce Madde 2.1.1.5.1.' de belirtilen şekilde karılan betonlar, 15 mm' lik pas payı için altlarına belirli aralıklarla önceden hazırlanmış 15mmx15mmx15mm boyutlarında harç takozlar bağlı donatı çubukları yerleştirildikten sonra beton dökümüne hazır hale gelmiş olan, kalıplara üç aşamada yerleştirilmiştir. Bu aşamaların her birinde, taze betonu sıkıştırmak amacıyla daldırma tipi iç vibratör kullanmak suretiyle, kalıp uzunluğu boyunca her 300 mm' de bir 20 saniye süreyle vibrasyon uygulanmıştır.

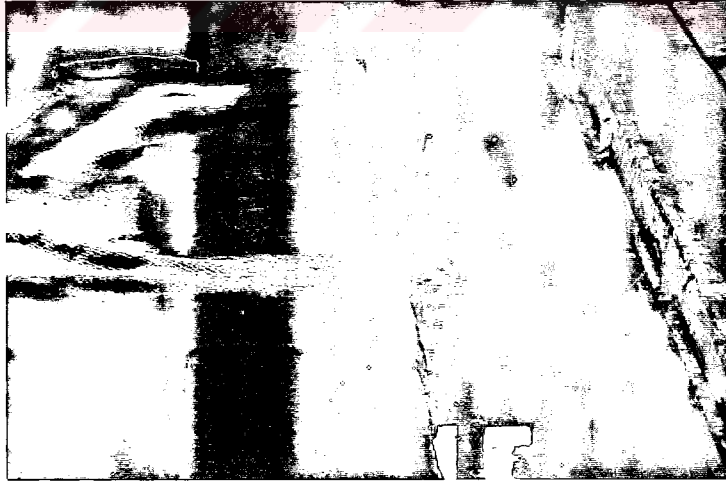
#### **2.2.1.4. Beton ve Betonarme Kirişlerin Saklanması ve Deney Anındaki Yaşları**

Deney kirişleri ve kirişlerle beraber dökülen denetim numuneleri bir gün laboratuvar ortamında kalıplarında bekletilmiştir. Geleneksel betonlarda görülen terleme yüksek başarımlı betonlarda görülmediğinden bunların bakımında bu hususa dikkat edilmiştir. Bu nedenle yüksek başarımlı beton ve betonarme kirişler, katılma sırasında ortaya çıkan büzülmenin betona zarar vermesini engellemek amacıyla, dökümlerinden en geç bir saat sonra ıslak çuvallarla örtülmüşlerdir. Üretimlerinden bir gün sonra kalıplarından özenle çıkartılan kiriş ve denetim numuneleri, 21 gün boyunca, sürekli ıslak tutulan çuvallar altında saklanmışlardır (Şekil 2.13). Bu sürenin sonunda kirişler ve denetim numuneleri, birim şekildeğiştirme ölçerlerinin kuru beton üzerine yapıştırılması gerektiğinden, sıcaklığı  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  ve bağıl nemi  $\%70 \pm \%5$  olan bir ortamda bekletildikten sonra 28 günlük iken

birim şekildeğiştirme ölçerleriyle donatılmış olan kirişler eğilme, denetim numuneleri ise bir eksenli basınç deneylerine tabi tutulmuşlardır.



Şekil 2.12. Deney kirişlerinin üretiminde kullanılan kalıba ait yan ve üst görünüşler ile kesit [82]



Şekil 2.13. Islak çuvallar altında saklanan kirişlerden bir görünüm

### **2.2.1.5. Beton ve Betonarme Kirişlerin Eğilme Deney Düzenegi**

Deney kirişlerinin yüklenmesinde kullanılan eğilme deney düzenegi, 200 kN kapasiteli hidrolik yükleme yapabilen bir verene sahip, yükleme çerçevesi ve aralarında 560 mm mesafe bulunan iki noktadan simetrik yükleme yapabilen 300 mm yüksekliğinde bir "T" profilinden hazırlanan yük dağıtma köprüsünden (palonye) meydana gelmektedir (Şekil 2.14). Görüldüğü gibi, kiriş ve yük dağıtma köprüsünün birer mesnetleri sabit diğerleri ise boyuna doğrultuda yatay yerdeğiştirmeye uygun olduğundan, yük dağıtma köprüsü mesnetleri arasında kalan kiriş orta bölgesinde oluşan kesit etkisinin salt basit eğilme olacağı açıktır.

#### **2.2.1.5.1. Ölçme Aygıtları ve Ölçüm Yerleri**

##### **2.2.1.5.1.1. Yerdeğiştirme Ölçerleri**

Eğilme deneylerinde, yükleme boyunca kirişlerin açıklık ortalarında meydana gelen yerdeğiştirmelerin belirlenmesi amacıyla 0.01 mm hassasiyetli komparatör saatleri kullanılmıştır.

##### **2.2.1.5.1.2. Şekildeğiştirme Ölçerleri**

Eğilme deneylerinde, beton ve betonarme kirişlerin en çok zorlanan liflerinde beton ve donatıdaki birim boy değişimlerinin belirlenmesi amacıyla, birim şekildeğiştirme ölçerleri (starin-gauge) kullanılmıştır. Beton süreksiz ve heterojen bir malzeme olduğundan, kiriş yüzlerine yapıştırılan birim şekildeğiştirme ölçerleriyle belirlenen birim boy değişimlerinin anlamlı olabilmesi için, aktif boylarının yapıştırılacakları betonun bileşimindeki en iri agrega tane boyutundan yeterince büyük, farklı ölçü alma noktaları arasındaki birim şekildeğiştirmelerin ölçülmesi için de söz konusu boyların yeterince küçük olması gerekmektedir. Bu iki koşulu sağlamak için, betonlarda aktif boyu 90 mm olan TML-PL90 tipi, donatılarda ise aktif boyu 20 mm ve şekildeğiştirme kapasitesi %20 olan TML-YL20 tipi birim şekildeğiştirme ölçerleri tercih edilmiştir. Bu konuda daha ayrıntılı bilgi kaynak [105,106]' da mevcuttur.

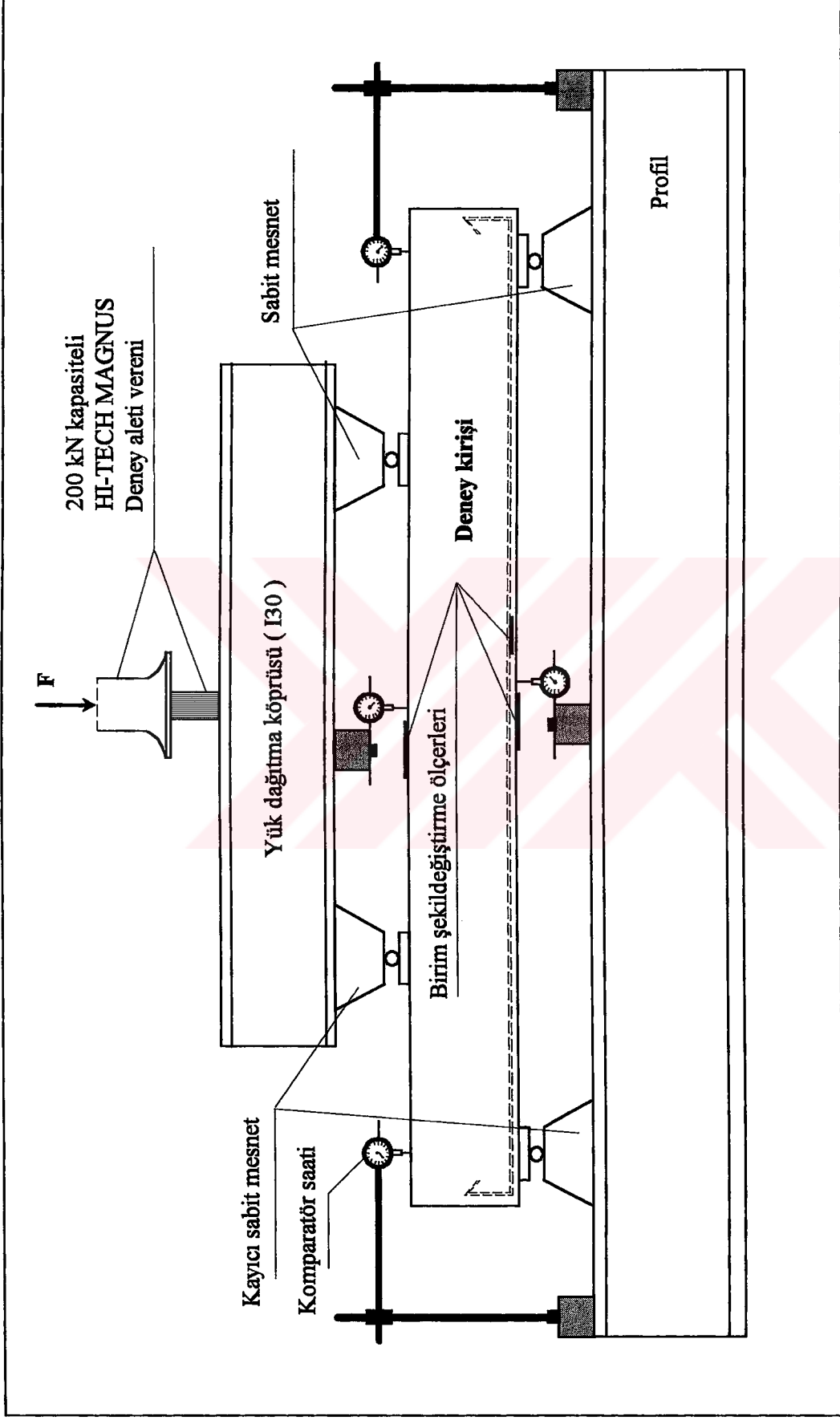


Şekildeğiştirme ölçerleri betonarme kirişlerin üst yüzlerinde sadece beton üzerine, alt yüzlerinde ise beton ve asal çekme donatılarının üzerine boyuna doğrultuda yapıştırılmıştır. İlk mikro çatlağı oluşturan maksimum birim uzama değerini belirleyebilmek amacıyla, alt yüze üst yüzden daha fazla şekildeğiştirme ölçeri yapıştırılmıştır. Bu yapıştırma işlemi, şekildeğiştirme ölçerlerinin yapıştırılacağı yerlerdeki beton yüzey pürüzlülük ve tozlardan arındırmak amacıyla spiral taş ve su zımparası kullanmak suretiyle düzgün hale getirilip yüzey alkolle de temizlendikten sonra, çabuk kuruyan TML-CN tipi bir yapıştırıcı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Birim şekildeğiştirmeler Wheatsone köprüsüne bağlı 12 kanallı aygıt (bkz. Şekil 2.3) üzerinden okunmuştur. Kirişin çekme bölgesinde beton ve donatıya yapıştırılan bu ölçerlere ilişkin bir görünüm Şekil 2.15' de verilmektedir.

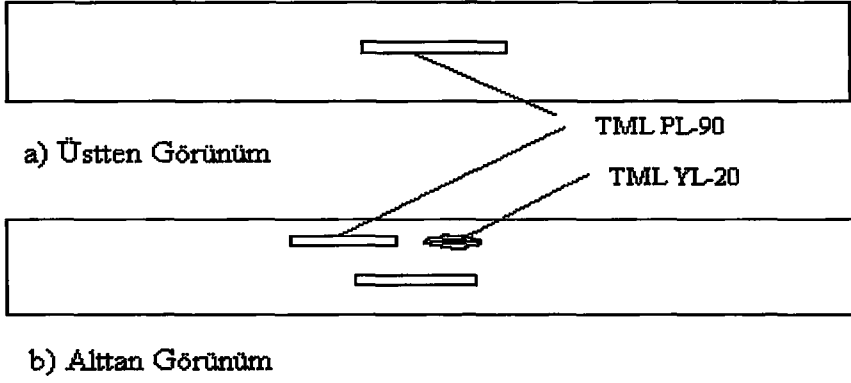
#### **2.2.1.6. Beton ve Betonarme Kirişlerin Yüklenmesi**

Deney kirişleri, özellikleri Madde 2.2.1.5' de verilen, eğilme deney düzeneğindeki yük dağıtma köprüsü (palonye) yardımıyla iki noktadan simetrik olarak yüklenmişlerdir. Kirişlerin yüklenmesi donatısız olanlarda 1 kN' luk adımlarla, donatılı olanlarda ise 20 kN' a kadar 1 kN, daha yukarı yükleme aşamalarında ise 2' şer kN' luk adımlarla, hiç boşaltma yapılmadan ardışık yüklemeler şeklinde gerçekleştirilmiştir.

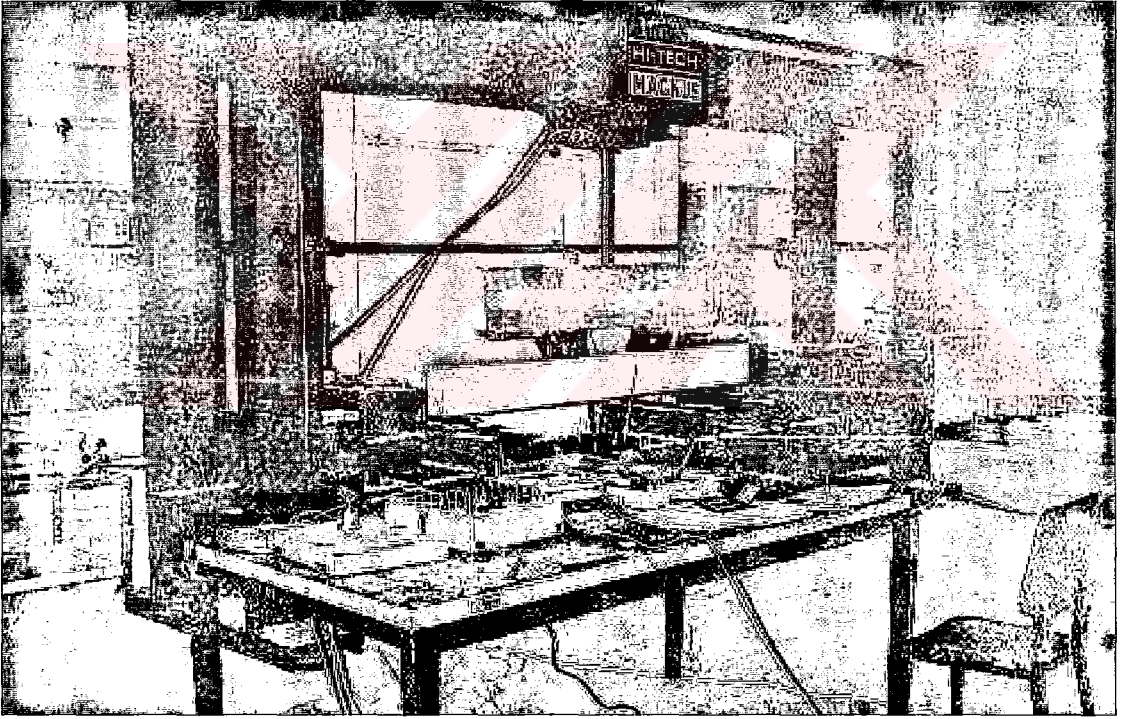
Yükleme hızı deney başlangıcında basınç gören en üst beton lifte saniyede 0,05 MPa gerilme artışı olacak şekilde seçilmiştir. Her bir deneyde, yükleme süresince en çok zorlanan liflerdeki beton ve donatı birim boy değişimlerinin, sehimlerin, yükün dolayısıyla da eğilme momentinin çatlama ve kırılma anındaki değerleri ölçülmüştür. Zira, yüksek başarılı ve geleneksel betonarme kirişlerin davranışlarının karşılaştırılması sadece kırılma ve çatlama yükleriyle değil, bütün yükleme boyunca şekildeğiştirme durumlarının karşılaştırılması suretiyle yapılmaktadır. Betonarme kirişlerin deneye hazır hale getirilmiş bir görünümü Şekil 2.16' da verilmektedir.



Şekil 2.14. Deneysel kirişlerin yüklemeye düzeni ve ölçme aygıtları



Şekil 2.15. Şekildeğiştirme ölçerlerinin kiriş çekme bölgesindeki konumları



Şekil 2.16. Betonarme kirişlerin deneye hazır hale getirilmiş bir görünümü

### 2.2.1.7. Betonarme Kirişlerin Dengeli, Kritik ve Minimum Donatı Oranları

Betonarme kirişlerin Kaynak [22]' ye göre belirlenen karakteristik ve tasarım dengeli donatı oranları ile kritik ve minimum donatı oranları aşağıdaki Çizelge 2.13' de

verilmektedir. Bu çizelgedeki karakteristik dengeli donatı oranının belirlenmesinde çalışmalarımıza konu olan beton ve donatının karakteristik dayanımları, diğer donatı oranlarının belirlenmesinde ise beton ve donatının tasarım dayanımları kullanılmıştır.

Çizelge 2.13. Deney kirişlerinin dengeli, kritik ve minimum donatı oranları

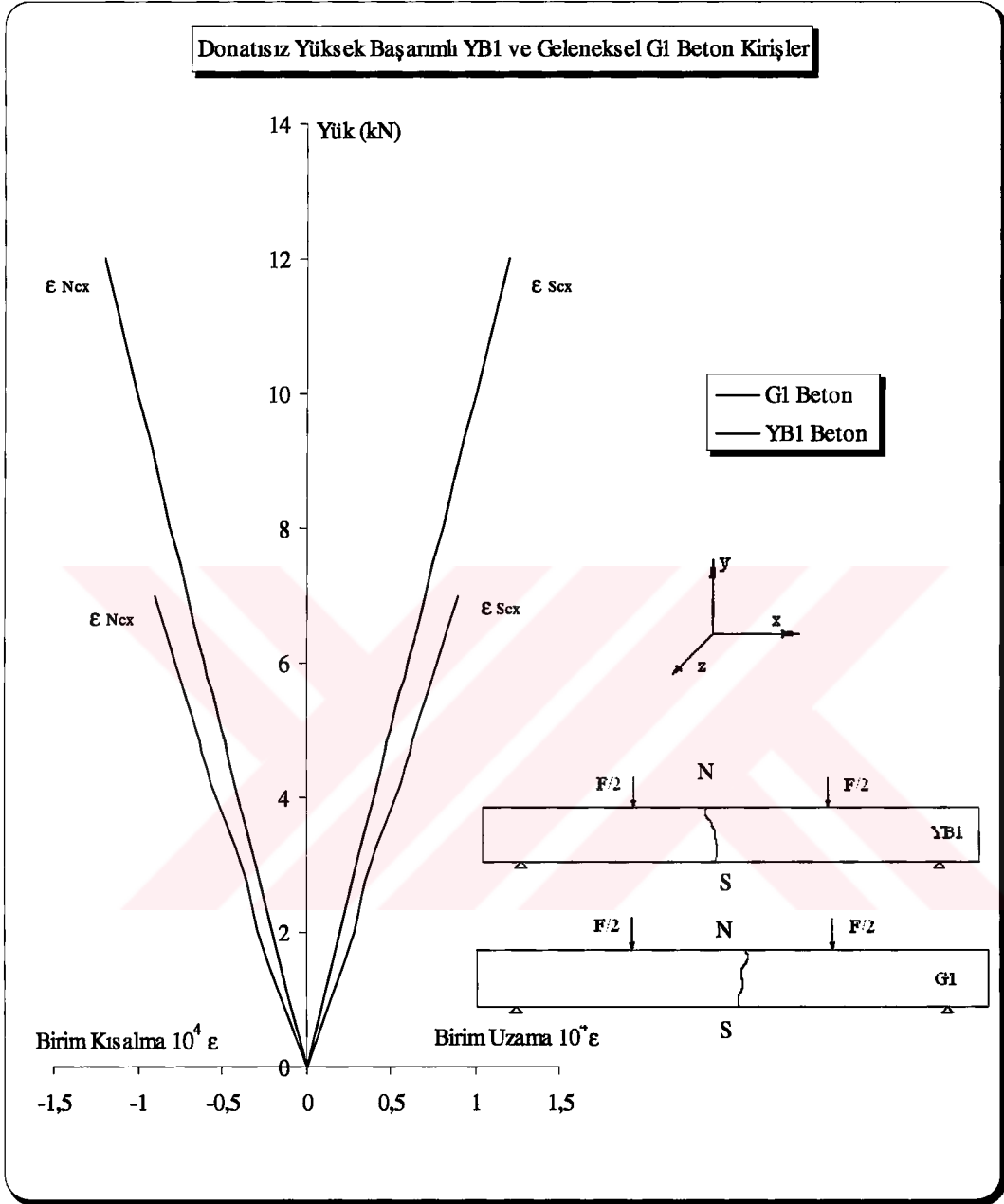
Kiriş Kod ve Tipleri	Karakteristik Dengeli Donatı Oranı ( $\rho_{bk}$ )	Tasarım Dengeli Donatı Oranı ( $\rho_{bd}$ )	Kritik Donatı Oranı ( $\rho_c$ ) $0,122 \left( \frac{\sqrt{f_{cd}}}{f_{yd}} \right)$	Min. Donatı Oranı ( $\rho_{min}$ ) $0.8 \left( \frac{f_{ctd}}{f_{yd}} \right)$
YB <sub>i</sub> (A)	0,057	0,046	0,0025	0,0048
G <sub>i</sub> (A)	0.039	0.031	0.0018	0.0035

YB<sub>i</sub> : Yüksek Başarımlı Beton Kullanılarak Üretilen Betonarme Kirişler  
G<sub>i</sub> : Geleneksel Beton Kullanılarak Üretilen Betonarme Kirişler  
(A) : Kısmen Öngerilme Oranı (PPR) %0' a Karşılık Gelen Betonarme Kirişler

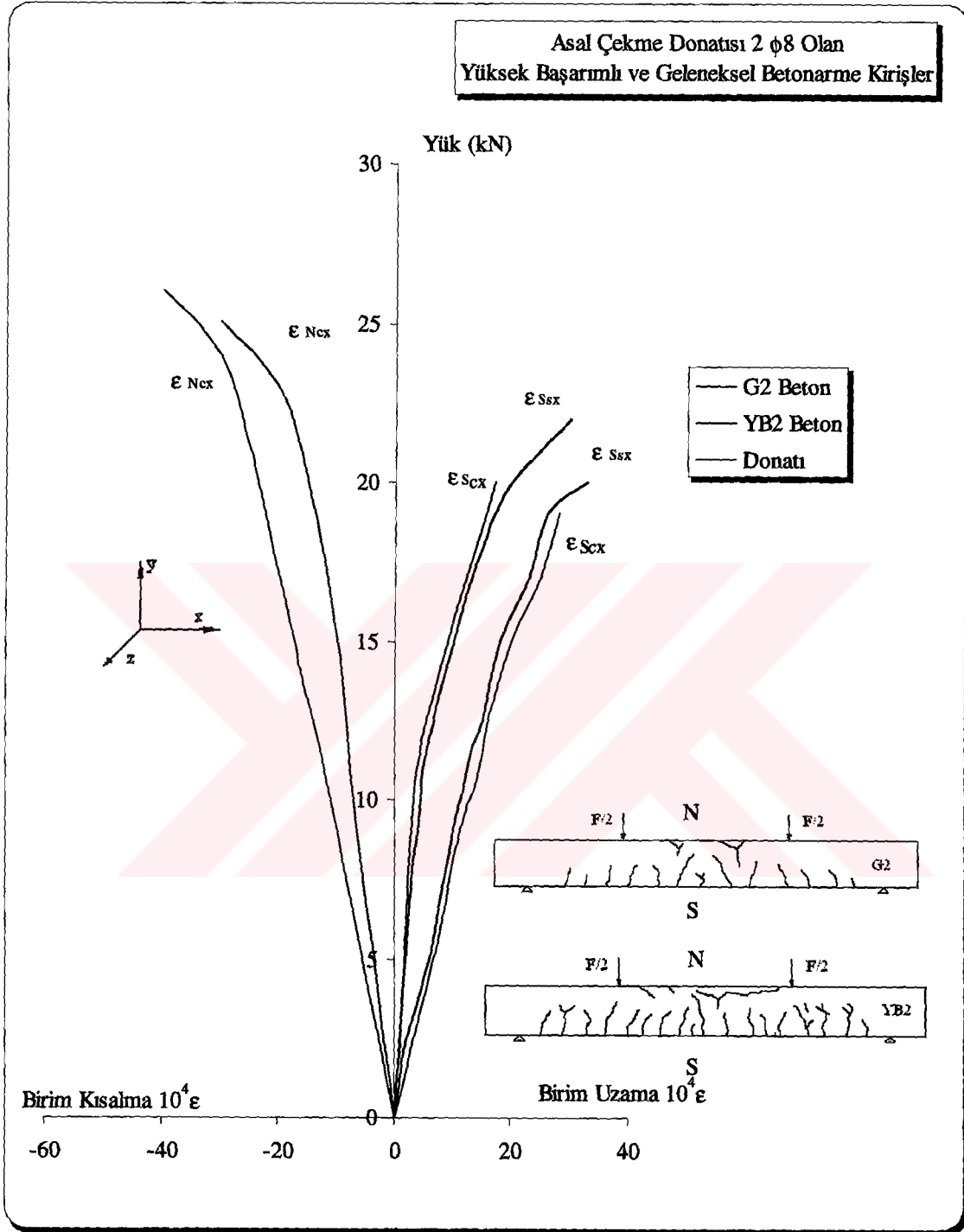
### 2.2.1.8. Beton ve Betonarme Kirişlerin Yük-Şekildeğiştirme ve Yük-Sehim Diyagramları

Daha önce Madde 2.2.1.1' de özellikleri tanımlanan, donatı miktar ve oranları Çizelge 2.11' de verilen beton ve betonarme kirişlerin eğilme deneyi boyunca şekildeğiştirmeleri, sehimleri ve çatlama durumları belirlenmiştir. Bu belirlemeye göre, yüksek başarımlı (YB1,YB2,YB3) ve geleneksel (G1,G2,G3) beton ve betonarme kirişlere ilişkin yük – şekildeğiştirme diyagramları sırasıyla aşağıdaki Şekil 2.17, Şekil 2.18 ve Şekil 2.19' da, yüksek başarımlı ve geleneksel betonarme kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları ise yine sırasıyla Şekil 2.20 ve Şekil 2.21' de verilmektedir.

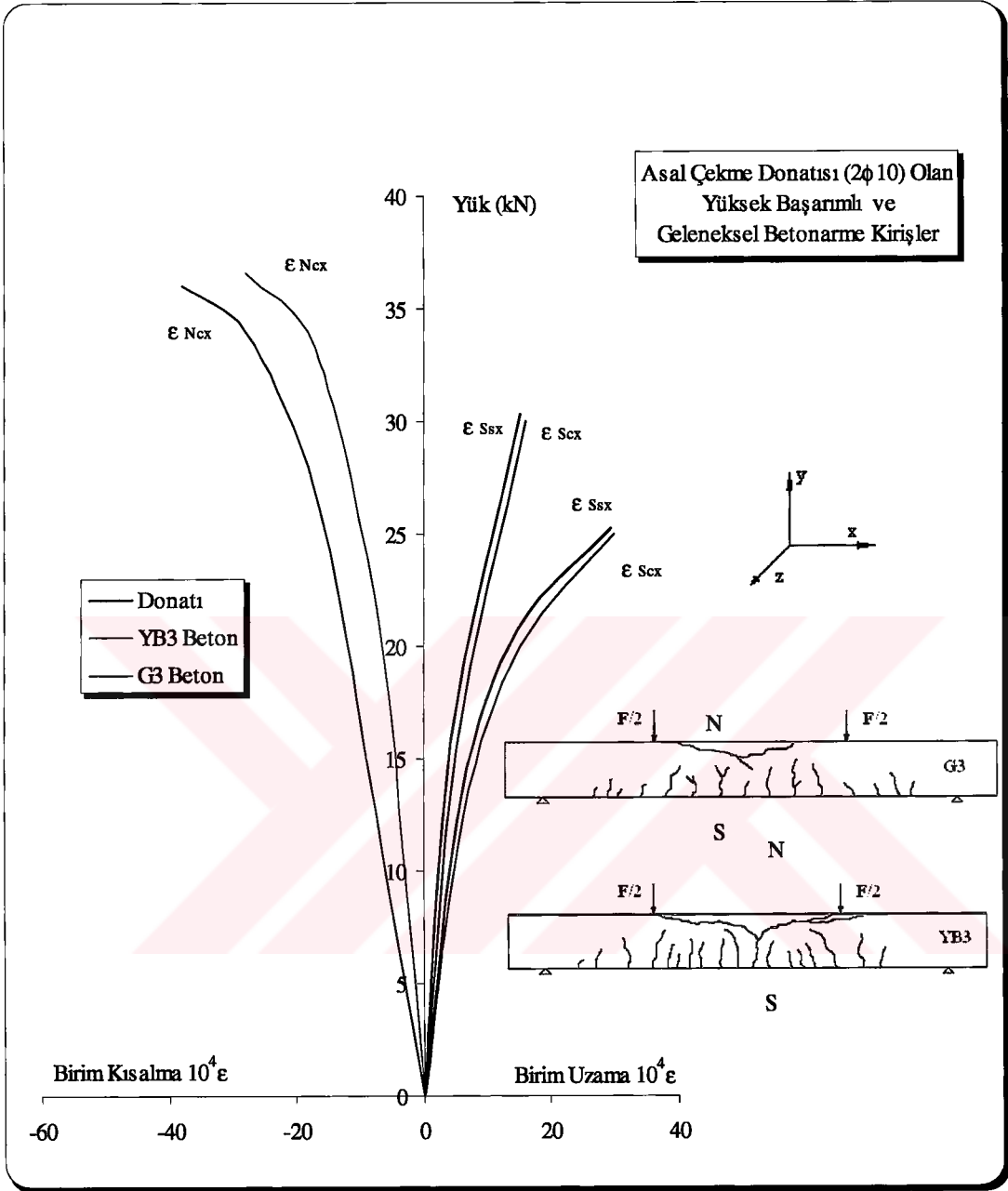
Burada diyagramların açıklanmasını kolaylaştırmak için, kirişlere dış yüklemenin yapıldığı ve eğilme momentinin etkisi altında basınca çalışan bölge olan üst yüzün N, eğilme momenti etkisiyle çekmeye çalışan bölge olan alt yüzün S, kirişlerin boyuna eksenlerinin x, düşey eksenlerinin y ve enine eksenlerinin ise z sembolleriyle gösterildiği belirtilmelidir.



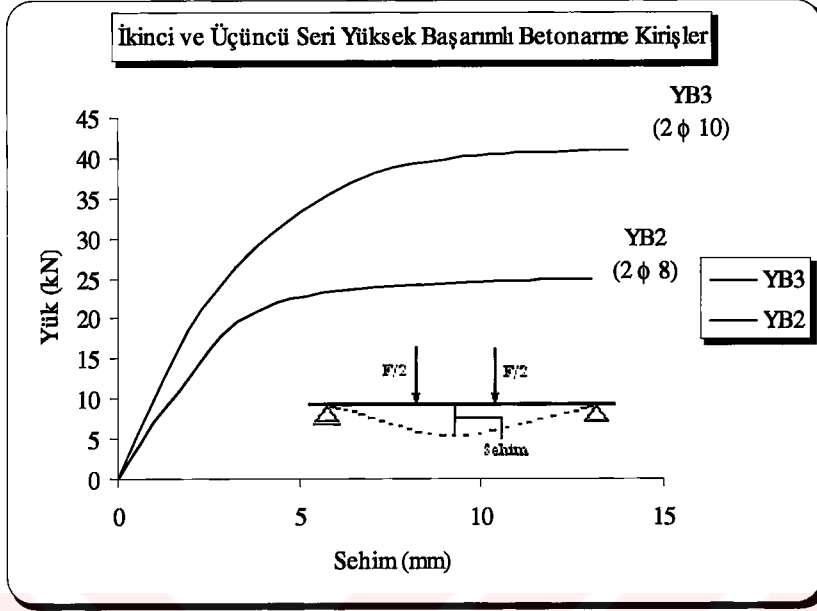
Şekil 2.17. Yüksek başarımlı YB1 ve geleneksel G1 beton kirişlerin yük-şekildeğiştirme diyagramları



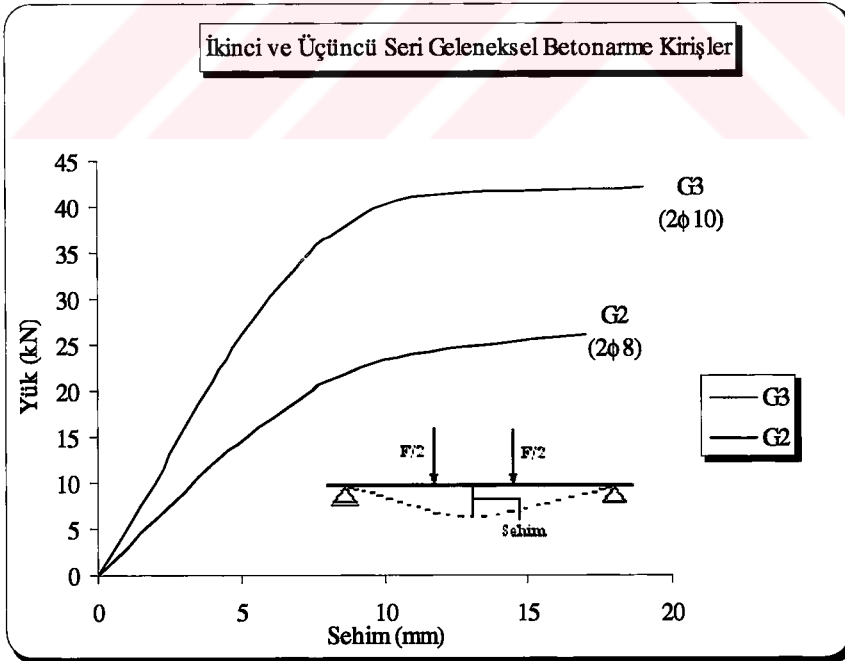
Şekil 2.18. Yüksek başarmlı YB2 (A) ve geleneksel G2 (A) betonarme kirişlerin yük-şekildeğiştirme diyagramları



Şekil 2.19. Yüksek başarımli YB3 (A) ve geleneksel G3 (A) betonarme kirişlerin yük-şekildeğiştirme diyagramları



Şekil 2.20. Yüksek başarımli betonarme YB2 (A) ve YB3 (A) kirişlerin yük-sehim diyagramları



Şekil 2.21. Geleneksel betonarme G2 (A) ve G3 (A) kirişlerin yük-sehim diyagramları



Yüksek başarımlı ve geleneksel beton ve betonarme kirişlerin kırılma yükleri ve bu yükler altında belirlenen teorik ( $\Delta_i$ ) ve deneysel sehimleri Çizelge 2.14' de verilmektedir.

Teorik sehim ( $\Delta_i$ ),  $f_{ctk} \rightarrow MPa$  betonun karakteristik çekme dayanımını,  $I_c \rightarrow mm^4$  brüt beton kesitin ağırlık merkezine göre eylemsizlik momentini ve  $y \rightarrow mm$  kesitin ağırlık merkezinin en çok çekme etkisinde bulunan life uzaklığını göstermek,  $M_{cr} = 1,3 \cdot f_{ctk} \cdot I_c / y$  olmak,  $M_{max} \rightarrow Nmm$  elemana etkiyen maksimum momenti,  $I_{cr} \rightarrow mm^4$  betona dönüştürülmüş çatlamış kesitin eylemsizlik momentini göstermek,

$$I_{ef} = \left( \frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 \cdot I_c + \left[ 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_{max}} \right)^3 \right] \cdot I_{cr} \quad (2.11)$$

olmak,  $F \rightarrow N$  kirişin kırılma yükünü,  $a \rightarrow mm$  tekil yükün mesnete olan uzaklığını,  $l \rightarrow mm$  kiriş açıklığını,  $E_c \rightarrow MPa$  betonun elastisite modülünü göstermek üzere,

$$\Delta_i = \frac{F/2 \cdot a}{6 \cdot E_c \cdot I_{ef}} \left( \frac{3}{4} \cdot l^2 - a^2 \right) \quad (2.12)$$

bağıntısıyla hesaplanmıştır [104].

Çizelge 2.14. Yüksek başarımlı ve geleneksel beton ve betonarme kirişlerin deneysel kırılma yükleri ve sehimleri

Kiriş Kod ve Tipleri	Asal Çekme Donatıları ( $A_s$ )	Yük (kN) ( $F_r$ )	Yük (kN) ( $0,75F_r$ )	Sehimler (mm)			
				Deneysel ( $F_r$ )	Teorik ( $F_r$ )	Deneysel ( $0,75F_r$ )	Teorik ( $0,75F_r$ )
YB1	Donatısız	12,50	9,38	-	-	-	-
YB2(A)	2Ø8	25,00	18,75	13,00	6,63	4,82	5,40
YB3(A)	2Ø10	41,00	30,75	14,00	8,35	7,40	7,80
G1	Donatısız	7,00	5,25	-	-	-	-
G2 (A)	2Ø8	26,00	19,50	17,00	8,47	4,90	5,60
G3 (A)	2Ø10	42,00	31,50	19,00	9,46	6,90	7,20

Bu çizelgeden kırılma yükü altında elde edilen teorik sehimlerin deneysel sehimlerden küçük olduğu görülmektedir. Bu durum kırılma yükü altında sehim

okumalarının diğer aşamalardaki kadar hassas olmamasından, diğer bir deyişle kırılma yüküne yakın yük altında kiriş şekildeğiştirmelerinin sabit yük altında dahi stabilize olmadan devam etmesinden kaynaklanmaktadır. Oysa kırılma yükünün  $\frac{3}{4}$ ' ü için belirlenen teorik sehimler deneysel sehimlere çok yakın olduğu görülmektedir. Bu durum (2.12) bağıntısının belirli bir yükleme düzeyine kadar oldukça gerçekçi olduğunu göstermektedir.

### **2.2.1.9. Beton ve Betonarme Kirişlerin Kırılmalarının İncelenmesi**

#### **2.2.1.9.1. Beton ve Betonarme Kirişlerin Kırılma ve Kullanım Momentlerinin Hesabında İzlenen Yol**

Bu başlık altında, betonarme kirişlerin kırılma ve kullanım momentlerinin belirlenmesinde yapılan kabuller, ilkeler ve hesap yöntemleri üzerinde durulmaktadır. Burada beton kirişlerin yalnızca deneysel kırılma momentlerinin belirlendiğini belirtmek uygun olmaktadır.

##### **2.2.1.9.1.1. Betonarme Kirişlerin Teorik Kırılma Momentinin Hesabı**

###### **2.2.1.9.1.1.1. Hesap Kabulleri**

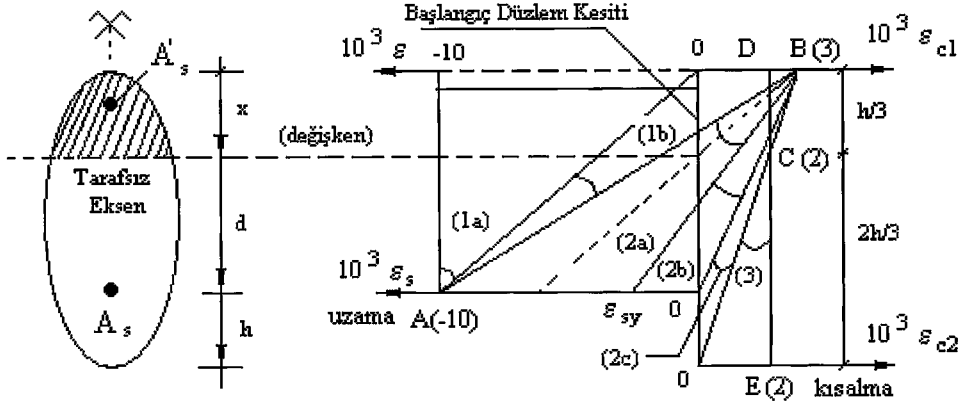
Kırılma bir çatlak doğrultusunda meydana geldiğinden teorik kırılma momentlerinin ( $M_{\pi}$ ) hesabı için, sadece böyle bir kesite ilişkin, aşağıdaki bazı kabuller yapılmaktadır:

a) Çatlaklara komşu kesitler, kırılma anına kadar düzlem kalırlar, dolayısıyla şekildeğiştirmeler tarafsız eksene olan uzaklıkla orantılıdır ve donatı kendisini saran betonla aynı şekildeğiştirmeyi yapmaktadır. Donatı-beton arasındaki aderansın olmaması halinde bu kabulün gerçekçi olmayacağı açıktır.

b) Kırılma, en üst beton lifteki birim kısalmanın sınır değerine ( $\epsilon_{cu}$ ) ulaşmasıyla meydana gelmektedir.

c) Çekme bölgesindeki betonun kesit dayanımına etkisi yoktur dolayısıyla da kesit tarafsız eksen düzeyine kadar çatlamıştır.

d) Bileşik eğilmede kesitin şekildeğiştirme durumlarını belirleyen doğrular A,B yada C noktalarından birinden geçmek zorundadır (Şekil 2.22). Bu kural üç dönme noktası kuralı olarak bilinmektedir [107,108,109].



Şekil 2.22. Kırılma sınır durumunda kesitin şekildeğiştirme diyagramının alabileceği çeşitli konumlar “Üç dönme noktası kuralı” [46].

Bu şekildeki bölgeler:

1 Bölgesi, dönme noktası A: Bu bölge kesitte en çok çekme etkisinde kalan çeliğin devamlı  $10 \times 10^{-3}$ , e eşit olan birim uzamasıyla karakterize edilmektedir. Bu bölgeye ilişkin tüm şekildeğiştirme doğruları bu birim uzama değerine karşılık gelen A noktasından geçer. Kırılma çekme kırılmasıdır. Zira, betondaki birim kısılma  $3 \times 10^{-3}$ , e ulaşmadan önce, donatıdaki birim uzama  $\epsilon_{cu} = 10 \times 10^{-3}$ , değerine ulaşmaktadır.

1a Bölgesi: Bu bölgeye karşılık gelen kesit etkisi merkezi çekme (A' nın düşeyi) yada dışmerkez çekmedir. Tarafsız eksen kesitin dışındadır. Dolayısıyla kesitin hepsi çekme etkisindedir.

1b Bölgesi: Bu bölgeye karşılık gelen kesit etkisi, basit yada bileşik eğilme (dışmerkez basınç yada çekme) dir. Tarafsız eksen kesitin içindedir. Dolayısıyla kesitin bir kısmı basınç bir kısmı çekme etkisindedir.

2 Bölgesi, dönme noktası B: Bu bölge basınç gören betonun devamlı  $3 \times 10^{-3}$ , e eşit olan birim kısalmayla karakterize edilmektedir. Bu bölgeye ilişkin tüm şekildeğiştirme doğruları B noktasından geçmektedir. Bu bölgeye karşılık olan kesit etkisi basit yada bileşik eğilme (dışmerkez basınç veya çekme) dir. Tarafsız eksen kesitin içindedir. Dolayısıyla kesitin bir kısmı basınç bir kısmı çekme etkisindedir. Kırılma basınç kırılmasıdır. Zira basınç bölgesindeki betonda oluşan birim kısılma  $3 \times 10^{-3}$ , e ulaştığında çekme bölgesindeki donatı birim uzaması  $\epsilon_s$  henüz  $\epsilon_{cu} = 10 \times 10^{-3}$  değerine ulaşmamıştır.

2a Bölgesi: Kesitte en çok çekme gören donatıdaki birim uzama  $\epsilon_{cu} = 10 \times 10^{-3}$  ile  $\epsilon_{sy}$  değeri arasındadır. Bu  $\epsilon_{sy}$  dikkate alınan çeliğin  $f_{yd}$  tasarım akma dayanımına karşılık oluşan birim uzamadır.

2b Bölgesi: Aynı donatıdaki birim uzama  $\epsilon_{sy}$  ile 0 arasında olup sınır durumdaki gerilmesi  $\sigma_s < f_{yd}$  ' dir.

2c Bölgesi: Tüm donatı basınç, kesitin küçük bir kısmı çekme etkisindedir.

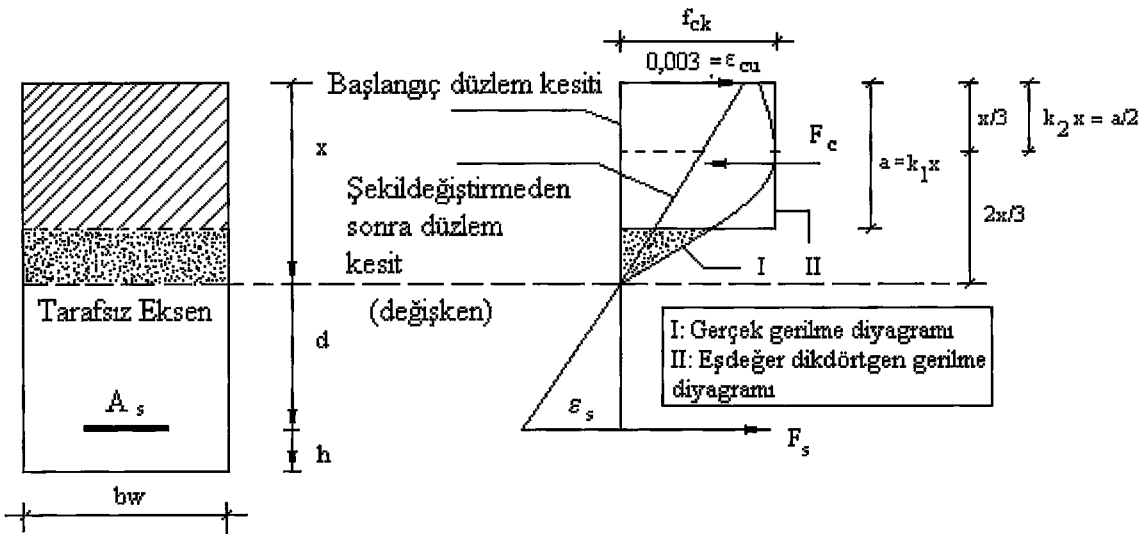
3 Bölgesi, dönme noktası C: Bu bölge basınç gören betonun  $3 \times 10^{-3}$ , den  $2 \times 10^{-3}$ , e kadar değişen birim kısalmasıyla karakterize edilmektedir. Bu bölgeye ilişkin tüm şekildeğiştirme doğruları kesitin içindeki C noktasından geçmektedir. Bu bölgeye karşılık gelen kesit etkisi dış merkez yada merkezi basınç (C' nin düşeyi)' dir. Tarafsız eksen kesitin dışındadır. Bu durumda kesitin hepsi basınç etkisindedir. C noktası kısmen çekme etkisindeki bir kesitin tamamen basınç etkisindeki bir kesite geçişi tanımlamaktadır. Bu C noktası BO doğrusuyla, merkezi basınçtaki şekildeğiştirme diyagramını belirleyen, DE doğrusunun kesiştirilmesiyle elde edilmektedir.

e) Betonun gerilme – şekildeğiştirme diyagramları bellidir. Kesitin taşıma gücü sona ereceği anda basınç bölgesi betonundaki gerilme dağılımı, betonun bir eksenli merkezi basınç altında elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin benzeridir. (bkz. Şekil 2.8 ) Bu eğriyi, beton dayanımı, yükleme hızı, yükün dışmerkezliği ve kesit şekli gibi, bir çok parametre etkilediğinden analitik olarak ifade edilmesi son derece zor olmaktadır. Ancak betonarme kesit hesaplarında bu eğri yerine hesapları kolaylaştıran, bileşke kuvvet ve tatbik noktası bakımından, eşdeğer olan basitleştirilmiş çeşitli diyagramlar kullanılmaktadır. Buna göre betonarme bir kesitin basınç bölgesindeki gerilme dağılımını gösteren eğriler Şekil 2.23' de verilmektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi, uygulama kolaylığı nedeniyle, en yaygın kullanılan eşdeğer dikdörtgen gerilme diyagramı olmaktadır. Bu diyagramı belirleyen  $k_1$ ,  $k_2$  ve  $k_3$  katsayıları yüksek başarımlı ve geleneksel betonlar için aşağıdaki Çizelge 2.15' de verilmektedir.

Çizelge 2.15. Yüksek başarımlı ve geleneksel betonlar için eşdeğer dikdörtgen gerilme diyagramının belirlenmesinde kullanılan katsayılar

	Geleneksel betonlarda	Yüksek başarımlı betonlarda	
	Kaynak [22]	Kaynak [21]	Kaynak [110]
$k_1$	$f_{ck} \leq 25$ MPa için $k_1 = 0.85$ $25 < f_{ck} \leq 50$ MPa için $k_1 = 0,85 - 0,006(f_{ck} - 25)$	$51 \text{ MPa} \leq f'_{ck} \leq 110 \text{ MPa}$ için $k_1 = -1.2 \times 10^{-3} x f'_{ck} + 0.803$	$f'_{ck} \geq 50 \text{ MPa}$ için $k_1 = 0,95 - f'_{ck} / 400 \geq 0,70$
$k_2$	$k_1 / 2$	$k_1 / 2$	$k_1 / 2$
$k_3$	0.85	$k_3 = -2 \times 10^{-3} x f'_{ck} + 0.965$	$k_3 = 0,85 - f'_{ck} / 800 \geq 0,73$
$k_1.k_3$	0,6786	0,6152	0,6171
$F_c$	$k_1.k_3.f_{ck}.b_w.x$	$k_1.k_3.f'_{ck}.b_w.x$	$k_1.k_3.f'_{ck}.b_w.x$
$F_c$	22,80. $b_w.x$	37,53. $b_w.x$	37,64. $b_w.x$

Bu çizelgedeki  $f_{ck}$  ve  $f'_{ck}$  sırasıyla geleneksel ve yüksek başarımlı betonun karakteristik basınç dayanımını göstermektedir. Burada ilgili bağıntılardaki karakteristik dayanımlar yerine ortalama ( $f_{cm}$ ) yada tasarım ( $f_{cd}$ ) dayanımları konulmak suretiyle belirlenen kırılma momentleri sırasıyla ortalama ve tasarım kırılma momentleri olarak adlandırılmaktadır.

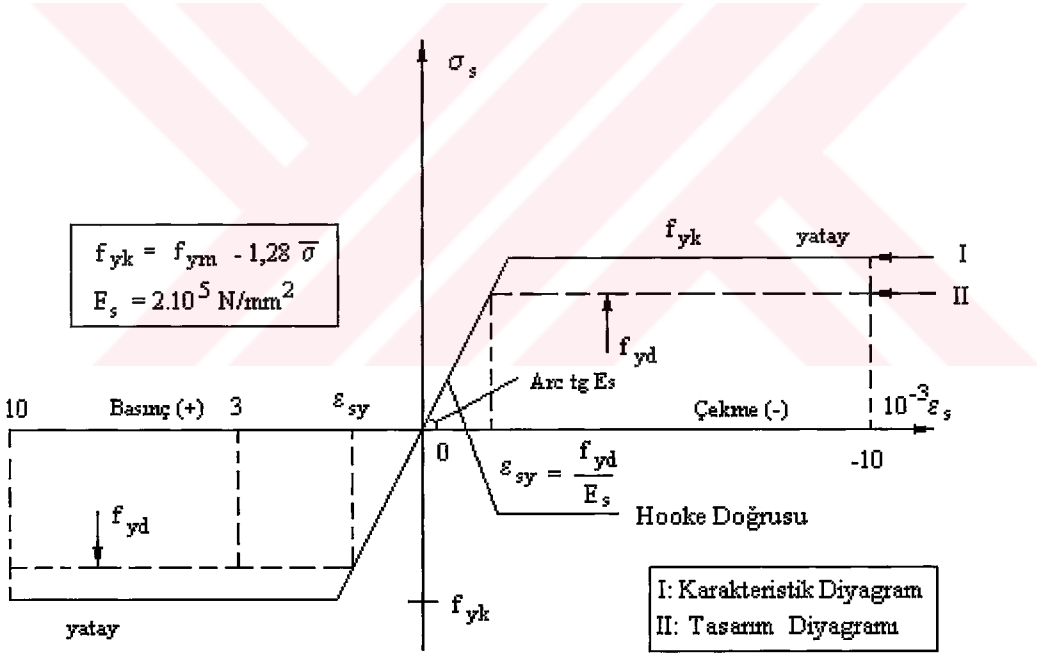


a) Kesit

b) Şekildeğiştirmeler-gerilmeler ve bileşkeleri

Şekil 2.23. Betonarme bir kesitte şekildeğiştirmeler-gerilmeler ve bileşkeleri

Donatıların gerilme-şekildeğiştirme diyagramları da belli olup, donatı sınıfına bağlı olarak, her donatının gerilme-şekildeğiştirme diyagramı daha önce Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’ de verilmiştir. Pasif donatıların “orjine göre simetrik” şematik karakteristik ve tasarım diyagramları ise aşağıdaki Şekil 2.24’ de verilmektedir. Donatının karakteristik diyagramı, akma sınırı bu donatının karakteristik akma dayanımına eşit olan diyagram olarak tanımlanmaktadır. Herhangi bir donatının karakteristik akma dayanımı,  $f_{ym} \rightarrow MPa$  ortalama akma dayanımını,  $\bar{\sigma}$  dayanımların standart sapmasını göstermek üzere, %10 risk ile,  $f_{yk} = f_{ym} - 1,28\bar{\sigma}$  bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Tasarım diyagramı ise karakteristik dayanımlarının ordinatlarının  $\gamma_s = 1,15$ ’ e bölünmesiyle elde edilen değerleri aynı ölçekte karakteristik diyagramın doğrusal kısmına paralel doğrular üzerinde göstermek suretiyle belirlenen noktaların birleştirilmesiyle elde edilmektedir.



Şekil 2.24. Pasif donatının "orjine göre simetrik" şematik karakteristik ve tasarım diyagramları [46].

### 2.2.1.9.1.1.2. Hesap İlkesi

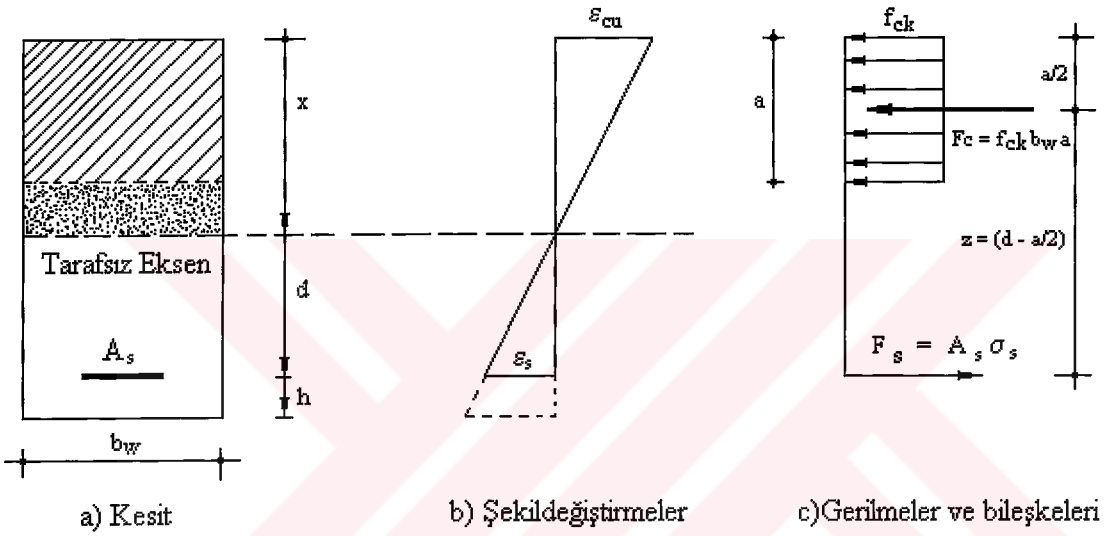
Kırılma momentinin hesabı ilk aşamada kesitin kırılma anındaki şekildeğiştirme diyagramının belirlenmesini gerektirmektedir. Zira bu diyagram belli olunca:

- Basınç gerilmelerinin bileşkesi ve bunun tatbik noktası,

- Donatılardaki uzamalara karşılık gelen donatı gerilmeleri ve bu gerilmelerin bileşkeleri kolayca hesaplanabilmektedir.

### a) Şekildeğiştirme diyagramının belirlenmesi

Salt eğilme etkisindeki betonarme kirişlerde kırılma kesitindeki şekildeğiştirme diyagramı, kesitte oluşan gerilmeler ve bileşkeleri Şekil 2.25' de verilmektedir [111].



Şekil 2.25. Betonarme bir kesitin şematik şekildeğiştirme diyagramı ve kırılma anında kesitte oluşan gerilmeler ve bileşkeleri

### b) Gerilme diyagramının belirlenmesi

Daha önce de belirtildiği gibi donatıdaki gerilmeler, şekildeğiştirmelere karşılık olarak, donatılara ilişkin gerilme-şekildeğiştirme diyagramlarından elde edilmektedir (bkz. Şekil 2.10, Şekil 2.11). Betondaki basınç gerilmeleri ise yukarıdaki Şekil 2.25' den görülmektedir.

### c) Kesitin denge denklemlerinin belirlenmesi

Betonarme bir kesitin taşıma gücüne göre hesabında kullanılan uygunluk ve denge denklemleri:

- Uygunluk denklemi

$$\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_s} = \frac{x}{d-x} \quad (2.13)$$

- Kuvvet denge denklemi

$$F_c = F_s \quad (2.14)$$

- Moment denge denklemi

$z \rightarrow mm$  moment kolunu göstermek üzere,

$$M = F_c \cdot z = F_s \cdot z \quad (2.15)$$

şeklindedir.

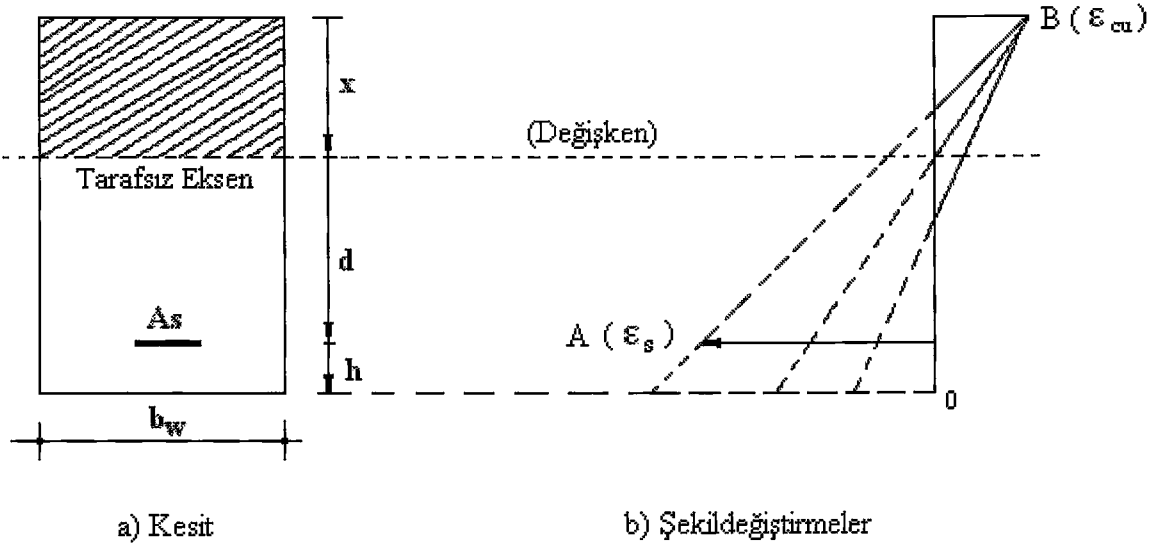
#### d) Hesap yöntemi

Kullanılan donatıların gerilme-şekildeğiştirme bağıntılarının karmaşıklığı nedeniyle, alışılmış hesap yoluyla denge denklemlerinin yazımı, kırılma momentinin doğru olarak tayinine imkan vermemektedir. Durum böyle olunca, kırılma momenti ardışık yaklaşım yöntemiyle hesaplanmak zorundadır. Bunun için kırılma anında betonun birim kısalması  $\epsilon_{cu}$  belliyken, denge gerçekleşinceye kadar kesitin şekildeğiştirme diyagramını B ( $\epsilon_{cu}$ ) noktası etrafında döndürmek yeterli olmaktadır (Şekil 2.26).

Bu durumda, kesitin teorik kırılma momentinin hesabı için, betonun eğilmede kırılma şekildeğiştirmesinin ( $\epsilon_{cu}$ ) belli olması zorunlu olmaktadır. Ön incelemeler bu çalışmaya konu olan yüksek başarılı ve geleneksel betonların kırılma şekildeğiştirmelerinin sırasıyla  $2,55 \times 10^{-3}$  ve  $3,8 \times 10^{-3}$  civarında olduğunu göstermiştir.

Buna göre eğilme etkisindeki yüksek başarılı betonarme bir kesitin kırılma momentini ardışık yaklaşımla hesaplayan bir bilgisayar programının akış diyagramı Şekil 2.27'de verilmektedir.





Şekil 2.26. Betonarme bir kesitin kırılma anındaki şekildeğiştirme diyagramının araştırılması

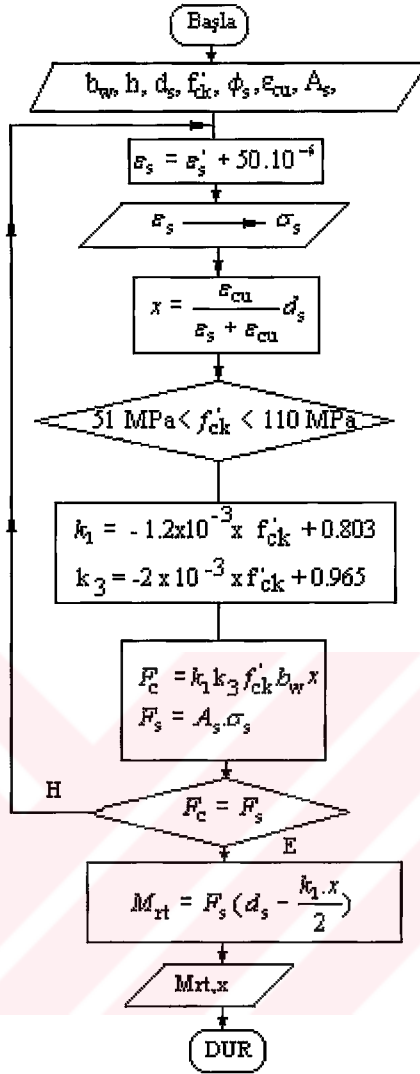
### 2.2.1.9.1.2. Betonarme Kirişlerin Tasarım Kırılma ve Kullanım Momentlerinin Hesabı

#### 2.2.1.9.1.2.1. Hesap Kabulleri

Düzlem kesitlerin düzlem kalma, çekme etkisindeki betonun rolü, beton ve donatı gerilme-şekildeğiştirme diyagramlarına ilişkin Madde 2.2.1.9.1.1.1' de belirtilen kabuller burada da aynen yapılmaktadır. Ancak, kırılma sınır durumu, gerçek taşıma kapasitesi yerine, üç dönme noktası gibi bir kuralın uygulanmasıyla tanımlanmaktadır (bkz. Şekil 2.22). Bu çalışmaya konu olan kirişler salt eğilme etkisinde olduğundan söz konusu üç dönme noktası kuralı (A, B ve C), sadece iki dönme noktası kuralına (A ve B) dönüşmekte (bkz. Şekil 2.26) ve aşağıdaki iki koşuldan biri yada ikisi aynı anda sağlandığında kırılma sınır durumuna ulaşılmaktadır.

- Betonun üst lifindeki birim kısalmanın  $\epsilon_{cu} = 3 \times 10^{-3}$  değerini alması,
- Asal çekme donatısındaki birim uzamasının  $10 \times 10^{-3}$  ' e varması.

Bu hesaplarda betonun basınç dayanımı yerine  $f_{cu} = 0.85 f_{ck} / \gamma_c$  değeri, donatı tasarım dayanımı yerine ise  $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s$  değeri kullanılmaktadır.



Şekil 2.27. Yüksek başarımlı betonarme kirişler için teorik kırılma momentinin hesabında kullanılan bilgisayar programı akış diyagramı

### 2.2.1.9.1.2.2. Hesap İlkesi

Tasarım kırılma momentinin Kaynak [22]' ye göre hesabında teorik kırılma momentinin hesabındaki yol aynen izlenmektedir. Buna göre,  $A_s \rightarrow mm^2$  asal çekme donatısı alanını,  $f_{cd}$  ve  $f_{yd} \rightarrow MPa$  sırasıyla beton ve donatının tasarım dayanımlarını,  $\rho \rightarrow$  donatı oranını,  $d \rightarrow mm$  kesitin faydalı yüksekliğini göstermek üzere, tasarım kırılma momenti

$$M_{rd} = A_s f_{yd} \left(1 - 0,59 \rho \frac{f_{yd}}{f_{cd}}\right) d \quad (2.16)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

### 2.2.1.9.1.3. Betonarme Kirişlerin Karakteristik ve Ortalama Kırılma Momentinin Hesabı

Karakteristik ve ortalama kırılma momentlerinin ( $M_{rk}, M_{rm}$ ) hesabında, tasarım kırılma momenti ( $M_{rd}$ ) hesabındaki yol aynen izlenmekte ancak bunun için (2.16) bağıntısında beton ve donatı tasarım dayanımları yerine karakteristik ve ortalama dayanımlar kullanılmaktadır.

### 2.2.1.9.1.4. Betonarme Kirişlerin Kullanım Momentleri Hesabı

Kullanım momenti ( $M_s$ ), bir taraftan kullanım sınır durumları, diğer taraftan da kırılma sınır durumu dikkate alınarak belirlenmek zorundadır.

Eğer bu belirlemede sadece kırılma sınır durum dikkate alınıyor ve kullanım yükü altında başka hiçbir özel koşulun sağlanması istenmiyorsa izostatik kirişlerde kullanım momentinin;

$$M_s = M_{rd} / 1,50 \quad (2.17)$$

şeklinde hesaplanması uygun bulunmaktadır [46].

Aksine, çatlama, şekildeğiştirme ve yerdeğiştirmeler için başka sınırlar konmak isteniyor ve bu sınırlar yukarıda tanımlanan  $M_s$  ' den daha küçük değerleri gerektiriyorsa, bu durumda kullanım momentinin bir kiriş çiftinden diğerine değişeceği açıktır. Durum böyle olmakla beraber, bu çalışmada kirişlerin maksimum kullanım yüküne karşılık gelen ve  $M_s = M_{rd} / 1,50$  bağıntısıyla hesaplanan kullanım momenti değerine kadarki mekanik davranışlarının kendi aralarında karşılaştırılmasıyla yetinilmektedir.

### 2.2.1.9.2. Beton ve Betonarme Kirişlerin Kırılma ve Kullanım Momentleri

Yüksek başarımlı ve geleneksel betonarme kirişlerin, gerçek kırılma yükleri ( $F_r$ ) kullanılarak yükleme şekli ve geometrisinden  $M_{re} = 0,67 F_r / 2$  bağıntısına göre hesaplanan,

deneysel kırılma momentleri, Çizelge 2.16'daki dayanımlar kullanılarak hesaplanan,  $M_{rt}$  teorik kırılma momentleri, Kaynak [22]' ye göre belirlenen  $M_{rd}$  tasarım kırılma momentleri,  $M_{rk}$  karakteristik kırılma momentleri,  $M_{rm}$  ortalama kırılma momentleri ve  $M_s$  kullanım momentleri Çizelge 2.17' de verilmektedir.

Çizelge 2.16. Deney kirişlerinde kullanılan beton ve donatının ortalama, karakteristik ve tasarım dayanımları

Kiriş Tipi	$f_{cm}$ (MPa)	$f_{ck}$ (MPa)	$f_{cd}$ (MPa)	$f_{ym}$ (MPa)	$f_{yk}$ (MPa)	$f_{yd}$ (MPa)	$f_{ctm}$ (MPa)	$f_{ctk}$ (MPa)	$f_{ctd}$ (MPa)
YB <sub>i</sub>	66	61	41	359	346	301	2,84	2,73	1,82
G <sub>i</sub>	35	33,60	22,40	359	346	301	2,07	2,03	1,35
$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c ; \gamma_c = 1,50 ; f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s ; \gamma_s = 1,15 ; f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_c$									

Çizelge 2.17. Beton ve betonarme deney kirişlerinin kırılma ve kullanım momentleri

Kiriş Kod ve Tipleri	Asal Çekme Donatısı (As)	$M_{re}$ (kNm)	$M_{rt}$ (kNm)	$M_{rm}$ (kNm)	$M_{rk}$ (kNm)	$M_{rd}$ (kNm)	$M_s$ (kNm)
YB1	Donatısız	4,19	-	-	-	-	-
YB2 (A)	2 Ø 8	8,38	7,90	6,57	6,33	5,48	3,65
YB3 (A)	2 Ø 10	13,74	12,50	10,17	9,79	8,45	5,63
G1	Donatısız	2,35	-	-	-	-	-
G2 (A)	2 Ø 8	8,71	8,06	6,47	6,24	5,38	3,59
G3 (A)	2 Ø 10	14,07	12,56	9,93	9,57	8,20	5,47

### 2.2.1.9.3. Betonarme Kirişlerin Deneysel Emniyet Katsayıları

Bu çalışmada deneysel kırılma momentinin diğer momentlere oranı, deneysel emniyet katsayısı olarak adlandırılmakta ve Çizelge 2.17 yardımıyla  $\gamma_s = M_{re} / M_s$ ,  $\gamma_r = M_{re} / M_{rt}$ ,  $\gamma_r^* = M_{re} / M_{rm}$ ,  $\gamma_r^{**} = M_{re} / M_{rk}$  ve  $\gamma_r^{***} = M_{re} / M_{rd}$  şeklinde hesaplanan emniyet katsayıları Çizelge 2.18' de verilmektedir.

Çizelge 2.18. Yüksek başarımlı ve geleneksel betonarme kirişler için deneysel emniyet katsayıları

Deneysel Emniyet Katsayıları ( $\gamma$ değerleri)	Kiriş Kod ve Tipleri			
	YB2(A)	YB3(A)	G2 (A)	G3 (A)
$\gamma_s = M_{re}/M_s$	2,30	2,44	2,43	2,57
$\gamma_r = M_{re}/M_{rt}$	1,06	1,10	1,08	1,12
$\gamma_r^* = M_{re}/M_{rm}$	1,28	1,35	1,35	1,42
$\gamma_r^{**} = M_{re}/M_{rk}$	1,32	1,40	1,40	1,47
$\gamma_r^{***} = M_{re}/M_{rd}$	1,53	1,63	1,62	1,72

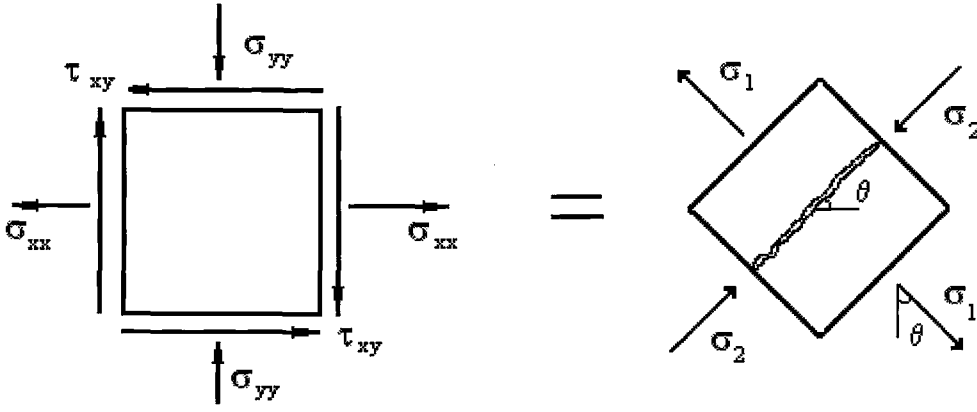
### 2.2.1.10. Beton ve Betonarme Kirişlerin Çatlama Durumlarının İncelenmesi

Bu başlık altında, betonarmede çatlama, ortalama çatlak genişliği hesabı, eğilme çatlakları, nervürlü donatıdan doğan çatlaklar hakkında bir takım teorik hatırlatmalardan sonra, bu çalışmaya konu olan kirişlerinin kırılma anında sabit moment bölgesinde oluşan çatlak sayıları, çatlak mesafeleri, deneysel ve teorik çatlak genişlikleri, şematik çatlak durumları, deneysel ve teorik ilk çatlama momentleri ile ilk çatlamayı oluşturan maksimum birim uzamalar verilmektedir.

#### 2.2.1.10.1. Teorik Hatırlatmalar

##### 2.2.1.10.1. Betonarmede Çatlama ve Ortalama Çatlak Genişliğinin Hesabı

Betonarmede çatlama olayının, beton ve donatının uzama kapasitelerinin farklı olması nedeniyle, kaçınılmaz olduğu bilinmektedir. Son 30 yıl içerisinde gerçekleştirilmiş bir çok araştırma, betonun çatlamasına dolayısıyla da kırılmasına gerilmelerden çok uzama şekildeğiştirmelerinin neden olduğunu göstermekle beraber burada yine, bugün de kabul edilen, çatlamanın asal çekme gerilmelerinden meydana geldiği ve çatlakların asal çekme gerilmelerine dik olduğu kabulü aynen yapılmaktadır (Şekil 2.28).



Şekil 2.28. Eğilme etkisindeki bir elemanda asal çekme gerilmelerine dik doğrultuda çatlama olayı

#### a) Ortalama Çatlak Mesafesi ( $\Delta l_m$ )

Bu mesafenin belirlenmesinde merkezi çekme etkisindeki bir eleman dikkate alınmaktadır (Şekil 2.29). Buna göre, N merkezi yükünden oluşan asal çekme gerilmeleri elemanı oluşturan betonun merkezi çekme dayanımına ulaştığında, beton bu gerilmelere dik doğrultuda çatlama olmaktadır. Betonarmede ilk çatlak en zayıf kesitte oluşacağından, bu çatlak elemanın rastgele bir kesitinde meydana gelecektir. Merkezi yük arttıkça genellikle çatlak sayısı da artmakla beraber Şekil 2.29.a' da bunların sadece iki tanesi görülmektedir. Bu çatlaklardan sonra eleman boyunca donatıdaki, betondaki ve donatı-beton arasındaki aderans gerilmelerinin değişimlerine ilişkin şemalar sırasıyla Şekil 2.29.b, Şekil 2.29.c ve Şekil 2.29.d' de verilmektedir [112].

Çatlak kesitlerinde merkezi yükün tamamı donatı tarafından taşınmaktadır. Buna göre  $A_s \rightarrow mm^2$  donatı alanını ve  $\sigma_{so} \rightarrow MPa$  çatlak kesitteki donatı gerilmesini göstermek üzere bu kesitler için,

$$N = A_s \cdot \sigma_{so} \quad (2.18)$$

bağıntısı yazılabilmektedir. Çatlaktan x kadar uzaklıktaki bir kesitte merkezi yük beton ve donatı tarafından birlikte taşındığından, bu kesitte;

$$N = A_s \cdot \sigma_{sx} + A_c \cdot \sigma_{ctx} \quad (2.19)$$

şeklinde dengelenmektedir. Bu durumda (2.18) ve (2.19) bağıntılarının sağ tarafları birbirine eşitlenir, bu eşitliğin her iki tarafı  $A_c$ ' ye bölünür ve  $\rho = A_s/A_c$  ,  $\Delta\sigma_s = \sigma_{so} - \sigma_{sx}$  ile gösterilirse;

$$\Delta\sigma_s = \sigma_{ctx}/\rho \quad (2.20)$$

olarak elde edilir.  $\tau_b(x) \rightarrow MPa$   $x'$  e bağlı aderans gerilmesini,  $\phi \rightarrow mm$  donatı çapını göstermek üzere bu donatının  $x$  uzunluğundaki parçasının dengesinden (Şekil 2.29.e),

$$A_s \cdot \Delta\sigma_s = \pi\phi \int_0^x \tau_b(x) dx \quad (2.21)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadedeki  $\tau_b(x)$  aderans gerilmesinin değişimi bilinmediğinden bu bağıntı;

$$\Delta\sigma_s \frac{\pi\phi^2}{4} = \frac{1}{k_1} \tau_b \pi \cdot \phi \cdot x \quad (2.22)$$

şeklinde yazılır ve  $\Delta\sigma_s$  yerine (2.20) bağıntısındaki değeri konduktan sonra  $x$  çekilir. ve  $k_1/4 = k_2$  yazılırsa;

$$x = k_2 \frac{\sigma_{ctx}\phi}{\tau_b \cdot \rho} \quad (2.23)$$

olarak bulunur. Bu ifadede, çatlaktan  $x$  kadar uzaklıktaki kesitteki betonda çekme gerilmesi ( $\sigma_{ctx}$ ) yerine betonun çekme dayanımı ( $f_{ct}$ ) konursa, minimum çatlak mesafesi;

$$x_{\min} = \Delta l_{\min} = k_2 \frac{f_{ct} \cdot \phi}{\tau_b \cdot \rho} \quad (2.24)$$

olarak elde edilmektedir. Ancak (2.23) no' lu bağıntı, gerilmelerin yatay kesit üzerinde eşit yayılı olması kabulüyle elde edilmiştir. Gerilmeler yatay kesit üzerinde belirli bir mesafede eşit yayılı olsalar bile, çatlağın yakın civarında durum böyle değildir. Diğer bir deyişle, minimum çatlak mesafesinin belirlenmesinde paspayı (c) etkisinin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu yapıldığı takdirde (2.24) bağıntısı,

$$\Delta l_{\min} = k_3 \cdot c + k_2 \cdot \frac{f_{ct} \cdot \phi}{\tau_b \cdot \rho} \quad (2.25)$$

şeklini almaktadır. İki çatlak arasındaki mesafenin ortasındaki ( $\Delta l/2$ ) kesitte betondaki gerilme betonun çekme dayanımına ulaştığında iki çatlak arasındaki maksimum mesafe,

$$\Delta l_{\max} = 2\Delta l_{\min} \quad (2.26)$$

bağıntısıyla hesaplanabilen değerini almaktadır. Ortalama çatlak mesafesi de (2.25) no' lu bağıntıdaki katsayılar farklı olmak koşuluyla, benzer olan

$$\Delta l_m = k_4 \cdot c + k_5 \cdot \frac{f_{ct} \cdot \phi}{\tau_b \cdot \rho} \quad (2.27)$$

bağıntısıyla hesaplanabilmektedir.

A çatlağından x kadar uzakta bulunan kesitte donatıdaki gerilme ise, (2.20) bağıntısı dikkate alınmak suretiyle,

$$\sigma_{sx} = \sigma_{so} - \frac{1}{\rho} \cdot \sigma_{ctx} \quad (2.28)$$

olarak elde edilmektedir. Bu bağıntıdaki  $\sigma_{ctx}$  yerine betondaki ortalama çekme gerilmesi ( $\sigma_{ctm}$ ) konursa, donatıdaki ortalama gerilme,

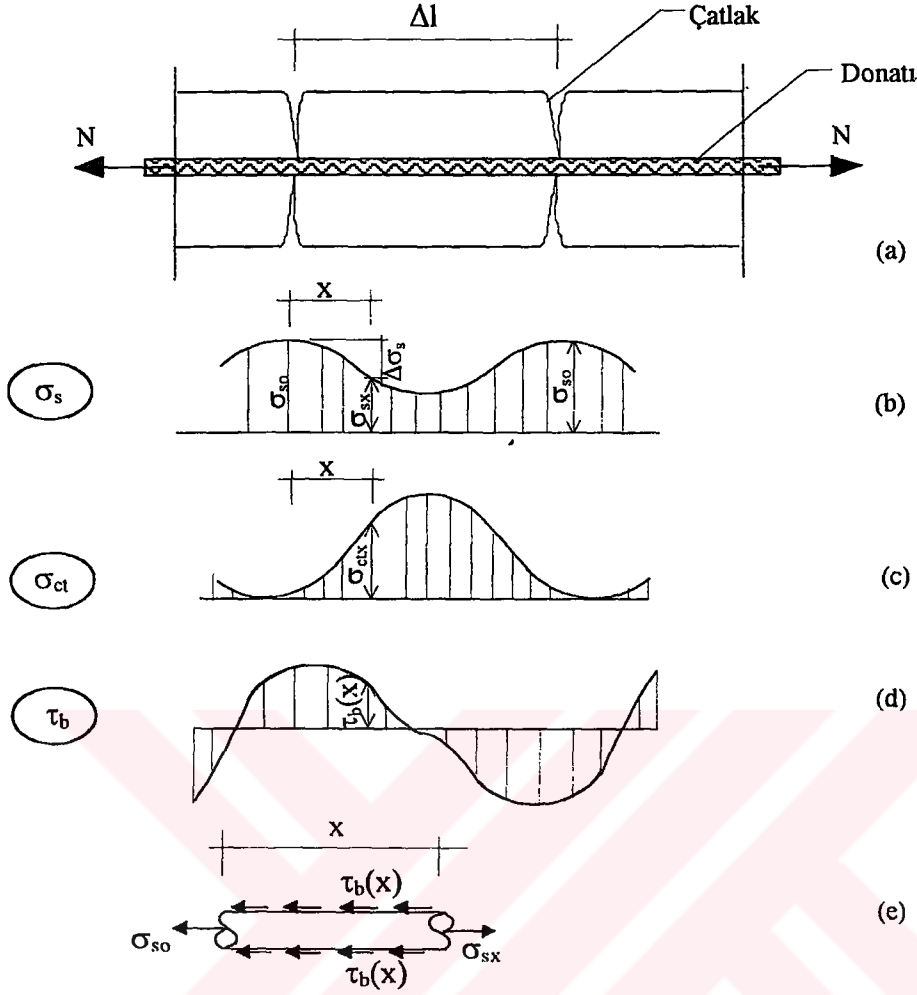
$$\sigma_{sm} = \sigma_{so} - \frac{1}{\rho} \cdot \sigma_{ctm} \quad (2.29)$$

bağıntısıyla , ortalama şekildeğiştirme ise,

$$\epsilon_{sm} = \frac{\sigma_{sm}}{E_s} = \left( \sigma_{so} - \frac{\sigma_{ctm}}{\rho} \right) \cdot \frac{1}{E_s} \quad (2.30)$$

bağıntısıyla elde edilmektedir.





Şekil 2.29. Merkezi çekme etkisindeki bir elemenda çatlaklar, donatı, beton ve donatı-beton arasındaki aderans gerilmeleri

### b) Ortalama çatlak genişliği ( $w_m$ )

Yukarıdaki bağıntılar yardımıyla ortalama çatlak genişliği ( $w_m$ ), (2.27) bağıntısıyla belirlenen ortalama çatlak mesafesi ve (2.30) bağıntısıyla belirlenen ortalama donatı şekildeğiştirilmesinin çarpılması suretiyle,

$$w_m = \left[ k_4 \cdot c + k_5 \cdot \frac{f_{ct} \cdot \phi}{\tau_b \cdot \rho} \right] \left[ \sigma_{so} - \frac{\sigma_{ctm}}{\rho} \right] \cdot \frac{1}{E_s} \quad (2.31)$$

olarak elde edilmektedir. Bu bağıntıdaki  $\sigma_{ctm}$  yerine,  $k_6$  bir sabiti göstermek üzere,  $k_6 f_{ct}$ ,  $k_5 f_{ct} / \tau_b$  yerine ise  $k_7$  yazılırsa, ortalama çatlak genişliği bağıntısı,

$$w_m = \left[ k_4 \cdot c + k_7 \cdot \frac{\phi}{\rho} \right] \left[ \sigma_{so} - k_6 \cdot \frac{f_{ct}}{\rho} \right] \cdot \frac{1}{E_s} \quad (2.32)$$

şeklini almaktadır. Bu bağıntı, özel sabitler deneysel yolla belirlendiği takdirde, çatlak genişliğinin tahminine imkan tanımaktadır. Bağıntıdan da görüldüğü gibi ortalama çatlak genişliğine etki eden başlıca parametreler; paspayı, donatı çapı, donatı oranı, donatı-beton aderansı, betonun çekme dayanımı ve çatlamış kesit donatısındaki gerilme ( $\sigma_{so}$ ) değerleridir. Deneysel çalışmalar bu sonucu doğrulamakla beraber, donatı çapı ve beton dayanımının diğer parametreler kadar etkili olmadığını da ortaya koymuştur[112,113].

Burada, heterojen bir malzeme olan betonla üretilen betonarmede, çatlama olayının, zayıf kesitler en çok zorlananlardan daha önce çatlayabildiğinden, biraz da rastgele bir olay olduğunu, çatlak genişliğinin de rastgele değerler aldığı, bu nedenle (2.32) bağıntısıyla hesaplanan ortalama çatlak genişliğinin deneylerden elde edilen sonuca yaklaşabilmesi için deneye tabi tutulan numune sayısının yeterli donatıya sahip olması halinde, bu bağıntının ilk çatlamadan itibaren kırılma anına kadar kullanılabileceğini belirtmek uygun olmaktadır.

Daha önce de belirtilmiş olduğu gibi (2.32) bağıntısı her ne kadar merkezi çekme etkisindeki bir eleman için çıkarılmış olsa da uygun donatı oranları tanımlamak suretiyle diğer kesit etkileriyle zorlanan elemanlar için de kullanılabileceğinden bu bağıntıyı ortalama çatlak genişliğinin hesaplanmasında kullanılabilecek genel bir bağıntı olarak adlandırmakta mümkün olmaktadır.

### 2.2.1.10.1.2. Eğilme ve Nervürlü Donatı Çatlakları

#### a) Eğilme Çatlakları

Eğilme çatlağının donatı ağırlık merkezindeki ortalama genişliği, (2.32) bağıntısında  $k_4=2$ ,  $k_7=0,12$ ,  $k_6 f_{ct}=\beta$  ve  $E_s=2.10^5$  MPa konmak suretiyle elde edilen, çatlak çeşitlerinden merkezi çekme çatlağının ortalama genişliği olarak tanımlanan

$$w_m = \left[ 2 \cdot c + 0,12 \cdot \frac{\phi}{\rho} \right] \left[ \sigma_{so} - \frac{\beta}{\rho} \right] \cdot 5 \cdot 10^{-6} \quad (2.33)$$

bağıntıdaki  $\rho$  yerine  $A_s$  toplam asal çekme donatısını,  $h$  kesit yüksekliğini,  $d$  faydalı yüksekliği ve  $b_w$  kesitin enini göstermek üzere  $\rho_r = A_s / 2.b_w.(h - d)$  ile tanımlanan (Şekil 2.30) etkin donatı oranının konması suretiyle,

$$w_m = \left[ 2.c + 0,12. \frac{\phi}{\rho_r} \right] \left[ \sigma_{so} - \frac{\beta}{\rho_r} \right] . 5.10^{-6} \quad (2.34)$$

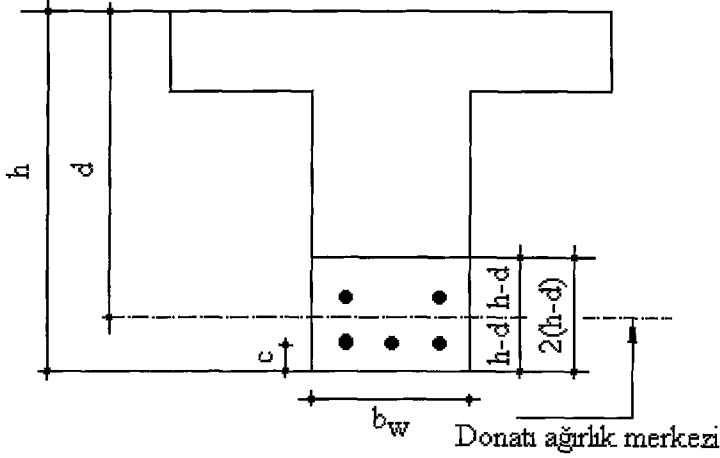
bağıntısıyla hesaplanabilmektedir. Bu bağıntıda düz yüzeyli donatı için  $\beta=0$ , nervürlü donatı için ise genellikle  $\beta=2$  MPa koymak uygun olmaktadır.

Burada, merkezi çekme etkisindeki elemanlarda olduğu gibi, karakteristik çatlak genişliğinin (2.34) bağıntısıyla belirlenen, ortalama çatlak genişliğinin 1,7 ile çarpılmasıyla hesaplanacağı belirtilmelidir.

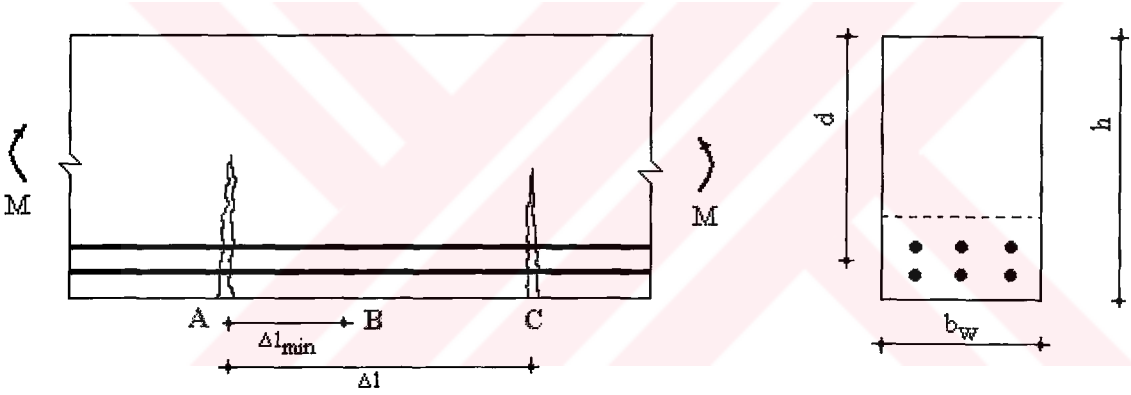
Salt eğilme etkisindeki elemanlarda en çok çekme etkisinde kalan lifteki gerilme betonun eğilmedeki çekme dayanımına ulaştığında genellikle maksimum moment bölgesinde ilk çatlak meydana gelmektedir. Momentin sabit olduğu, diğer bir deyişle kesme kuvvetinin sıfır olduğu bölgelerde meydana gelen çatlaklar, asal çekme gerilmelerine dolayısıyla da eleman eksenine dik doğrultuda oluşmaktadır. İlk çatlağın genişliği ve boyu genellikle çok küçük olmaktadır. Bu nedenle, bilimsel çalışmalarda bunları çıplak gözle belirlemek çok güç olduğundan bu amaçla büyüteç ya da büyütme gücü yüksek mikroskoplar kullanılmaktadır. Yük artmaya devam ettiğinde çatlak boyları ve genişlikleri büyümekte, yeni çatlaklar meydana gelmekte ve mevcut çatlaklar da dallanıp budaklanabilmektedirler. Kesitte eğilme momentine ilaveten kesme kuvvetinin de bulunması durumunda meydana gelen çatlaklar artık eleman eksenine dik olmamakta ancak diğer çatlaklar gibi asal çekme gerilmelerine dik doğrultuda meydana gelmektedirler.

Eğilme çatlakları, genellikle en çok çekme etkisinde kalan lifte en geniş olup, bu genişlik tarafsız eksen düzeyine doğru giderek azalmaktadır (Şekil 2.31).

Deneysel çalışmalarda yük artmaya devam ederken, çatlak genişlik ve boylarındaki çok çabuk artmalar, donatıdaki akmanın başladığına işaret etmektedir. Kırılma anında elemanın basınç etkisindeki en üst lifi ile çatlağın ucu arasındaki basınç bölgesinde beton ezilmektedir.



Şekil 2.30. Eğilme etkisindeki kiriş enkesitinde çatlakla ilgili alan



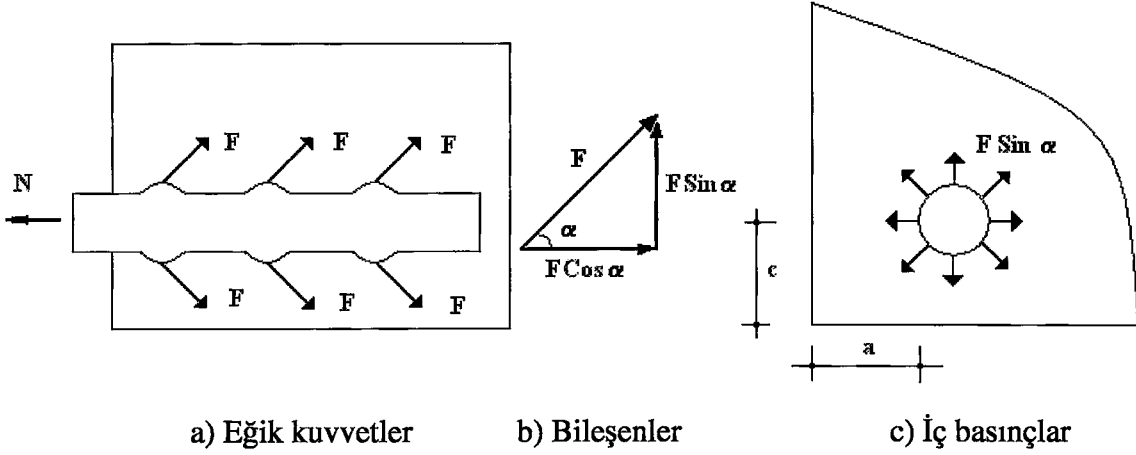
Şekil 2.31. Tarafsız eksen düzeyine doğru gidildikçe genişlikleri azalan eğilme çatlakları

Burada bu tür çatlama ve kırılmanın özellikle eğilme etkisindeki normal donatılı elemanlarda meydana geldiğini, dengeli, denge üstü ve kritik donatılı elemanlarda kırılmanın gevrek olduğunu, bu tür kırılmaların adaptasyona imkan tanımadığını, belirtmek uygun olmaktadır.

### b) Nervürlü Donatıdan Doğan Çatlaklar

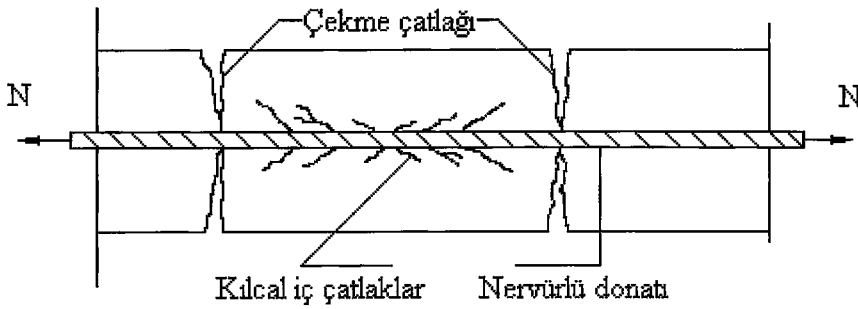
Aderansı geliştirilmiş donatı adıyla da anılmakta olan nervürlü donatıların betonla kenetlenmesi düz yüzeyli donatılara göre çok daha iyi olmakla beraber bunların, nervürleri (dişleri) düz yüzeyli donatılardan farklı olarak, betona eğik kuvvet ( $F$ ) uygulamaktadırlar. (Şekil 2.32a) Bu kuvvetin düşey ve yatay bileşenleri sırasıyla  $F \sin \alpha$  ve  $F \cos \alpha$  şeklindedir.

Bunlardan düşey bileşenler, iç basınç etkisindeki bir boru cidarında meydana gelen çekme gerilmelerine benzer şekilde, betonda çekme gerilmesi oluşturmaktadır (Şekil 2.32b ve Şekil 2.32c).



Şekil 2.32. Nervürlerin betona uyguladığı eğik kuvvetler, bileşenleri ve düşey bileşenin betonda oluşturduğu iç basınçlar

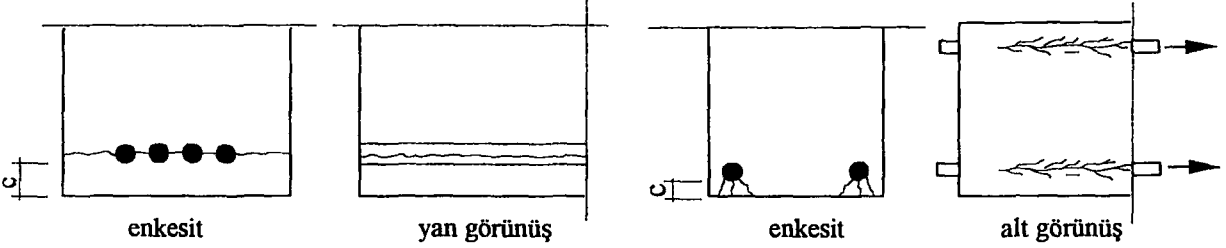
Nervürlerin betona uyguladığı kuvvetlerin yatay ve düşey bileşenlerinin, diğer bir deyişle teğetsel ve radyal kuvvetlerin oluşturduğu asal çekme gerilmeleri betonda iç çatlakların meydana gelmesine neden olmaktadır (Şekil 2.33) [112,113].



Şekil 2.33. Merkezi çekme etkisindeki bir elemanda nervürlü donatıdan dolayı meydana gelen kılcal iç çatlaklar

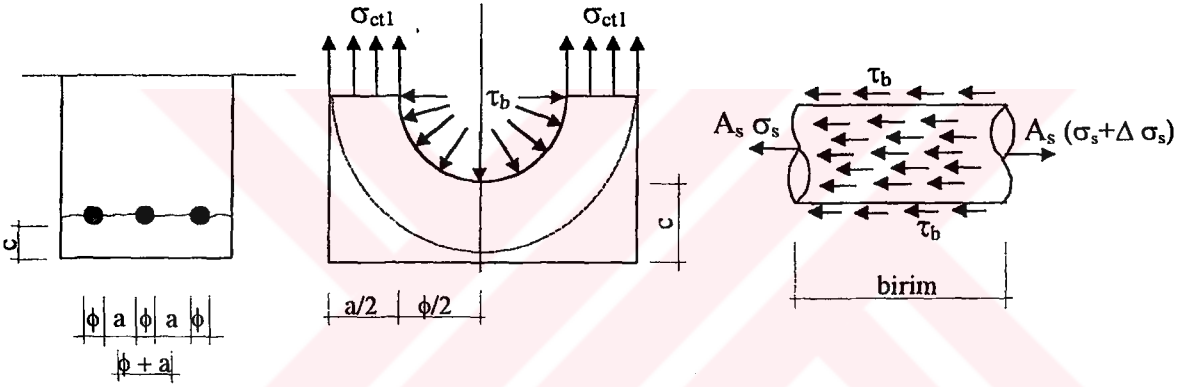
Bu kılcal iç çatlaklar, donatı-beton aderansını sağlayan kuvvetin düşey bileşeninin kaybolduğunu ve bu aşamadan sonra betonla donatı arasındaki aderansın sadece yatay bileşenle karşılandığını göstermektedir.

Donatıdaki gerilme arttıkça iç çatlaklar ilerlemekte ve böylece pas payının en küçük olduğu eleman yüzelerine ulaşarak buralardan görülmeye başlamaktadırlar (Şekil 2.34.a ve Şekil 2.34.b).



a) Büyük pas payı ve donatıların sık yerleştirilmesi durumunda yan yüzlerde çatlama (yatay yarıлма)

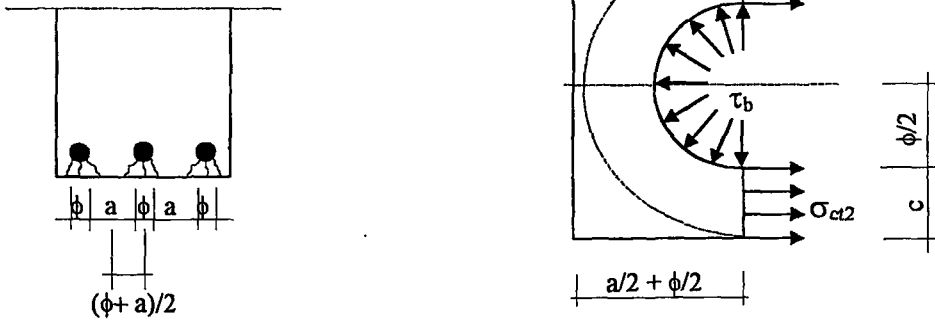
b) Küçük pas payı ve donatıların büyük aralıklarla yerleştirilmesi durumunda alt yüzde çatlama (düşey yarıлма)



c) Çatlamanın elemanın yüzlerinde oluşması durumu (yatay yarıлма)

d) Yan yüzlerde çatlama için serbest cismin kesitteki konumu

e) Serbest cisim



f) Çatlamanın elemanın alt yüzünde meydana gelmesi durumu (düşey yarıлма)

g) Alt yüzlerde çatlama için serbest cismin kesitteki konumu

Şekil 2.34. Nervürlü donatıdan doğan çeşitli çatlaklar

Bu tür çatlakların en belirgin özeliği donatı eksenini boyunca meydana gelmiş olmalarıdır. Aşağıda kanıtlanacağı gibi, çatlakın elemanın hangi yüzünde meydana geleceği, donatı çubukları arasındaki serbest aralığın paspayına oranına ( $a/c$ ) bağlıdır. Bunun için çatlamanın önce elemanın yan yüzünde meydana geldiği (Şekil 2.34.c) ve serbest cismin de Şekil 2.34.d ve Şekil 2.34.e' deki gibi olduğu, nervürlü donatının betona uyguladığı eğik kuvvetin donatı eksenine yaptığı açının  $45^\circ$ , dolayısıyla da sözkonusu kuvvetin ve bundan doğan gerilmelerin yatay ve düşey bileşenlerinin birbirine eşit olduğu dikkate alınmaktadır. Bu da söz konusu iki bileşenden her birinin  $\tau_b$  aderans gerilmesine eşit olduğunu kabul etmek demektir. Bu durumda Şekil 2.34.d' de verilen serbest cismin kuvvet denge denkleminde;

$$\sigma_{ct1} \cdot a/2 = \int_0^{\pi/2} \tau_b \cdot dA \cdot \sin \theta \quad (2.35)$$

bağıntısı yazılabilmektedir. Bu bağıntıda  $dA = \phi/2 \cdot d\theta$  olarak yerine konup gerekli işlemler yapılırsa, buradan;

$$\sigma_{ct1} = \tau_b \cdot \frac{\phi}{a} \quad (2.36)$$

olarak elde edilmektedir. Diğer taraftan, Şekil 2.34.e' den denge gereği  $A_s = \pi\phi^2/4$ 'ü göstermek üzere,

$$\tau_b = \frac{A_s \cdot \Delta\sigma_s}{\pi\phi} = \frac{\phi \cdot \Delta\sigma_s}{4} \quad (2.37)$$

olarak ifade edilebilmektedir. Bu yerine konulursa (2.36) bağıntısı,

$$\sigma_{ct1} = \frac{\phi^2 \cdot \Delta\sigma_s}{4a} \quad (2.38)$$

şekline gelmektedir. Çatlamanın elemanın alt yüzünde (Şekil 2.34f) meydana geldiği ve bunun için serbest cismin Şekil 2.34g' deki gibi olduğu dikkate alınır ve kuvvet denge denklemi yazılırsa,

$$\sigma_{ct2}.c = \int_0^{\pi/2} \tau_b \cdot \frac{\phi}{2} \cdot \sin \theta \cdot d\theta \quad (2.39)$$

olarak elde edilmektedir. Bu bağıntı gerekli işlemlerden sonra,

$$\sigma_{ct2} = \tau_b \cdot \frac{\phi}{2.c} \quad (2.40)$$

şeklini almaktadır. Burada  $\tau_b$  yerine (2.37) bağıntısındaki değeri yazılırsa,

$$\sigma_{ct2} = \frac{\phi^2 \cdot \Delta \sigma_s}{8.c} \quad (2.41)$$

olarak elde edilmektedir. Bu tür çatlama elemanın meydana gelebilmesi için (2.36) ve (2.40) bağıntılarında  $\sigma_{ct1} = f_{ct}$  ve  $\sigma_{ct2} = f_{ct}$  olmak zorundadır. Bu da  $a=2c$  için, çatlakların elemanın alt ve yan yüzünde aynı anda meydana geleceğini göstermektedir. Buradan teorik olarak aşağıdaki sonuçlara varmak mümkün olmaktadır:

- 1)  $a/c=2$  için çatlama elemanın alt ve yan yüzlerinde aynı anda meydana gelir.
- 2)  $a/c < 2$  için çatlama elemanın sadece yan yüzünde meydana gelir.
- 3)  $a/c > 2$  için ise çatlama elemanın sadece alt yüzünde meydana gelir.

#### 2.2.1.10.2. Beton Kalitesinin Betonarme Kirişlerin Çatlama Durumu Üzerindeki Etkisi

Bu çalışmaya konu olan yüksek başarımli ve geleneksel betonarme kirişlerin kırılma anında sabit moment bölgelerinde belirlenen çatlak sayıları, çatlak mesafeleri, deneysel, teorik ve karakteristik çatlak genişlikleri Çizelge 2.19' da, kırılma yükü altında kiriş ön yüzlerinde meydana gelen şematik çatlama durumları yüksek başarımli betonarme kirişler için Şekil 2.35, geleneksel betonarme kirişler için Şekil 2.36' da bunlara ilişkin bazı fotoğraflar ise Şekil 2.37' de verilmektedir.

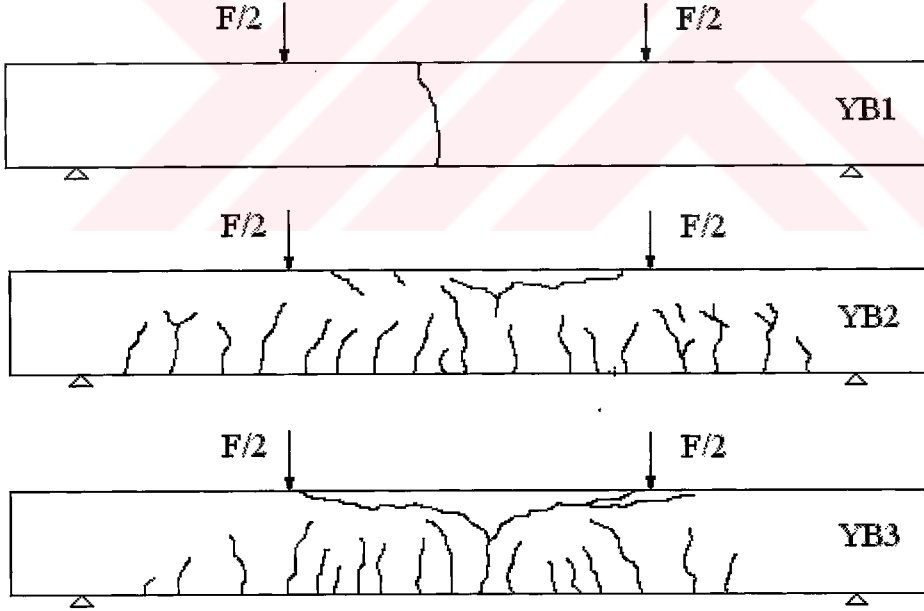
Burada kirişlerin çatlama durumları incelenirken, deney düzeneği üzerindeki konumuna göre, ön ve arka yüzlerde meydana gelen çatlakların dikkate alındığını, ancak çatlama durumları her iki yüzde de pratik olarak bir birinin benzeri olduğundan, sadece ön yüzdeki şematik çatlak durumlarının verildiğini, Çizelge 2.19' daki deneysel ortalama



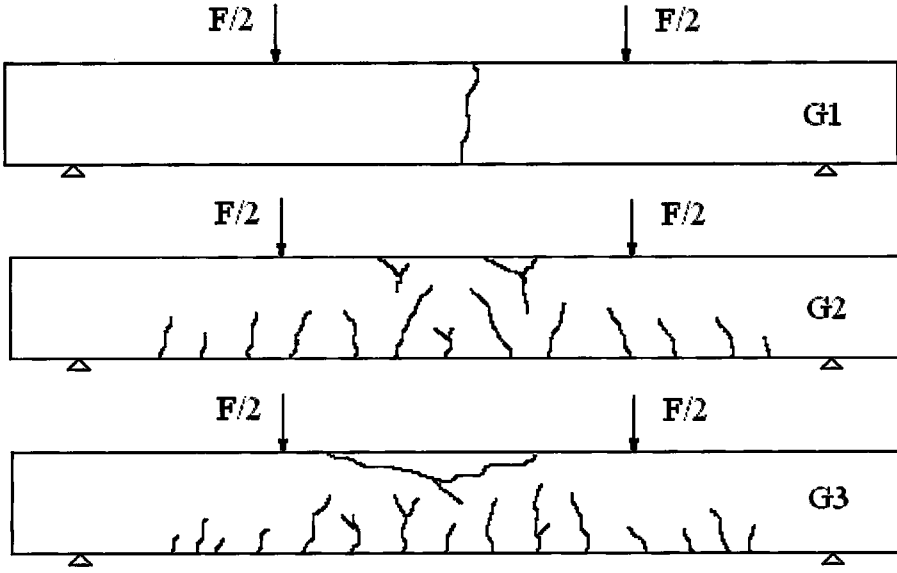
çatlak genişliklerinin ise  $0,90F_r$  yükü altında ölçülen değerler olduğunu belirtmek uygun olmaktadır.

Çizelge 2.19. Yüksek başarımlı ve geleneksel betonarme kirişlerde momentin sabit olduğu bölgede kırılma yükü altında oluşan çatlak sayısı, ortalama çatlak mesafeleri, deneysel, teorik ve karakteristik çatlak genişlikleri

Kiriş Tipi	Asal Çekme Donatısı ( $A_s$ )	Donatı Oranı ( $\rho$ )	Çatlak Sayısı	Ortalama Çatlak Mesafesi (mm)	Deneysel Ortalama Çatlak Genişliği ( $w_m$ ) (mm)	Teorik Ortalama Çatlak Genişliği ( $w_m$ ) (mm)	Karakteristik Çatlak Genişliği ( $w_k$ ) (mm)
YB1	Donatısız	-	-	-	-	-	-
YB2	2 Ø 8	0,0050	10	80	1,00	0,017	0,029
YB3	2 Ø 10	0,0079	13	76	0,90	0,016	0,027
G1	Donatısız	-	-	-	-	-	-
G2	2 Ø 8	0,0050	7	98	0,90	0,014	0,024
G3	2 Ø 10	0,0079	9	85	0,80	0,013	0,022



Şekil 2.35. Yüksek başarımlı beton ve betonarme kirişlerin, kırılma yükü altında ön yüzlerinin şematik çatlama durumu



Şekil 2.36. Geleneksel beton ve betonarme kirişlerin, kırılma yükü altında ön yüzlerinin şematik çatlama durumu



Şekil 2.37. Yüksek başarımlı ve geleneksel beton ve betonarme kirişlerin kırılma yükü altında momentin sabit olduğu bölgedeki çatlama durumlarına ilişkin bir fotoğraf

### 2.2.1.10.3. Beton ve Betonarme Kirişlerin İlk Çatlama Momentleri

Deneysel ilk çatlama momentleri, kiriş alt yüzünde beton ve donatıya yapıştırılan birim şekildeğiştirme ölçerleri yardımıyla belirlenen maksimum birim uzamalara bağlı olarak hesaplanmaktadır. Zira, betonda ilk mikro çatlak oluşur oluşmaz yük-şekildeğiştirme eğrilerinin eğimleri ani olarak değişmektedir. Teorik ilk çatlama momentleri ( $M_{cr}$ ) ise, Madde 2.2.1.8' de verilen bağıntıyla hesaplanmaktadır. Buna göre beton ve betonarme kirişlerin deneysel ve teorik ilk çatlama momentleri ve ilk çatlama oluşturulan maksimum birim uzamalar Çizelge 2.20' de verilmektedir.

Çizelge 2.20. Yüksek başarımlı ve geleneksel beton ve betonarme kirişlerin ilk çatlama momentleri ve ilk çatlama oluşturulan maksimum birim uzamalar

Kiriş Kod ve Tipleri	Asal Çekme Donatısı ( $A_s$ )	Deneysel İlk Çatlama Momentleri (kNm)	Teorik İlk Çatlama Momentleri (kNm)	İlk Çatlama Oluşturan Maks. Birim Uzamalar ( $10^6 \epsilon_{ct}$ )
YB1	Donatısız	2,68	2,37	100
YB2 (A)	2 Ø 8	3,48	2,51	105
YB3 (A)	2 Ø 10	4,22	2,62	105
G1	Donatısız	2,01	1,76	100
G2 (A)	2 Ø 8	2,81	1,89	110
G3 (A)	2 Ø 10	3,08	1,97	115

### 2.2.1.11. Beton ve Betonarme Kirişlerin Denetim Deneyleri

Deney kirişlerinin üretiminde kullanılan yüksek başarımlı ve geleneksel betonların, mekanik özellikleri yönünden, yeniden üretilebilirlikleri denetlemek amacıyla her bir karışımdan alınan standart silindir ( $\varnothing=150\text{mm}$ ,  $h=300\text{ mm}$ ) numuneler üzerinde merkezi basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Buna göre üretilen yüksek başarımlı ve geleneksel betonların ortalama merkezi basınç dayanımları Çizelge 2.21' de verilmektedir.

Bu çizelgeden beton gibi heterojen ve özellikleri dağılım gösteren bir malzeme için denetim numunelerinden elde edilen ortalama merkezi basınç dayanımları arasındaki farkın büyük olmadığı, dolayısıyla da betonların yeniden üretilebilirliğinin yeterli düzeyde olduğu anlaşılmakta ve böylece bu betonlarla üretilen betonarme kirişlerin davranışlarının karşılaştırılması mümkün olmaktadır.

Çizelge 2.21. Beton ve betonarme deney kirişlerinin üretiminde kullanılan yüksek başarımlı ve geleneksel betonların ortalama merkezi basınç dayanımları

Kiriş Kod ve Tipleri	Ortalama Merkezi Basınç Dayanımları (MPa)	
	Yüksek Başarımlı Betonlarda	Geleneksel Betonlarda
YB1,G1	66	35
YB2,G2 (A)	65	34
YB3,G3 (A)	66	36

### 2.2.1.12. Yüksek Başarımlı ve Geleneksel Betonarme Kiriş Davranışlarının Karşılaştırılması ve İrdelemeler

Yüksek başarımlı ve geleneksel betonarme kirişler üzerinde gerçekleştirilen deneysel ve teorik çalışmalardan elde edilen bulgular yardımıyla yapılan karşılaştırma sonuçları aşağıda verilmektedir.

Yüksek başarımlı betonarme kirişlerin kırılma anındaki deneysel ortalama sehimleri geleneksel betonarme kirişlerinkinden %30 civarında daha küçüktür. Bu da yüksek başarımlı betonarme kirişlerin geleneksel betonarme kirişlere göre sünekliklerinin dolayısıyla da tüketecekleri enerjinin daha az olduğunu göstermekte ve bu sonuç teorik ortalama sehim sonuçlarıyla da desteklenmektedir (bkz. Çizelge 2.14).

Daha önce Madde 2.2.1.8' de verilen yük-şekildeğiştirme eğrilerinden de görülebileceği gibi (bkz. Şekil 2.18 ve Şekil 2.19) yüksek başarımlı betonarme kirişlerin şekildeğiştirmeleri aynı yük altındaki geleneksel betonarme kirişlerinkinden daha küçük olmaktadır. Bu durum yüksek başarımlı betonarme kirişlerin, geleneksel betonarme kirişlere göre, adaptasyon yapma kapasitelerinin daha küçük olduğuna işaret etmektedir.

Yüksek başarımlı betonarme kirişlerin deneysel kırılma yükleri (bkz. Çizelge 2.14), dolayısıyla da deneysel kırılma momentleri ( $M_{re}$ ) (bkz. Çizelge 2.17) geleneksel betonarme kirişlerinkilerle pratik olarak aynıdır. Bu da beton basınç dayanımının kırılma momenti üzerindeki etkisinin fazla olmadığını göstermektedir.

Yüksek başarımlı ve geleneksel betonarme kirişlerin her ikisinde de teorik kırılma momentleri ( $M_{rt}$ ) her zaman deneysel kırılma momentlerinden ( $M_{re}$ ) küçük olmaktadır (bkz. Çizelge 2.17). Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri denetim altında tutulmuş olduğundan momentler arasındaki farkın malzeme karakteristiklerinden dolayı ortaya çıkma ihtimali yok denecek kadar azdır. Ancak bütün farkların aynı yönde gelişmiş olması en azından hesap varsayımlarının gerçeği tam yansıtmadığına işaret etmektedir.

Betonunu kırılma anındaki birim kısalmasının sınırlandırılmış olması, teorik kırılma momentinin deneysel kırılma momentinden küçük bulunmasına neden olabilecek durumdadır. Çatlaklar civarındaki şekildeğişimler genellikle ölçülen değerleri geçmektedir. Bu da deneysel kırılma momentinin teorik kırılma momentinden büyük bulunmasının bir nedeni olabileceğine işaret etmektedir. Diğer taraftan betondaki gerilme dağılımı hesaplarda kabul edilen dağılımdan farklı olabileceği gibi, eğilmedeki basınç dayanımının da, merkezi basınç dayanımından büyük olma ihtimali de mevcuttur. Bu nedenle bir çok araştırmacı, eğilmede basınç dayanımı için, merkezi basınç dayanımının %20 artırılmasının uygun olacağı düşüncesini paylaşmaktadır.

Deneysel kırılma momentinin teorik kırılma momentine oranı olarak belirlenen, deneysel emniyet katsayıları ( $\gamma_f$ ) yüksek başarımlı betonarme kirişler (YB2 ve YB3) için, sırasıyla 1,06 ve 1,10 geleneksel betonarme kirişler (G2 ve G3) için ise sırasıyla 1,08 ve 1,12' dir. Bu da teorik kırılma momentinin hesabında kullanılan, eşdeğer dikdörtgen gerilme dağılımını belirleyen ve yüksek başarımlı betonlar için Kaynak [21]' de geleneksel betonlar için ise Kaynak [22]' de önerilen,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  katsayılarının oldukça gerçeği yansıttığını göstermektedir (bkz. Çizelge 2.15 ve Çizelge 2.18).

Bununla birlikte deneysel kırılma momentinin kullanım momentine ve tasarım kırılma momentine oranı olarak belirlenen deneysel emniyet katsayıları ( $\gamma_s$  ve  $\gamma_r^{***}$ ) yüksek başarımlı betonarme kirişler (YB2 ve YB3) için sırasıyla 2,30 - 2,44 ve 1,53 - 1,63 geleneksel betonarme kirişler (G2 ve G3) için ise sırasıyla 2,43 - 2,57 ve 1,62 - 1,72 değerlerini almaktadır. Bu da kullanım momentinin dolayısıyla da tasarım kırılma momentinin hesaplanmasında kullanılan yöntemin oldukça emniyetli tarafta sonuçlar verdiğini göstermektedir (bkz. Çizelge 2.18).

Yüksek başarımlı betonarme kirişlerin kırılma yükü altında momentin sabit olduğu bölgede belirlenen çatlakların sayısı, geleneksel betonarme kirişlerinkinden 2. ve 3. seride sırasıyla %43, %45 daha fazla, ortalama çatlak mesafeleri ise %18, %11 daha azdır (bkz.. Çizelge 2.19, Şekil 2.35 ve Şekil 2.36). Bu durum çalışmalarımıza konu olan yüksek başarımlı betonun donatı-beton aderansının geleneksel betonunkinden daha iyi olduğunu, dolayısıyla da kesitten kesite adaptasyon kapasitelerinin daha yüksek olduğunu göstermekte ve böylece teknik literatürde bu konuda mevcut bilgileri desteklemektedir.

Yüksek başarımlı ve geleneksel betonarme kirişler için Madde 2.2.1.10.1.1.' de verilen (2.34) bağıntısıyla hesaplanan teorik ve deney anında  $0,90F_r$  yükü altında ölçülen deneysel ortalama çatlak genişlikleri ile karakteristik çatlak genişliklerinin donatı oranı

arttıkça küçüldüğü (bkz. Çizelge 2.19), belirlenen karakteristik çatlak genişliklerinin ise kullanım sınırları içinde kaldığı görülmektedir (bkz. kaynak [22]).

Yüksek başarılı betonarme kirişlerin deneysel ilk çatlama momentleri, geleneksel betonarme kirişlerinkinden en çok %37 daha büyük olmaktadır (bkz. Çizelge 2.20). Bu da beton çekme dayanımındaki değişimin ilk çatlama momenti üzerindeki etkisinin basınç dayanımı değişiminin kırılma momenti üzerindeki etkisinden çok daha büyük olduğunu göstermektedir.

Donatı miktarındaki değişim yüksek başarılı ve geleneksel betonda ilk çatlama oluşturulan maksimum birim uzamaları pratik olarak değiştirmemektedir. Bu durum ilk çatlama nedeninin, maksimum çekme gerilmelerinden çok, maksimum birim uzamalar olduğuna işaret etmektedir.

Burada bu sonucun daha önce gerçekleştirilmiş olan çalışma sonuçlarını [46,114,115,116] desteklediğini de belirtmek uygun olmaktadır.

Aktif yada pasif hiçbir donatı kullanılmayan, yalnız betondan üretilen kirişlerdeki kırılmalar, her zaman kiriş alt yüzünde oluşan ilk mikro çatlakla aynı anda ani olarak meydana gelmektedir. Kırılma yükleri iyi bir hassasiyetle saptandığından gözlenen bu olay da her zaman açık bir şekilde meydana gelmektedir. Bu kirişlerin üst ve alt yüzlerinde boyuna doğrultuda oluşan birim boy değişimlerinin ordinat eksenine göre pratik olarak simetrik olduğu da görülmektedir. Bu durum ise betonun eğilme momenti altında çekme ve basınçta simetrik davranışa sahip olduğunu, dolayısıyla betonun yapımındaki başarıyı vurgulayarak, düzlem kesitlerin düzlem kaldığını da doğrulamaktadır. Büyük bir titizlikle üretilen beton kirişlerin bu davranışı (bkz. Şekil 2.17), diğer serilerdeki kirişler üzerinde elde edilen bulguların karşılaştırılması, değerlendirilmesi ve denetimlerinde bir ölçü olarak kullanılabilceği düşüncemizi doğrulamaktadır.

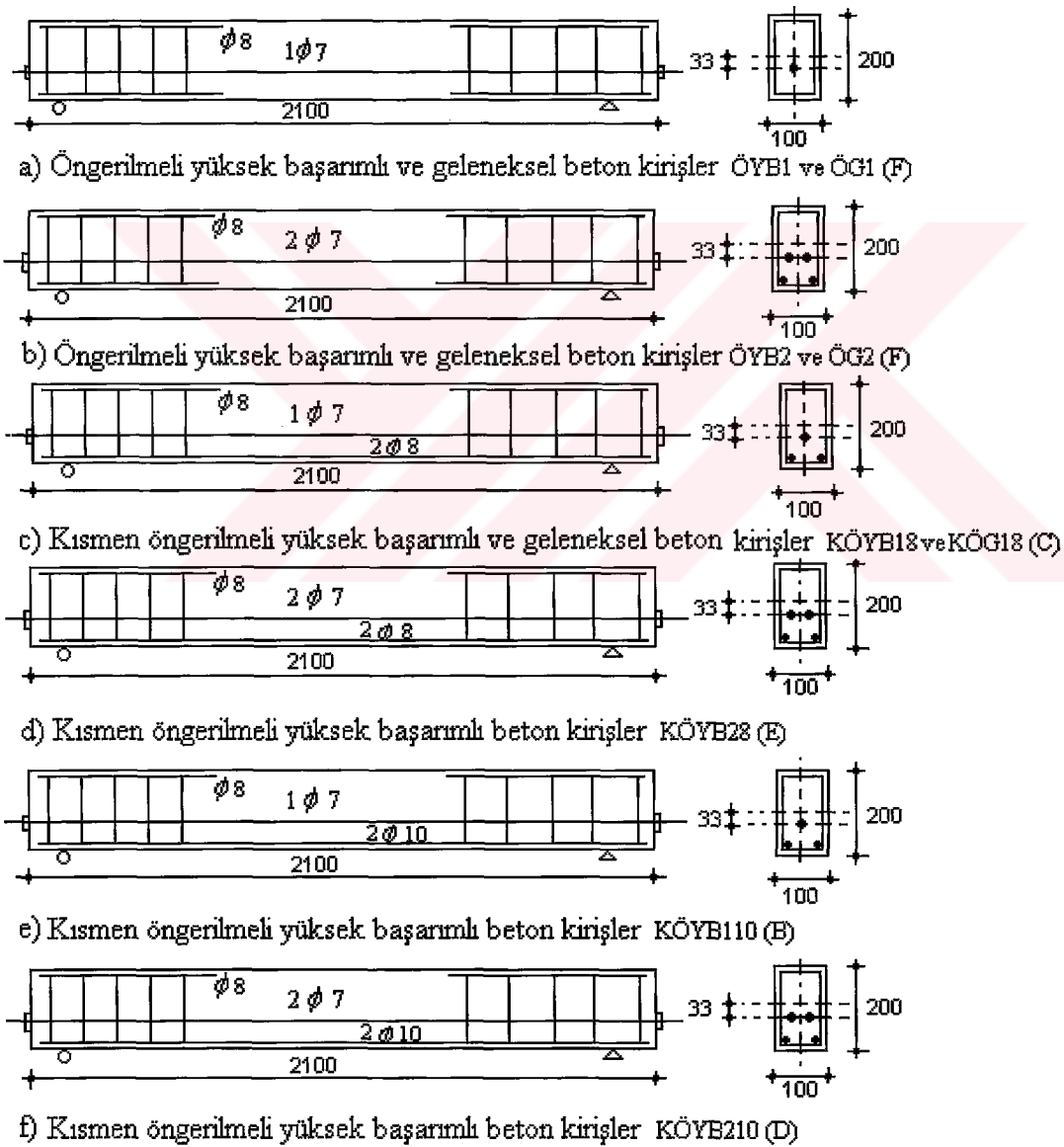
### **2.2.2. Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Deney Kirişleri**

Bu başlık altında çalışmamıza konu olan yüksek başarılı ve geleneksel betonlar kullanılarak üretilen kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerin salt eğilme etkisi altındaki davranışları teorik ve deneysel olarak incelenmektedir.

Teorik ve deneysel incelemeler; daha önce Madde 1.6' da çalışmanın amaç ve kapsamı başlığı altında da belirtildiği gibi, deney kirişlerinin dayanım, şekildeğiştirme ve çatlama durumlarını dikkate almak suretiyle gerçekleştirilmektedir.

### 2.2.2.1. Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Deney Kirişlerinin Özellikleri ve Donatı Şemaları

Daha önce Madde 1.3' de tanımlanan, farklı kısmen öngerilme oranlarına sahip kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerin boyutları betonarme kirişlerde olduğu gibi 10cmx20cmx210cm olarak seçilmiştir (bkz. Madde 2.2.1.1). Bu kirişlerin kısmen öngerilme oranları ve donatı miktarları Çizelge 2.22' de, donatı dışmerkezliklerini ve konumlarını içeren donatı şemaları ise Şekil 2.38' de verilmektedir.



Şekil 2.38. Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başırlı ve geleneksel beton kirişlerin donatı şemaları ve aktif donatı dışmerkezlikleri

Burada pasif donatıların kesite pas payı bırakılarak, aktif donatıların ise kiriş üst lifindeki gerilmenin sıfır olmasını sağlayan teorik dış merkezliğe göre ( $e=h/6$ ) yerleştirildiğini ve kirişlerin hepsinde etriye sayısı ile etriyeler arasındaki mesafelerin aynı ( $\phi 8/10$ ) olduğunu belirtmek uygun olmaktadır.

İlk seri deneyler aktif ve pasif hiçbir donatı içermeyen sadece yüksek başarılı ve geleneksel betondan üretilen kirişler, ikinci ve üçüncü seri deneyler (A), kısmen öngerilme oranı %0' a karşılık gelen, daha önce Madde 2.2.1' de üretim amaçları ve özellikleri verilen yüksek başarılı ve geleneksel betonarme kirişler, dördüncü ve beşinci seri deneyler (B ve C), kısmen öngerilme oranları %40 ve %50' ye karşılık gelen kısmen öngerilmeli yüksek başarılı beton kirişler, altıncı seri deneyler (C), kısmen öngerilme oranı %50' ye karşılık gelen kısmen öngerilmeli geleneksel beton kirişler, yedinci ve sekizinci seri deneyler (D ve E), kısmen öngerilme oranı %60 ve %70' ye karşılık gelen kısmen öngerilmeli yüksek başarılı beton kirişler, dokuzuncu seri deneyler (F), kısmen öngerilme oranı %100' e karşılık gelen öngerilmeli yüksek başarılı ve geleneksel beton kirişler üzerinde gerçekleştirilmiştir (Çizelge 2.22).

Çizelge 2.22. Deney kirişlerinde kullanılan kısmen öngerilme oranları ve donatı miktarları

Kiriş Serileri	Kiriş Kod ve Tipleri	Pasif Donatı	Aktif Donatı	Etriye	Kısmen Öngerilme Oranı (%PPR)	Toplam Donatı Oranı $\rho_{top.}$	Pasif Donatı Oranı $\rho_s$	Aktif Donatı Oranı $\rho_p$
1	YB1, G1	-	-	-	-	-	-	-
2	YB2, G2 (A)	2 Ø 8	-	Ø8/10	0	0,0050	0,0050	-
3	YB3, G3 (A)	2 Ø 10	-	Ø8/10	0	0,0079	0,0079	-
4	KÖYB110(B)	2 Ø 10	1Ø7	Ø8/10	40	0,0098	0,0079	0,0019
5	KÖYB18 (C)	2 Ø 8	1Ø7	Ø8/10	50	0,0069	0,0050	0,0019
6	KÖG18 (C)	2 Ø 8	1Ø7	Ø8/10	50	0,0069	0,0050	0,0019
7	KÖYB210(D)	2 Ø 10	2Ø7	Ø8/10	60	0,0117	0,0079	0,0038
8	KÖYB28 (E)	2 Ø 8	2Ø7	Ø8/10	70	0,0088	0,0050	0,0038
9	ÖYB1, ÖG1 (F)	-	1Ø7	Ø8/10	100	0,0019	-	0,0019
9	ÖYB1, ÖG1 (F)	-	2Ø7	Ø8/10	100	0,0038	-	0,0038

Notlar:

- 1) YB<sub>i</sub>; Yüksek Başarılı Betonarme Kiriş,
- 2) G<sub>i</sub>; Geleneksel Betonarme Kiriş,
- 3) KÖYB<sub>ab</sub>; Kısmen Öngerilmeli Yüksek Başarılı Beton Kiriş,
- 4) KÖG<sub>ab</sub>; Kısmen Öngerilmeli Geleneksel Beton Kiriş
- a: Aktif donatı adedi 1Ø7, 2Ø7 , 1 ve 2 şeklinde kodlanmıştır,
- b: Pasif donatı çapı Ø8, Ø10, 8 ve 10 şeklinde kodlanmıştır,
- 5) ÖYB<sub>a</sub>; Öngerilmeli Yüksek Başarılı Beton Kiriş,
- a: Aktif donatı adedi 1Ø7, 2Ø7 , 1 ve 2 şeklinde kodlanmıştır,
- 6) ÖG<sub>a</sub>; Öngerilmeli Geleneksel Beton Kiriş,
- a: Aktif donatı adedi 1Ø7, 2Ø7 , 1 ve 2 şeklinde kodlanmıştır,



## 2.2.2.2. Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Deney Kirişlerin Üretiminde Kullanılan Beton ve Donatı Özellikleri

### 2.2.2.2.1. Beton Özellikleri

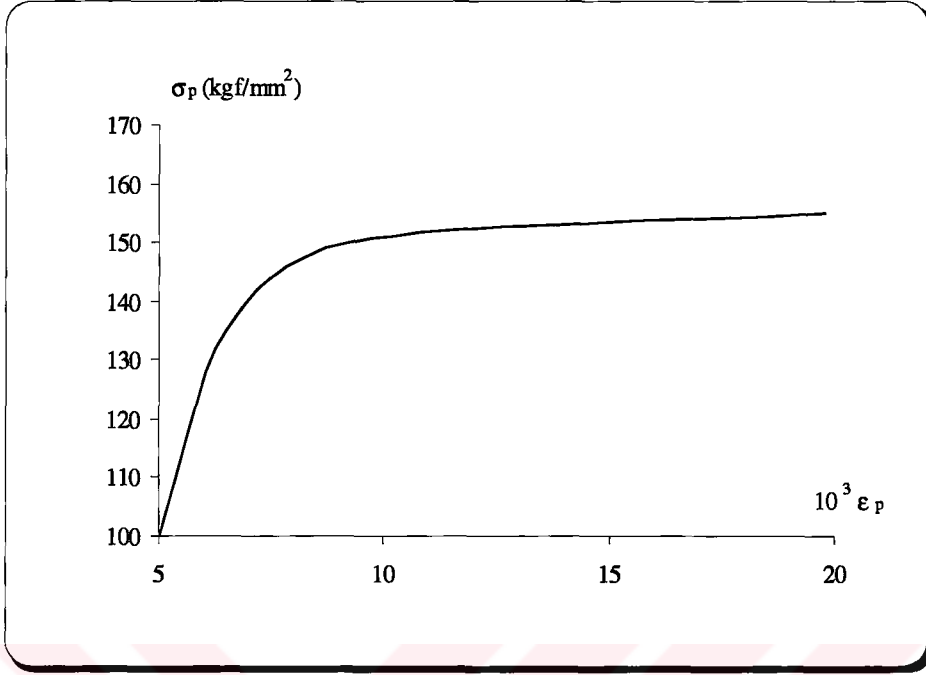
Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerde betonarme kirişlerde kullanılan aynı yüksek başarılı ve geleneksel betonlarla üretilmişlerdir. (bkz. Madde 2.1.1.4, Madde 2.1.1.6 ve Madde 2.1.1.6.2).

### 2.2.2.2.2. Aktif ve Pasif Donatı Özellikleri

Kısmen öngerilmeli beton ve öngerilmeli beton kirişlerde, daha önce bazı özellikleri Çizelge 2.12' de verilen, betonarme kirişlerin üretiminde de kullanılan Ø8 ve Ø10 çaplı pasif donatılar ile bazı özellikleri Çizelge 2.23' de verilen, 7 mm çaplı öngerilme uygulamakta kullanılan, düşük rölaksasyonlu ve nervürlü aktif donatılar kullanılmıştır [118]. Kirişlerin davranışlarının yanıltıcı sonuçlar vermeden incelenebilmesi için, üretimlerinde kullanılan, diğer malzemeler gibi, aktif donatıların da gerilme-şekildeğiştirme ilişkilerinin hassas olarak bilinmesi gerektiği açıktır. Bu nedenle aktif donatıdan rastgele alınan altı adet numune üzerinde deneyler gerçekleştirilmiş, deney bulguları arasındaki standart sapma küçük olduğundan ortalama bir gerilme-şekildeğiştirme diyagramı çizilmiş ve bu diyagramdan elastisite modülü  $E_p = 2,02 \times 10^5$  MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 2.39).

Çizelge 2.23. Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerin üretiminde kullanılan aktif donatının bazı özellikleri

Anma Çapı (mm)	7
Ölçülen Çap (mm)	6,95
Akma Dayanımı (MPa)	1480
Kopma Dayanımı (MPa)	1700
Karakteristik Çekme Dayanımı (MPa)	1620
Kopma Uzaması (%)	4
1000 saatlik Rölaksasyon (%)	3



Şekil 2.39. Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerin üretiminde kullanılan 7 mm çaplı aktif donatının görünen gerilme-şekildeğiştirme diyagramı

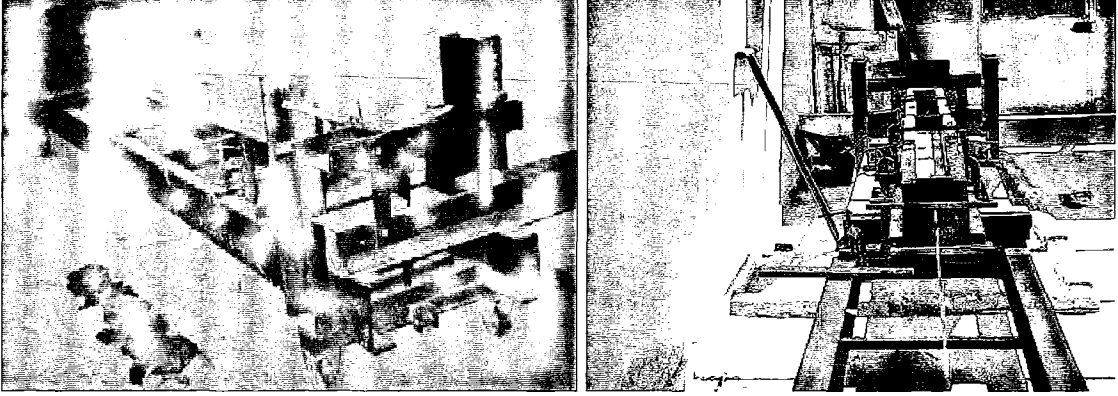
### 2.2.2.3. Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Deney Kirişlerinin Üretimi

Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton deney kirişlerinin üretiminde, daha önce özellikleri Madde 2.2.1.3.1' de verilen, beton ve betonarme deney kirişlerinin üretiminde, kullanılan aynı kalıplar kullanılmıştır (bkz. Şekil 2.12). Kirişlerin üretimine, söz konusu kalıplara aktif ve pasif donatılar Madde 2.2.2.1' de belirtilen şekilde yerleştirildikten ve, aktif donatıların dışmerkezliklerinin değişmemesi için, kalıp öngerilme verme düzeneğine sabitlendikten sonra başlanılmıştır.

#### 2.2.2.3.1. Kiriş Aktif Donatılarına Öngerilme Verilmesi

Çalışmalarımıza konu olan deney kirişlerinin aktif donatılarına öngerilme, KTÜ İnşaat Mühendisliği, Yapı ve Malzeme Laboratuvarında mevcut öngerilme verme düzeneği yardımıyla, ön çekme yöntemiyle verilmiştir. Dr. Selim Pul tarafından geliştirilen [82] bu düzeneğe öngerilmeli kiriş elemanların üretimine imkan tanıyan ve üzerinde çekme düzeneğini taşıyan bir gövdeden meydana gelmektedir (Şekil 2.40). Söz konusu gövde,

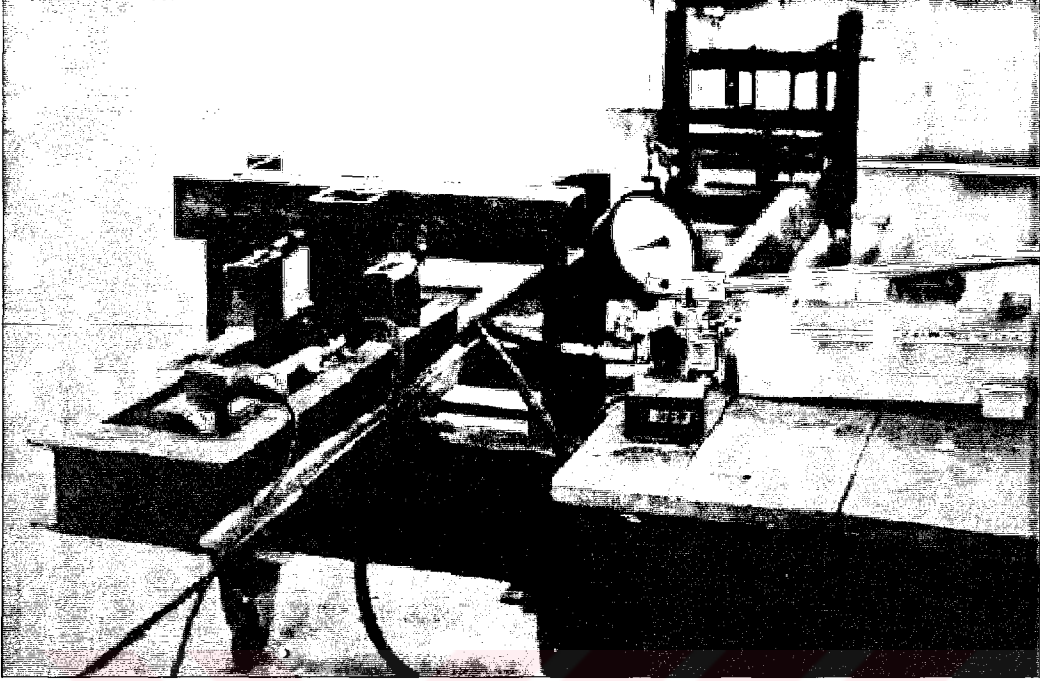
boyu 400cm' ye kadar olan deney elemanlarına öngerilme ya da ardgerilme uygulamaya imkan veren, iki adet U 200 çelik profil kiriş ve bunlara kaynaklanmış aynı boyutta profil dikmelerden meydana gelmektedir. Düzenekteki profil dikmeler hem aktif donatılara hem de çekme düzeneğine mesnet olması amacıyla düzenlenmiştir [82].



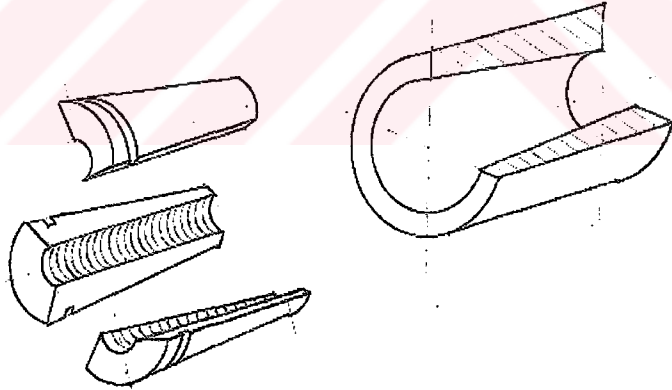
Şekil 2.40. Öngerilme verme düzeneğinin genel görünümüleri

Deney düzeneğinin gövdesi üzerindeki ve öngerilme vermede aktif donatıların gerilmesi amacıyla kullanılan çekme düzeneği, içine hidrolik veren ve yük ölçer monte edilen kapalı bir çerçevenin dikmelerden destek alarak köşebent profil kızaklar üstünde kayması ile çalışmaktadır (Şekil 2.41). Deney düzeneğine yerleştirildikten sonra uçlarına ankrajlar takılan aktif donatılara, çekme düzeneğinin hidrolik pompasıyla çekilmek suretiyle, öngerilme verilmektedir [82].

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen deneylerde 7 mm çapında aktif donatılar kullanıldığından, ankrajlar da bu çaptaki donatıları tutabilecek boyutta üretilmiştir. Konik sıkıştırma ilkesiyle çalışan ankrajlar, konik yuva ve bu yuvaya giren üç parçalı yüksek kalitedeki çelik elemanlardan oluşmaktadır. Bu elemanların üretiminde kullanılan yüksek kaliteli çeliğin Rockwell sertliği 60 RC olup, piyasada Special K, teknik olarak katologlarda Ç-10110 olarak anılmaktadır. Çalışmamızda kullanılan ankrajlara ilişkin bir görünüm Şekil 2.42' de verilmektedir.



Şekil 2.41. Öngerilme verme düzeneğinin gövdesi üzerindeki çekme düzeneği



Şekil 2.42. Bu çalışmada kullanılan konik sıkışan ankrajlardan bir görünüm

Ankrajların aktif donatıları tam kavramalarını sağlamak ve donatıların boşluğunu almak amacıyla ön yükleme yapılmakta ve bu ön yüklemeden sonra sisteme bağlanan elektronik yük ölçerden (load-cell) her 10 kN' da bir okunan çekme kuvvetine karşılık gelen donatı uzamaları ( $\Delta l$ ) kaydedilerek çekme işlemi, sabit yükleme hızıyla, gerçekleştirilmektedir. Beton dökümünden önce öngerilmeli kiriş aktif donatılarına bu

şekilde uygulanan kuvvet ve bu kuvvetlere karşılık gelen donatı uzamaları Çizelge 2.24' de verilmektedir.

İstenilen öngerilme kuvvetine varıldığında, hidrolik verenin geri dönüş vanası kapatılarak verendeki yük kaybı önlenmektedir. Buna ilaveten hidrolik verende oluşabilecek herhangi bir kaçağa önlem olarak da yüksek dayanımlı çelikten (St70) üretilen emniyet tesbit vidaları deney düzeneğinin dikmelerine mesnetlenmektedir.

Çizelge 2.24. Beton dökümünden önce öngerilmeli kiriş aktif donatılarına uygulanan öngerilme kuvvetleri ve birim uzama miktarları

Öngerilme Kuvveti (N)	İlk Boy ( $l_0$ ) (mm)	Son Boy ( $l$ ) (mm)	Boy değişimi ( $\Delta l$ ) (mm)	Birim Uzama (%) ( $\epsilon_p = \frac{\Delta l}{l_0}$ )
10000	4475	4487	12	0,27
20000	4475	4495	20	0,45
30000	4475	4503	28	0,63
40000	4475	4507	32	0,72
50000	4475	4509	34	0,76
55000	4475	4510	35	0,78

#### 2.2.2.3.2. Betonların Karılması, Yerine Konması ve Kirişlerin Saklanması

Deney kirişlerinin, aktif donatılara öngerilme verilmesinden sonra, üretimlerinde kullanılan yüksek başarımlı ve geleneksel betonların karılması ve yerine konması Madde 2.2.1.3.2' de, saklanmaları ise, kirişlerle birlikte dökülen denetim numuneleri ile beraber, Madde 2.2.1.4' de belirtildiği gibidir.

Burada, deneylerde kullanılan betonların kalıba yerleştirildikten hemen sonraki sıcaklıklarının ortalama 20,5 °C ortam sıcaklığının ise yine ortalama 22 °C olduğunu ve aktif donatılar çekilip beton döküldükten sonra, betonun katılaşması için beklenen 14 günlük süre içinde deney düzeneği üzerinde bulunan kirişin dışında kalan aktif donatıda laboratuvar koşulları altında sıcaklık değişimi nedeniyle oluşabilecek bir takım öngerilme kayıplarını önlemek için, aktif donatının açıkta kalan kısımlarında izolasyon malzemesi kullanılarak donatının koruma altına alındığını belirtmek uygun olmaktadır.

### **2.2.2.3.3. Öngerilme Kuvvetinin Kirişe Aktarılması ve Deney Anındaki Yaşları**

Donatılardaki öngerilme kuvveti kirişlere beton dökümünden 14 gün sonra aktarılmaktadır. Bu aktarma işlemi için tesbit vidalarıyla deney düzeneğinin dikmelerine emniyet için mesnetlenen öngerilme kuvveti, tekrar veren üzerine alındıktan ve tesbit vidaları yerlerinden çıkarıldıktan sonra verenin yavaşça boşaltılmasıyla kirişlere aktarılmaktadır. Bu işlemden sonra donatıların kiriş dışında kalan kısımları spiral taşla beton yüzünden kesilmektedir. Böylece üretilmiş olan kirişler, 21 günlük oluncaya kadar, tekrar ıslak çuvallarla örtülmektedir. Bu sürenin sonunda kirişler, birim şekildeğiştirme ölçerlerinin daha iyi yapıştırılabilmesi amacıyla, sıcaklığı  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  ve bağıl nemi  $\%70 \pm \%5$  olan bir ortamda saklandıktan sonra 28 günlük iken deneylere tabi tutulmaktadır.

Burada üretimler boyunca deney kirişleri aktif donatılarındaki öngerilme kuvvetinin pratik olarak sabit ve birbirine eşdeğer kalmasının, sisteme bağlanan elektronik yük ölçer yardımıyla, sağlanmış olduğu da belirtilmelidir.

### **2.2.2.4. Öngerilme Kayıpları ve Kirişlerdeki Başlangıç Gerilmeleri**

Çalışmalarımıza konu olan deney kirişlerinde öngerilme kuvveti alt çekirdek noktasından, diğer bir deyişle alt liften itibaren kesit yüksekliğinin  $1/3$ ' ünden, uygulanmaktadır. Böylece aktif donatılar ağırlık merkezinin altından kiriş yüksekliğinin  $1/6$ ' sından geçirilmiş olmaktadır.

Öngerilme uygulamaları esnasında ve daha sonra ani ve zamana bağlı bir takım kayıpların meydana geldiği bilinmektedir. Oysa E. Freyssinet' in öngerilmeyi “ Bir yapıya öngerilme vermek, dış yüklerden önce ya da onlarla birlikte yapay olarak kalıcı gerilme vermektir. Bu gerilmeler öyle bir değerde olmalıdır ki dış yüklerden meydana gelenlerle birleştirildiklerinde elde edilen toplam gerilme kesitin her noktasında ve dikkate alınan tüm yük ve yükleme durumları için elemanı oluşturan malzemelerin dayanabileceği sınırlar içinde kalsın” şeklinde tanımladığı da bilinmektedir [4]. Bu tanıma göre, tasarımlarda öngerilme kayıplarının belirlenmesi kaçınılmaz olmaktadır. Aşağıda öngerilme kayıpları konusunda bazı hatırlatmalardan sonra deney kirişlerindeki başlangıç gerilmeleri üzerinde durulmaktadır.

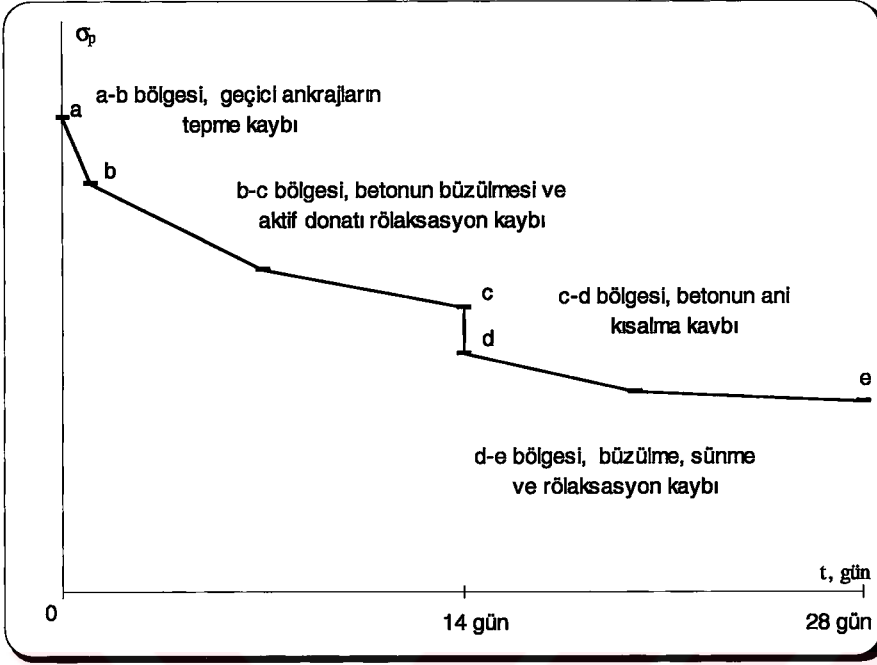
### 2.2.2.4.1. Öngerilme Kayıpları Hakkında Hatırlatmalar ve Bunların Değerlendirilmesi

#### 2.2.2.4.1.1. Hatırlatmalar

Yukarıda da belirtilmeye çalışıldığı gibi, öngerilme kayıpları ani ve zamana bağlı kayıplar olarak iki sınıfta toplanmaktadır. Bunlardan ani kayıplar ankraj tepmesi, betonun ani kısılması ve sürtünmeden, zamana bağlı kayıplar ise aktif donatı rölaksasyonu, betonun sünmesi ve büzülmesinden meydana gelmektedir. Bu çalışmada kullanılan ön çekme yöntemine ilişkin kayıplar, bu kayıpların meydana geliş nedenleri simgeleriyle birlikte Çizelge 2.25’ de, bu kayıplardan dolayı aktif donatıdaki gerilmelerin zamanla değişimini gösteren bir şema ise Şekil 2.43’ de verilmektedir.

Çizelge 2.25. Ön çekme yöntemine ilişkin öngerilme kayıpları ve bu kayıpların meydana geliş nedenleri

Öngerilme kayıpları		Meydana geliş nedenleri
Ani kayıplar	Zamana bağlı kayıplar	
Ankraj tepmesi kaybı ( $\sigma_{pa}$ )	-	Ankrajlama gerçekleştirilip veren gerilmesi boşaltıldıktan sonra
Betonun ani kısılma kaybı ( $\sigma_{pes}$ )	-	Aktarma sırasında
Sürtünme ( $\sigma_{pf}$ )	-	Aktarma sırasında (aktif donatı yörüngesi doğrusal ise ön çekme yönteminde meydana gelmez)
-	Aktif donatının rölaksasyon kaybı ( $\sigma_{pr}$ )	Aktarma öncesi ve sonrası
-	Betonun sünme kaybı ( $\sigma_{pc}$ )	Aktarmadan sonra
-	Betonun büzülme kaybı ( $\sigma_{ps}$ )	Aktarma öncesi ve sonrası



Şekil 2.43. Ön çekme yöntemindeki öngerilme kayıplarından dolayı aktif donatıdaki gerilmelerin zamanla değişimini gösteren şema [116].

#### 2.2.2.4.1.2. Öngerilme Kayıplarının Değerlendirilmesi

Öngerilme kayıplarının aktif donatının randımanlı bir şekilde kullanılmasına imkan tanınamaması yanında, özellikle zamana bağlı kayıpların, betonun zorlanmasını tehlikeye düşürecek sakıncaları da bulunmaktadır. Gerçekten belirli bir etkin öngerilme kuvveti elde etmek için elemana büyük bir başlangıç öngerilme kuvveti uygulamak gerekmektedir. Bu durum oldukça rahatsız edici olduğundan bazen öngerilmeli yapı elemanları başlangıç öngerilme kuvvetine göre tasarlanmaktadır. Oysa yapı emniyeti için böyle bir yaklaşımın doğru olmadığı açıktır.

Bugün yürürlükte bulunan öngerilmeli yapı tekniğine ilişkin yönetmelikte [117] öngerilme kayıplarının, deneysel verilere dayanılarak daha kesin yöntemlerle bulunamaması durumunda, aşağıda belirtilen yollarla yaklaşık olarak hesaplanabileceği öngörülmektedir. Bu öneriye göre, Çizelge 2.26' da ön çekme yönteminde meydana gelen kayıpların değerleri, ilk öngerilme kuvvetinin yüzdesi olarak, verilmekte ve aktif donatının röleksasyonundan meydana gelen kayıpların ise öngerilme donatısının fabrikasınca verilen değerlerle hesaplanabileceği belirtilmektedir.



Çizelge 2.26. Öngerilme kayıplarının, ilk öngerilme kuvvetinin yüzdesi (%) olarak, değerleri

Öngerilme kayıpları	Ön Çekme Yönteminde (%)
Betonun büzülmesi	7
Betonun ani kısılması	3
Betonun sünmesi	6
Aktif donatı rölaksasyonu	Yapımcının önerisi

Burada bu çizelge' deki kayıplar için öngerilme kuvvetinin artmasıyla sünme ve ani kısılma kayıplarının da artacağı, bu gibi durumlarda toplam kayıpların %25' e kadar yükselebileceği belirtilmelidir.

#### a) Betonun Ani Kısılma Kayıpları

Betonun ani kısılmasından doğan kayıplar,  $\sigma_o \rightarrow MPa$  aktif donatı ağırlık merkezi seviyesinde betondaki gerilmeyi,  $E_s/E_c$  donatı, beton modüler oranını göstermek üzere,

$$\sigma_{pes} = \sigma_o \cdot \frac{E_s}{E_c} \quad (2.42)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

#### b) Betonun Sünme Kayıpları

Öngerilmeli beton elemanlarda, aktarma anından itibaren betonda, sabit gerilme altında sünme adıyla bilinen zamana bağlı şekildeğişirmeler meydana gelmektedir. Kaynak [117]' de öngerilmeli betonda birim  $0,1MPa$  ( $1 \text{ kgf/cm}^2$ ) gerilme altında oluşan sünme şekildeğişirmesi için daha kesin bir hesaba gerek görülmediği durumlarda, ön çekmeli elemanlarda bunun birkaç yıllık değerinin  $480 \times 10^{-6}$  mikro şekildeğişirme olarak dikkate alınabileceği ve öngerilme kaybının da buna göre hesaplanabileceği öngörülmekte ve altı aylık sünmenin bu değer  $\frac{3}{4}$ ' ü, bir aylığının ise yarısı olarak hesaba katılabileceği belirtilmektedir. Aynı kaynakta, sünme hesabı için daha kesin bir hesap yapılmak istendiğinde ise,  $t_0$  ve  $t$  sırasıyla betonun yükleneceği andaki ve sünme hesabı yapıldığı

andaki yaşlarını göstermek üzere,  $(t-t_0)$  zaman dilimi için sünme katsayısı:  $\phi_d = 0,4$  olarak alınabilen bir katsayıyı,  $\phi_{f1}$  ortamın nemine bağlı bir katsayıyı (bkz. Çizelge 2.28),  $\phi_{f2}$ ,  $A_c \rightarrow mm^2$  beton kesit alanını,  $\lambda$  ortamın nemine bağlı kalınlık katsayısını ve  $u \rightarrow mm$  kesit çevresini göstermek üzere,

$$h_{th} = 2A_c x \frac{\lambda}{u} \quad (2.43)$$

bağıntısıyla hesaplanan teorik kalınlığa bağlı bir katsayıyı (bkz. Çizelge 2.29),  $\beta_\alpha(t-t_0)$  zamana bağlı bir katsayıyı (bkz. Çizelge 2.30) ve  $\beta_f(t, h_{th}), \beta_f(t_0, h_{th})$  zamana ve teorik kalınlığa bağlı bir katsayıyı (bkz. Çizelge 2.30) göstermek üzere,

$$\phi_c = \phi_d x \beta_\alpha(t-t_0) + \phi_{f1} x \phi_{f2} x (\beta_f(t, h_{th}) - \beta_f(t_0, h_{th})) \quad (2.44)$$

bağıntısından ve buna göre sünme şekildeğiştirmesinin,  $\sigma_{co} \rightarrow MPa$  betona uygulanan sabit gerilmeyi, ve  $E_{c28} \rightarrow MPa$  28 günlük betonun elastisite modülünü göstermek üzere,

$$\epsilon_{cc} = \sigma_{co} x \frac{\phi_c}{E_{c28}} \quad (2.45)$$

bağıntısıyla hesaplanması gerektiği öngörülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi bu çalışmaya konu olan deney kirişlerine öngerilme kuvveti 14 günlük iken aktarılmış ve bu kirişler 28 günlük iken deneye tabi tutulmuşlardır. Buna göre bu çalışmada kullanılan betonlar için sünme katsayısının 14-28 günlük değeri  $\phi_c = 0,678$  olarak elde edilmekte ve sünme şekildeğiştirmesi (2.45) bağıntısından, sünmeden doğan gerilme kaybı ise,  $E_s \rightarrow MPa$  pasif donatı elastisite modülünü göstermek üzere,

$$\sigma_{pc} = E_s \cdot \epsilon_{cc} \quad (2.46)$$

bağıntısından belirlenmektedir [119,120].

### c) Betonun Büzülme Kayıpları

Betonun büzülmesinin yükten bağımsız olarak meydana gelen bir hacim dolayısıyla boy değişimi olduğu bilinmektedir. Kaynak [117]' de birkaç yıllık büzülme şekildeğiştirmesi için, daha kesin bir hesaba gerek görülmediği durumlarda ön çekme yönteminde, Çizelge 2.27' de verilen değerlerin kullanılabilmesi öngörülmekte, altı aylık büzülme hesabı için bu değerlerin  $\frac{3}{4}$ ' ü, bir aylık değerleri için ise yarısı olarak dikkate alınabileceği, daha kesin hesap için ise,

Çizelge 2.27. Büzülme şekildeğiştirmesi

Ortam	Büzülme Şekildeğiştirmesi ( $\epsilon_{cs}$ )		
	Kuru Ortam	Normal Ortam	Nemli Ortam
Ön Çekme Yönteminde	$500 \times 10^{-6}$	$300 \times 10^{-6}$	$100 \times 10^{-6}$

( $t-t_0$ ) zaman dilimi için büzülme şekildeğiştirmesinin:  $\epsilon_{s1}$  ortam nemine bağlı büzülme katsayısını (bkz.. Çizelge 2.28),  $\epsilon_{s2}(h_{th})$  teorik kalınlığa bağlı bir katsayıyı (bkz.. Çizelge 2.29) ve  $\beta_s(t, h_{th}), \beta_s(t_0, h_{th})$  zamana ve teorik kalınlığa bağlı katsayıları (bkz. Çizelge 2.30) göstermek üzere,

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{s1} \times \epsilon_{s2}(h_{th}) \times [\beta_s(t, h_{th}) - \beta_s(t_0, h_{th})] \quad (2.47)$$

bağıntısıyla, büzülmeden doğan gerilme kaybının da;

$$\sigma_{ps} = E_s \cdot \epsilon_{cs} \quad (2.48)$$

bağıntısıyla hesaplanması gerektiği belirtilmektedir.

Çizelge 2.28. Ortam nemine bağlı sünme ve büzülme katsayıları

Ortam	Nem oranı	Ortam nemine bağlı katsayı $\phi_{f1}$	Büzülme katsayısı $\epsilon_{s1}$	Kalınlık katsayısı $\lambda$
Su içinde	-	0,8	0,0001	30
Çok nemli	%90	1,3	-0,0001	5
Normal	%70	2,0	-0,00025	1,5
Kuru	%40	3,0	-0,00040	1,0

Çizelge 2.29. Teorik kalınlığa bağlı sünme ve büzülme katsayıları

Teorik kalınlık ( $h_{th}$ )	5	10	20	40	80	$\geq 150$
$\phi_{f2}$	1,85	1,70	1,55	1,40	1,25	1,12
$\epsilon_{s2}$	1,20	1,05	0,90	0,80	0,70	0,70

Çizelge 2.30. Zamana ve teorik kalınlığa bağlı sünme ve büzülme katsayıları

		t-t <sub>0</sub>							
Sünme ve Büzülme Katsayıları		5 gün	10 gün	1 ay	2 ay	3 ay	1 yıl	2 yıl	3 yıl
$\beta_{\alpha}(t-t_0)$		0,35	0,40	0,50	0,60	0,68	0,90	0,97	0,99
$\beta_f(t, t_0)$	$h_{th}=5$	0,18	0,26	0,44	0,56	0,63	0,82	0,91	0,91
	$=10$	0,18	0,25	0,40	0,53	0,59	0,79	0,88	0,90
	$=20$	0,17	0,24	0,38	0,48	0,53	0,72	0,83	0,85
	$=40$	0,17	0,23	0,34	0,42	0,47	0,65	0,77	0,80
	$=80$	0,16	0,22	0,30	0,37	0,40	0,55	0,68	0,70
	$=150$	0,15	0,20	0,26	0,30	0,32	0,45	0,58	0,63
$\beta_s(t, t_0)$	$h_{th}=5$	0,30	0,36	0,55	0,68	0,75	0,90	0,94	0,97
	$=10$	0,16	0,22	0,40	0,52	0,60	0,84	0,90	0,93
	$=20$	0,07	0,10	0,21	0,32	0,40	0,65	0,80	0,87
	$=40$	0,02	0,04	0,10	0,18	0,22	0,45	0,60	0,70
	$=80$	0	0,01	0,03	0,07	0,10	0,20	0,35	0,45
	$=150$	0	0	0,01	0,02	0,04	0,10	0,18	0,23

#### d) Aktif Donatının Rölaksasyon Kayıpları

Kaynak [117]' de aktif donatının rölaksasyonundan meydana gelen öngerilme kayıplarının bu donatıların fabrikasınca verilen değerlerle hesaplanabileceği ancak bu değerlerin şantiyede doğrulanması gerektiği belirtilmektedir.

Bu çalışmada ise rölaksasyon kaybı için,  $\Delta T(h)$  h saatlik rölaksasyonu,  $\Delta T(\infty)$  sonsuz saatteki rölaksasyonu göstermek üzere, Kaynak [46]' da

$$\Delta T(h) = \Delta T(\infty) \left[ 1 - 10^{-\left(\frac{h}{1000}\right)} \right] \quad (2.49)$$

şeklinde verilen bağıntıyla, aktif donatı için fabrikasınca verilen 1000 saatlik rölaksasyon kaybı %3 kullanılmak suretiyle 14 günlük kayıp  $\Delta T(14gün) = \%2,48$  ve 28 günlük kayıp  $\Delta T(28gün) = \%2,63$  olarak hesaplanmıştır.

### 2.2.2.4.2. Kirişlerdeki Başlangıç Gerilmeleri

Bu çalışmada kullanılan deney kirişlerindeki beton ve donatının başlangıç gerilmelerinin belirlenebilmesi için betonun serbest sünme ve rötresi, donatının salt rölaksasyonu ile aktarma sırasındaki betonun ani kılma gerilmelerinin bilinmesi gerekmektedir. Durum böyle olunca, söz konusu gerilmeler dikkate alınmak suretiyle aktif ve pasif donatı gerilmelerinin hesabı yapılabilmekte, betondakiler ise kesitte meydana gelen etkilerin dengesi yardımıyla belirlenebilmektedir. Bu şekilde teorik olarak hesaplanan gerilmeler ve bunlara bağlı olarak da kirişlerdeki başlangıç gerilmeleri, geleneksel ve yüksek başarımlı betonlarla üretilenler için sırasıyla Çizelge 2.31, Çizelge 2.32' de ve buna göre kiriş kesitlerindeki başlangıç gerilme diyagramları Çizelge 2.33' de verilmektedir.

Çizelge 2.31. Geleneksel beton kullanılarak üretilen kısmen öngerilmeli, öngerilmeli ve betonarme deney kiriş kesitlerindeki başlangıç gerilmeleri (MPa)

Kiriş Tipi	a	b	c	d	e	f	g	h	ı
G2 G3 (A)	$\sigma_{cs}$	-	-	0,14	0,14	-	0,14	0,09	0,23
	$\sigma_{ci}$	-	-	-0,36	-0,36	-	-0,36	-0,20	-0,56
	$\sigma_s$	-	-	8,38	8,38	-	8,38	4,53	12,91
KÖG18 (C)	$\sigma_{cs}$	-	-	0,09	0,09	0,035	0,13	0,15	0,28
	$\sigma_{ci}$	-	-	-0,32	-0,32	2,65	2,33	-0,45	1,88
	$\sigma_s$	-	-	8,77	8,77	7,04	15,81	15,76	31,57
	$\sigma_p$	-1430	50	58,32	-1321,68	10,77	-1310,91	16,82	-1294,1
ÖG2 (F)	$\sigma_{cs}$	-	-	-0,0038	-0,0038	0,0017	-0,0021	0,024	0,022
	$\sigma_{ci}$	-	-	0,24	0,24	5,45	5,69	-0,32	5,37
	$\sigma_p$	-1430	50	59,70	-1320,30	27,80	-1292,5	36,50	-1256,0

Notlar:

- 1) a: Sırasıyla betonun üst ve alt liflerindeki gerilmeler ile pasif ve aktif donatılardaki gerilmeleri
- 2) b: Uygulanan çekme gerilmesini (MPa)
- 3) c: Ankraj tepmesi kaybını (MPa)
- 4) d: Aktarmadan önceki rölaksasyon ve büzülme kayıplarını (0-14 gün) (MPa)
- 5) e: Aktarmadan önceki kiriş kesitlerindeki gerilmeleri (MPa)
- 6) f: Aktarmadan sonra betonun ani kılmasından doğan gerilme kayıplarını (MPa)
- 7) g: Aktarmadan sonraki kiriş kesitlerindeki gerilmeleri (MPa)
- 8) h: Aktarmadan sonraki rölaksasyon, büzülme ve sünmeden doğan gerilme kayıplarını (14-28) (MPa)
- 9) ı: Kiriş kesitlerindeki başlangıç gerilmelerini (MPa) göstermektedir.

Çizelge 2.32. Yüksek başarımli beton kullanılarak üretilen kısmen öngerilmeli, öngerilmeli ve betonarme deney kiriş kesitlerindeki başlangıç gerilmeleri

Kiriş Tipi	a	b	c	d	e	f	g	h	i
YB2,YB3 (A)	$\sigma_{cs}$	-	-	0,18	0,18	-	0,18	0,11	0,29
	$\sigma_{ci}$	-	-	-0,45	-0,45	-	-0,45	-0,24	-0,69
	$\sigma_s$	-	-	10,48	10,48	-	10,48	5,66	16,14
KÖYB110 (B)	$\sigma_{cs}$	-	-	0,12	0,12	0,15	0,27	0,14	0,41
	$\sigma_{ci}$	-	-	-0,42	-0,42	2,92	2,50	-0,41	2,09
	$\sigma_s$	-	-	11,04	11,04	16,14	27,18	12,6	39,78
	$\sigma_p$	-1430	50	72,35	-1307,65	12,18	-1295,47	17,88	-1277,59
KÖYB18 (C)	$\sigma_{cs}$	-	-	0,11	0,11	0,05	0,16	0,18	0,34
	$\sigma_{ci}$	-	-	-0,40	-0,40	3,78	3,38	-0,54	2,84
	$\sigma_s$	-	-	10,96	10,96	19,05	30,01	19,70	49,71
	$\sigma_p$	-1430	50	72,90	-1307,10	15,38	-1291,72	21,02	-1270,7
KÖYB210 (D)	$\sigma_{cs}$	-	-	0,09	0,09	-0,05	0,04	0,22	0,26
	$\sigma_{ci}$	-	-	-0,38	-0,38	4,64	4,26	-0,67	3,59
	$\sigma_s$	-	-	10,88	10,88	25,92	36,8	26,8	63,6
	$\sigma_p$	-1430	50	73,43	-1306,57	18,57	-1288,00	24,16	-1263,84
KÖYB28 (E)	$\sigma_{cs}$	-	-	0,04	0,04	0,12	0,16	0,15	0,31
	$\sigma_{ci}$	-	-	-0,33	-0,33	6,10	5,77	-0,60	5,17
	$\sigma_s$	-	-	11,36	11,36	34,8	46,16	36,64	82,8
	$\sigma_p$	-1430	50	73,50	-1306,50	25,47	-1281,03	31,80	-1249,23
ÖYB2 (F)	$\sigma_{cs}$	-	-	-0,0048	-0,0048	0,002	-0,0024	0,0296	0,0272
	$\sigma_{ci}$	-	-	-0,30	-0,30	7,76	7,46	-0,4	7,06
	$\sigma_p$	-1430	50	74,60	-1305,40	39,72	-1265,68	45,64	-1220,04

Notlar:

- 1) a: Sırasıyla betonun üst ve alt liflerindeki gerilmeler ile pasif ve aktif donatılardaki gerilmeleri
- 2) b: Uygulanan çekme gerilmesini (MPa)
- 3) c: Ankraj tepmesi kaybını (MPa)
- 4) d: Aktarmadan önceki rölaksasyon ve büzülme kayıplarını (0-14 gün) (MPa)
- 5) e: Aktarmadan önceki kiriş kesitlerindeki gerilmeleri (MPa)
- 6) f: Aktarmadan sonra betonun ani kılalmasından doğan gerilme kayıplarını (MPa)
- 7) g: Aktarmadan sonraki kiriş kesitlerindeki gerilmeleri (MPa)
- 8) h: Aktarmadan sonraki rölaksasyon, büzülme ve sünmeden doğan gerilme kayıplarını (14-28) (MPa)
- 9) i: Kiriş kesitlerindeki başlangıç gerilmelerini (MPa) göstermektedir.

Çizelge 2.33. Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarımlı ve geleneksel beton deney kiriş kesitlerindeki başlangıç gerilme diyagramları

Kiriş Tipi	Yüksek başarımlı beton kullanılanlar	Geleneksel beton kullanılanlar
YB2, YB3 G2, G3 (A)		
KÖYB110 (B)		-
KÖYB18 KÖG18 (C)		
KÖYB210 (D)		-
KÖYB28 (E)		-
ÖYB2 ÖG2 (F)		

### 2.2.2.5. Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Eğilme Deney Düzenegi ve Dış Yükleme

Bu kirişlerin yüklenmesinde de, daha önce Madde 2.2.1.5' de verilen, betonarme kirişlerin yüklenmesinde kullanılan eğilme deney düzenegi kullanılmış, kirişlerin yüklenmesi ve alınan ölçümler de Madde 2.2.1.6' da açıklanan betonarme kirişlerdekine benzer şekilde gerçekleştirilmiştir.

### 2.2.2.6. Öngerilme Kuvveti Aktarılan ve Eğilme Momenti Uygulanan Kirişlerin Davranışları

Bu bölümdeki deneylerin ilkesi dikdörtgen kesitli, eylemsizlik momenti sabit, prizmatik deney kirişlerinin alt çekirdek noktasına ön çekme yöntemiyle uygulanan boyuna öngerilme kuvveti (P) ve klasik şekildeğiştirme hesaplarının varsayımlarına uygun bir şemaya göre eğilme momentinden oluşan bir etki altında bırakmak olduğundan deney kirişlerinin şekildeğiştirmeden önceki durumları, öngerilme kuvveti (P) ve eğilme momentinin ayrı ayrı uygulanması halinde meydana gelen şekildeğiştirmelerinin şemaları Şekil 2.44' de verilmektedir. [121,122].

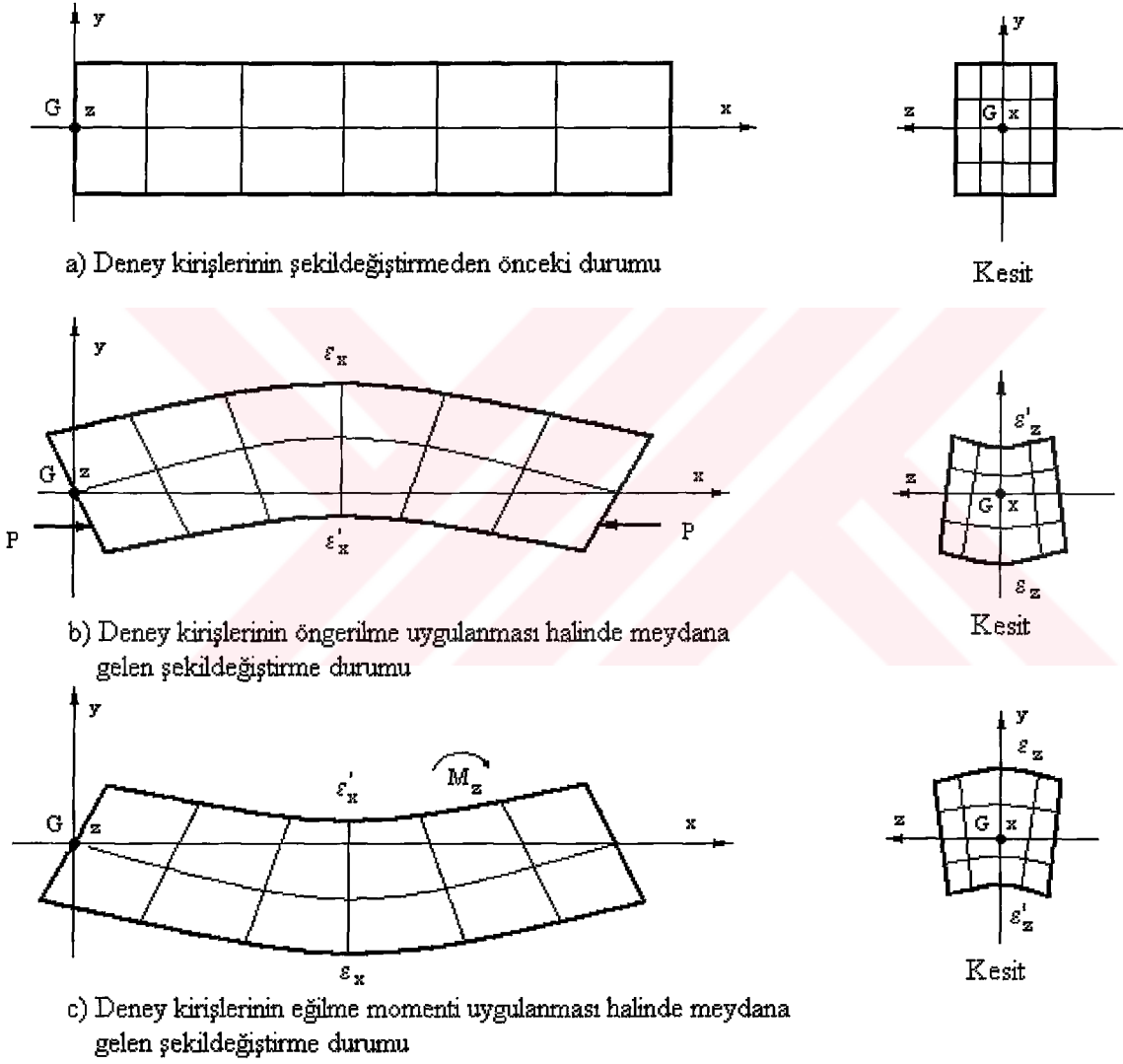
Bu şekilden de görüldüğü gibi, eğilme momentinin etkisiyle kiriş orta lifi daire yayına benzetilecek parabol şeklini alır. y ve z eksenlerine paralel liflerse sırasıyla eğik doğrular ve daire yayları olarak dikkate alınabilecek bir birine dik iki parabol ailesine dönüşür (Şekil 2.44c). Şekilden esas itibariyle kirişin üst liflerinde  $\varepsilon'_x$  kısaltmalar, alt liflerde  $\varepsilon_x$  uzamalar meydana gelmekte buna karşılık, enkesitte üst liflerde  $\varepsilon_z$  uzama ve alt liflerde ise  $\varepsilon'_z$  kısaltmalarının oluştuğu görülmektedir. Bunun aksine yalnızca P öngerilme kuvvetinin uygulanmasında ise, bu şekildeğiştirmelerin ters işaretlileri oluşmaktadır (Şekil 2.44b) [123,124].

### 2.2.2.7. Öngerilme Kuvveti, Özağırlık ve Materyal Ağırlığı Altında Kirişlerin Orta Kesitlerindeki Gerilme Dağılımları

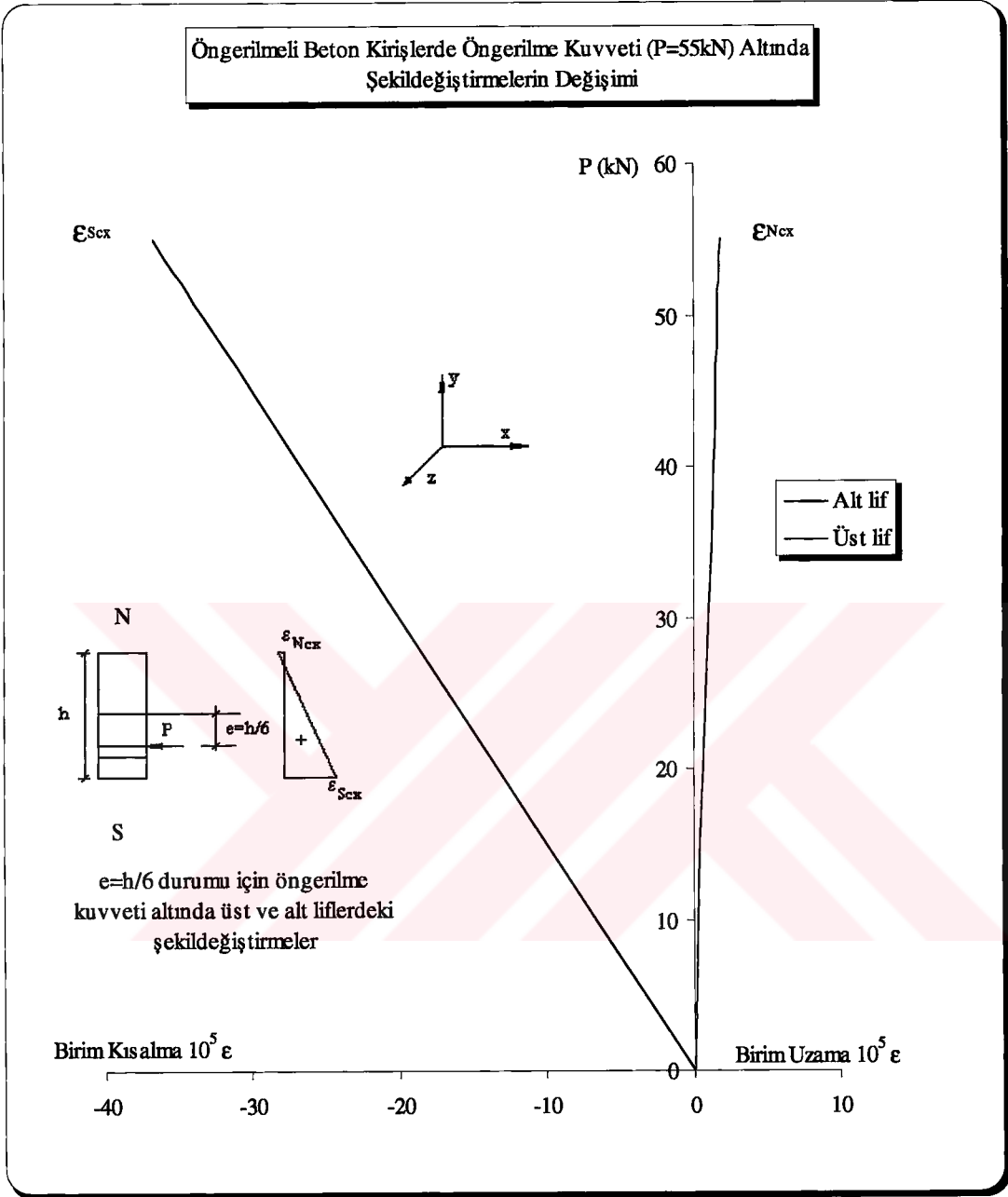
Daha önce de belirtilmeye çalışıldığı gibi deney kirişlerine öngerilme kuvveti (P) ön çekme yöntemiyle uygulanmıştır. Her 10 kN' da bir ölçü alınmak üzere kirişlere ardışık olarak verilen bu öngerilme kuvveti altında öngerilmeli beton kirişlerin tipik davranışından, bu öngerilmenin gerçekten alt çekirdek noktasına çok yakın bir noktadan



uygulandığı anlaşılmaktadır (Şekil 2.45). Gerçekten  $\varepsilon_{Ncx}$ 'in sıfır olmaması öngerilme kuvvetinin tam alt çekirdek noktasına uygulanmadığını, ancak kiriş üst liflerindeki boyuna doğrultudaki boy değişimlerinin sıfıra çok yakın oluşu da anılan noktadan çok uzakta olunmadığını göstermektedir. Bu durum betonun heterojenliğine ve şekildeğiştirme ölçerlerin hassasiyetine atfedilebilecek mertebededir (bkz. Madde 2.2.1.5.1.2).



Şekil 2.44. Deney kirişlerinin şekildeğiştirmeden önceki, öngerilme kuvveti ve eğilme momentinin ayrı ayrı uygulanması halinde meydana gelen şematik şekildeğiştirme durumları [46].

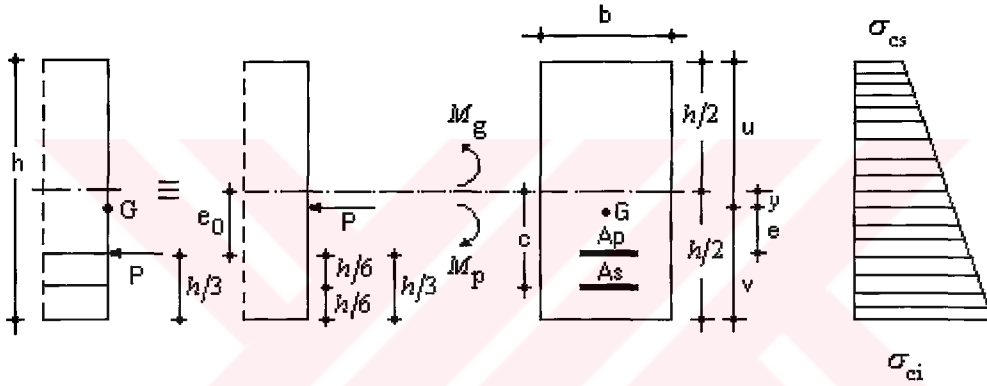


Şekil 2.45. Öngerilme oranı %100 olan F tipi öngerilmeli beton kirişlerin öngerilme kuvveti altındaki tipik davranışları

Diğer taraftan kirişlerin üst (N) ve alt (S) yüzlerinde boyuna doğrultuda oluşan şekildeğiştirmelerin de uygulanan öngerilme kuvveti ile doğrusal olarak değiştiği görülmektedir. Bu durum ise, kirişlerin  $P=55\text{kN}$ 'luk öngerilme kuvveti altında elastik bölgede çalışıklarına işaret etmektedir. Diğer tüm deney kirişleri de önemsiz farklarla buna benzer davranış göstermiştir. Önemli farklar ise pasif donatı oranına bağlı olarak kiriş alt yüzünde boyuna doğrultudaki ( $\epsilon_{scx}$ ) şekildeğiştirmelerde gözlenen değişim olmuştur.

Bu değişimin  $P$  öngerilme kuvveti+kiriş kendi özağırlığı+materyal ağırlığının ( $M_g$ ) ortak etkisiyle kiriş orta kesitlerinde oluşan teorik gerilme değerleriyle orantılı olması gerektiği düşünölmektedir. Bunun için kiriş orta kesitlerinde  $P+M_g$  etkisiyle oluşan normal gerilme değerleri hesaplanmış ve ölçölen  $\epsilon_{sxx}$  değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Beton ya da betonarme bir kesit için aktif donatının etkisi, donatının ağırlık merkezinden etkiyen ve şiddeti bu donatıdaki gerilmelerin şiddetine eşit olan bir basınç kuvvetine eşdeğerdir. Bu durumda çalışmamıza konu olan deney kirişlerinin,  $P+M_g$ ' den dolayı, orta kesitlerinde oluşan normal gerilme değerleri, Şekil 2.46 yardımıyla elde edilen, aşığıdaki bağıntılarla hesaplanmaktadır.



Şekil 2.46. Öngerilme kuvveti, kiriş özağırlığı ve materyal ağırlığı ( $P+M_g$ ) etkisiyle kiriş orta kesitlerinde oluşan normal gerilmelerin hesap ilkesi

Bu şekilden de göröldüğü gibi,  $e$  dışmerkezliği göstermek üzere, öngerilme kuvvetinden meydana gelen moment

$$M_p = e.P \quad (2.50)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Bu bağıntıdaki dışmerkezlik ( $e$ ):  $e_o$  kesitin simetri eksenine öngerilme kuvveti uygulama noktası arasındaki mesafeyi,  $y$  ise kesitin ağırlık merkezinden geçen eksene göre

$$b.h.y + n.A_s (c-y) = 0 \quad (2.51)$$

şeklindeki statik moment ifadesinden

$$y = n.c.A_s/A_i \quad (2.52)$$

olarak elde edilen değeri göstermek üzere,

$$e = e_o - y \quad (2.53)$$

şeklinde belirlenmektedir. (2.51) ve (2.52) bağıntılarındaki  $b$  kesit enini,  $h$  kesit yüksekliğini,  $n = E_s/E_c$  donatı - beton modüler oranını,  $A_s$  pasif donatı alanını,  $c$  kesitin simetri eksenine pasif donatı ağırlık merkezi arasındaki mesafeyi göstermek üzere, itibari kesit alanı

$$A_i = b.h + n.A_s \quad (2.54)$$

ifadesiyle belirlenmektedir.

Diğer taraftan Şekil 2.46' daki,  $u$  ve  $v$  sırasıyla kesit ağırlık merkezinin üst ve alt liflere olan uzaklıklarını göstermek üzere,

$$u = \frac{h}{2} + y \quad \text{ve} \quad v = \frac{h}{2} - y \quad (2.55)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Buna göre,  $\sigma_{ci}, \sigma_{cs}$  sırasıyla kiriş alt ve üst liflerdeki beton basınç gerilmeleri:

$$I_i = b.h^3/12 + b.h.y^2 + n.A_s.(c-y)^2 \quad (2.56)$$

itibari kesitin ağırlık merkezinden geçen eksene göre eylemsizlik momentini,

$$i = \sqrt{\frac{I_i}{A_i}} \quad (2.57)$$

itibari kesitin eylemsizlik yarıçapını,  $M_g$  kiriş özağırlığı + materyal ağırlığının oluşturduğu eğilme momentini göstermek üzere,

$$\sigma_{ci} = \frac{P}{A_i} \left(1 + \frac{ev}{i^2}\right) - \frac{M_g}{I_i} v \quad (2.58)$$

$$\sigma_{cs} = \frac{P}{A_i} \left(1 - \frac{eu}{i^2}\right) + \frac{M_g}{I_i} u \quad (2.59)$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır.

Bu bağıntılar yardımıyla deney kirişleri için hesaplanan söz konusu gerilmeler Çizelge 2.34a' da, diyagramları ise Çizelge 2.34b' de verilmektedir.

Deney kirişlerinden alınan ölçümler (bkz. Şekil 2.15) sabit bir öngerilme kuvveti için, pasif donatı miktarı arttıkça  $\epsilon_{scx}$  değerinin azaldığını ve bu değişimin  $\sigma_{ci}$  ile ilişkisinin ise doğrusal olduğunu gösterdiği gibi, pasif donatı oranları eşit ve kısmen öngerilme oranları %50-%100 olan C ve F tipi yüksek başarımlı betonla üretilen kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton deney kirişlerinin  $\epsilon_{scx}$  şekildeğişikliklerinin geleneksel betonla üretilenlerinkinden daha az olduğunu da göstermektedir (Çizelge 2.35). Bu durum, heterojen bir yapıya sahip, deney kirişlerinin yeniden yapımında başarılı olunduğuna, pasif donatı-beton aderansının yeterliliğine, geleneksel betonların yüksek başarımlı betonlara göre adaptasyon yapma kapasitelerinin daha büyük olduğuna ve deney düzeneğinin işlevini iyi bir hassasiyetle yaptığının işaret etmektedir.

Çizelge 2.34a. Deney kirişlerinin orta kesitlerinde P+M<sub>g</sub> etkisiyle oluşan teorik normal gerilmeler

Kiriş Kod ve Tipleri	A <sub>s</sub> (cm <sup>2</sup> )	A <sub>p</sub> (cm <sup>2</sup> )	Pasif Donatı Oranı (ρ <sub>s</sub> )	Aktif Donatı Oranı (ρ <sub>p</sub> )	Gerilmeler(MPa)	
					σ <sub>cs</sub>	σ <sub>ci</sub>
KOYB110 (B)	1,5708	0,3848	0,0079	0,0019	2,144	3,055
KOYB18 (C)	1,005	0,3848	0,0050	0,0019	2,096	3,209
KOG18 (C)	1,005	0,3848	0,0050	0,0019	2,093	3,180
KOYB210 (D)	1,5708	0,7696	0,0079	0,0038	2,052	3,363
KOYB28 (E)	1,005	0,7696	0,0050	0,0038	2,008	3,517
ÖYB1 (F)	-	0,3848	-	0,0019	1,994	3,506
ÖG1 (F)	-	0,3848	-	0,0019	1,979	3,521

Çizelge 2.34b Deney kirişlerinin orta kesitlerinde P+M<sub>g</sub> etkisiyle oluşan teorik normal gerilme diyagramları

Kiriş Tipleri	A <sub>s</sub> (cm <sup>2</sup> )	A <sub>p</sub> (cm <sup>2</sup> )	ρ <sub>s</sub>	ρ <sub>p</sub>	Diyagramlar(MPa)
KOYB110(B)	1,5708	0,3848	0,0079	0,0019	<p>2,144 MPa 3,055 MPa</p>
KOYB18 (C)	1,005	0,3848	0,0050	0,0019	<p>2,096 MPa 3,209 MPa</p>
KÖG18 (C)	1,005	0,3848	0,0050	0,0019	<p>2,093 MPa 3,180 MPa</p>
KOYB210(D)	1,5708	0,7696	0,0079	0,0038	<p>2,052 MPa 3,363 MPa</p>
KOYB28 (E)	1,005	0,7696	0,0050	0,0038	<p>2,008 MPa 3,517 MPa</p>
ÖYB1 (F) ÖG1 (F)	-	0,3848	-	0,0019	<p>1,994 MPa    1,979 MPa 3,506 MPa    3,521 MPa</p>

Çizelge 2.35. Deney kirişlerinin orta kesitlerinde P+M<sub>g</sub> etkisiyle oluşan  $\sigma_{ci}$  normal gerilmeler ve ölçülen  $\varepsilon_{scx}$  ortalama şekildeğişirmeler

Kiriş Kod ve Tipleri	A <sub>s</sub> (cm <sup>2</sup> )	Pasif Donatı Oranı ( $\rho_s$ )	( $\sigma_{ci}$ ), (MPa)	(10 <sup>6</sup> $\varepsilon_{scx}$ )
KÖYB110 (B)	1,5708	0,0079	3,055	240
KÖYB18 (C)	1,005	0,0050	3,209	250
KÖG18 (C)	1,005	0,0050	3,180	370
KÖYB210 (D)	1,5708	0,0079	3,363	262
KÖYB28 (E)	1,005	0,0050	3,517	270
ÖYB1 (F)	-	-	3,506	150
ÖG1 (F)	-	-	3,521	178

#### 2.2.2.8. Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Dengeli Donatı Oranları

Bilindiği gibi eğilme etkisindeki kirişlerde basınç bölgesindeki betonun ezilmesiyle donatının akma sınırına aynı anda ulaşmalarını sağlayan donatı oranı dengeli donatı oranı, bu donatı oranına sahip kirişlerin kırılma şekli de dengeli kırılma adıyla anılmaktadır.

Bu başlık altında, eğilmedeki davranışlarının değerlendirilmesinde kullanılmak amacıyla, çalışmamıza konu olan deney kirişlerinin dengeli donatı oranları aşağıdaki Çizelge 2.36' da verilmektedir.

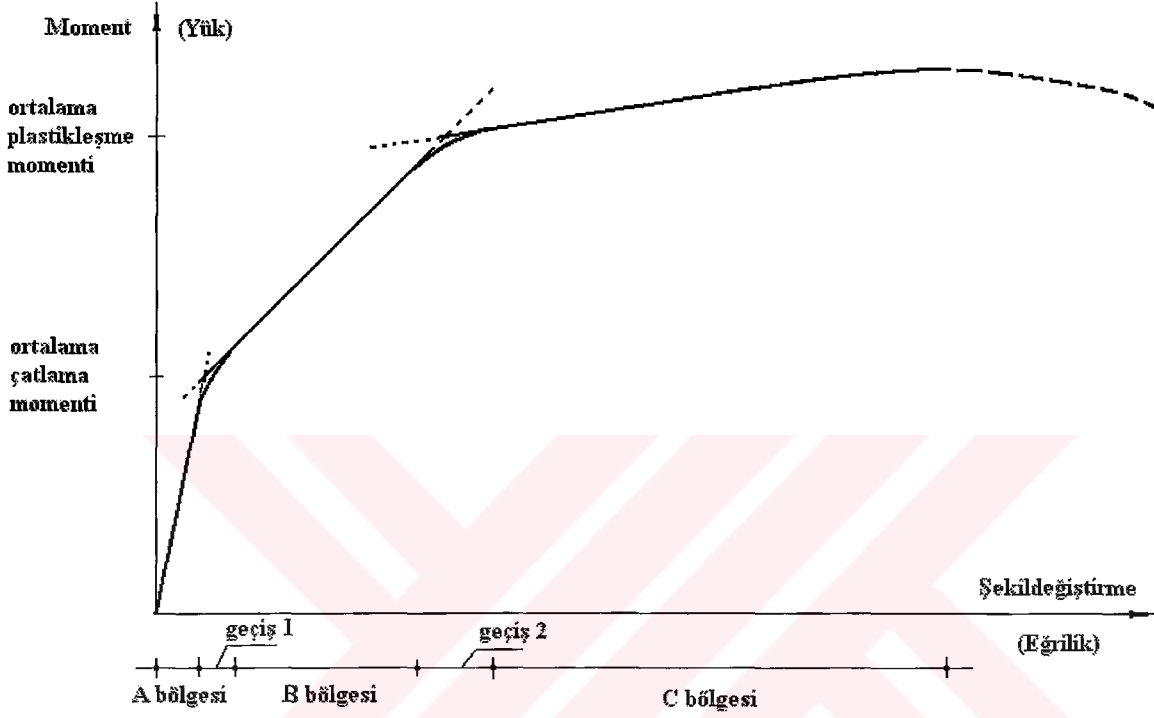
Çizelge 2.36. Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarımlı ve geleneksel beton kirişlerin dengeli donatı oranları

Kiriş kod ve tipleri	A <sub>s</sub> (cm <sup>2</sup> )	10 <sup>3</sup> $\rho_s$	A <sub>p</sub> (cm <sup>2</sup> )	10 <sup>3</sup> $\rho_p$	10 <sup>3</sup> $\rho_b$
KÖYB110 (B)	1,5708	7,9	0,3848	1,9	11
KÖYB18 (C)	1,0053	5	0,3848	1,9	11
KÖG18 (C)	1,0053	5	0,3848	1,9	10
KÖYB210 (D)	1,5708	7,9	0,7696	3,8	13
KÖYB28 (E)	1,0053	5	0,7696	3,8	13
ÖYB2 (F)	-	-	0,7696	3,8	8
ÖG2 (F)	-	-	0,7696	3,8	7

Notlar:

- 1) A<sub>s</sub> ve A<sub>p</sub> sırasıyla pasif ve aktif donatı alanlarını,
- 2)  $\rho_s$ ,  $\rho_p$  ve  $\rho_b$  sırasıyla pasif, aktif ve dengeli donatı oranlarını göstermektedir.

Bu çizelgeden de görüldüğü gibi çalışmalarımıza konu olan deney kirişleri denge altı donatıya sahip olmaktadır. Buna göre bu donatıya sahip kirişlerin yük altındaki şematik davranışları Şekil 2.47' de verilmektedir.

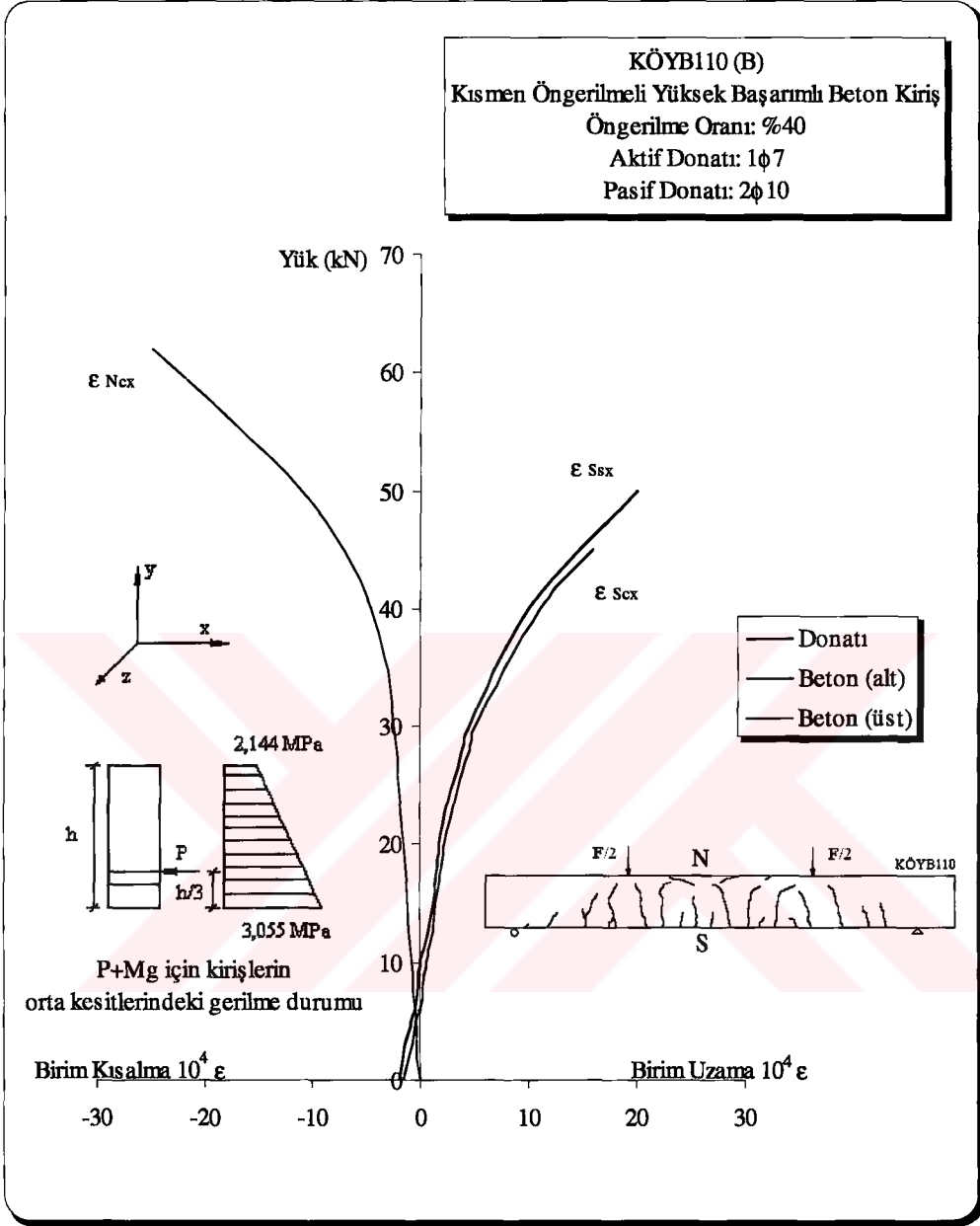


Şekil 2.47. Denge altı donatılı kirişlerin şekil değiştirme ya da eğriliklerinin momentle ya da yüküyle şematik değişim diyagramı

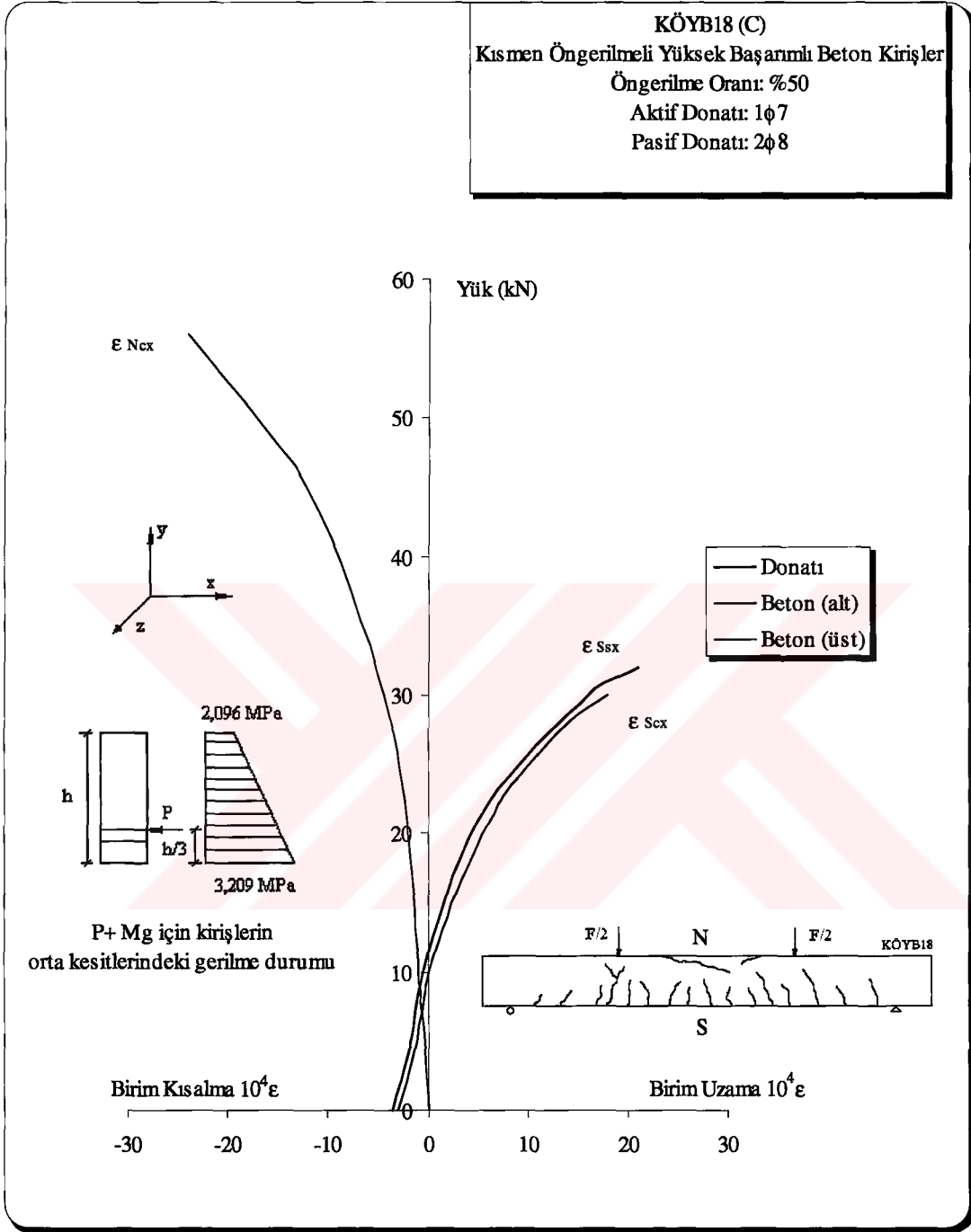
### 2.2.2.9. Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Yük-Şekil değiştirme ve Yük-Sehim Diyagramları

Çalışmamıza konu olan kirişlerin eğilme deneyinden elde edilen yük-şekil değiştirme diyagramları Şekil 2.48 - Şekil 2.53' de, yük-sehim diyagramının genel durumu Şekil 2.54' de, yük-sehim diyagramları ise Şekil 2.55 - Şekil 2.59' da verilmektedir.

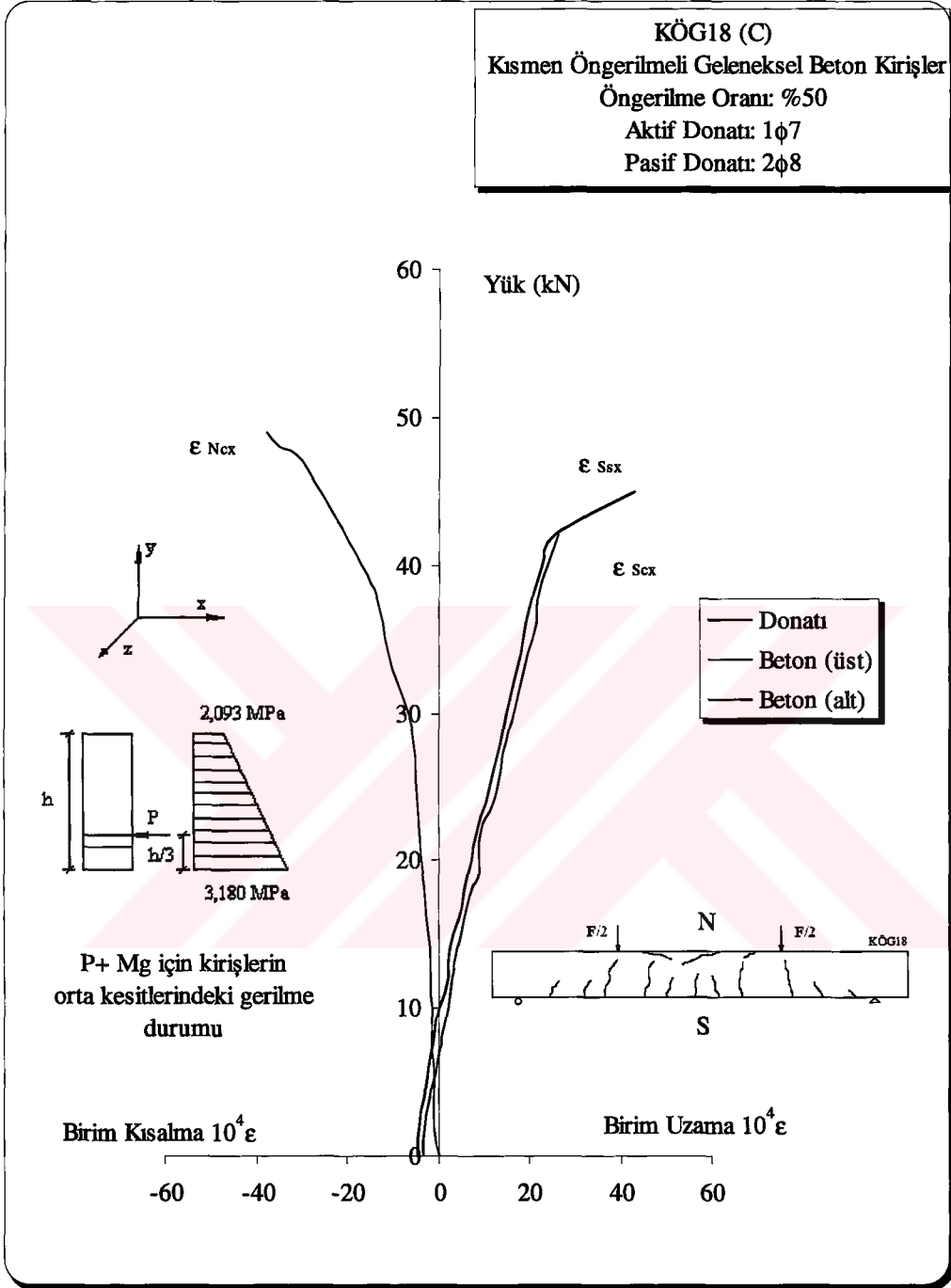




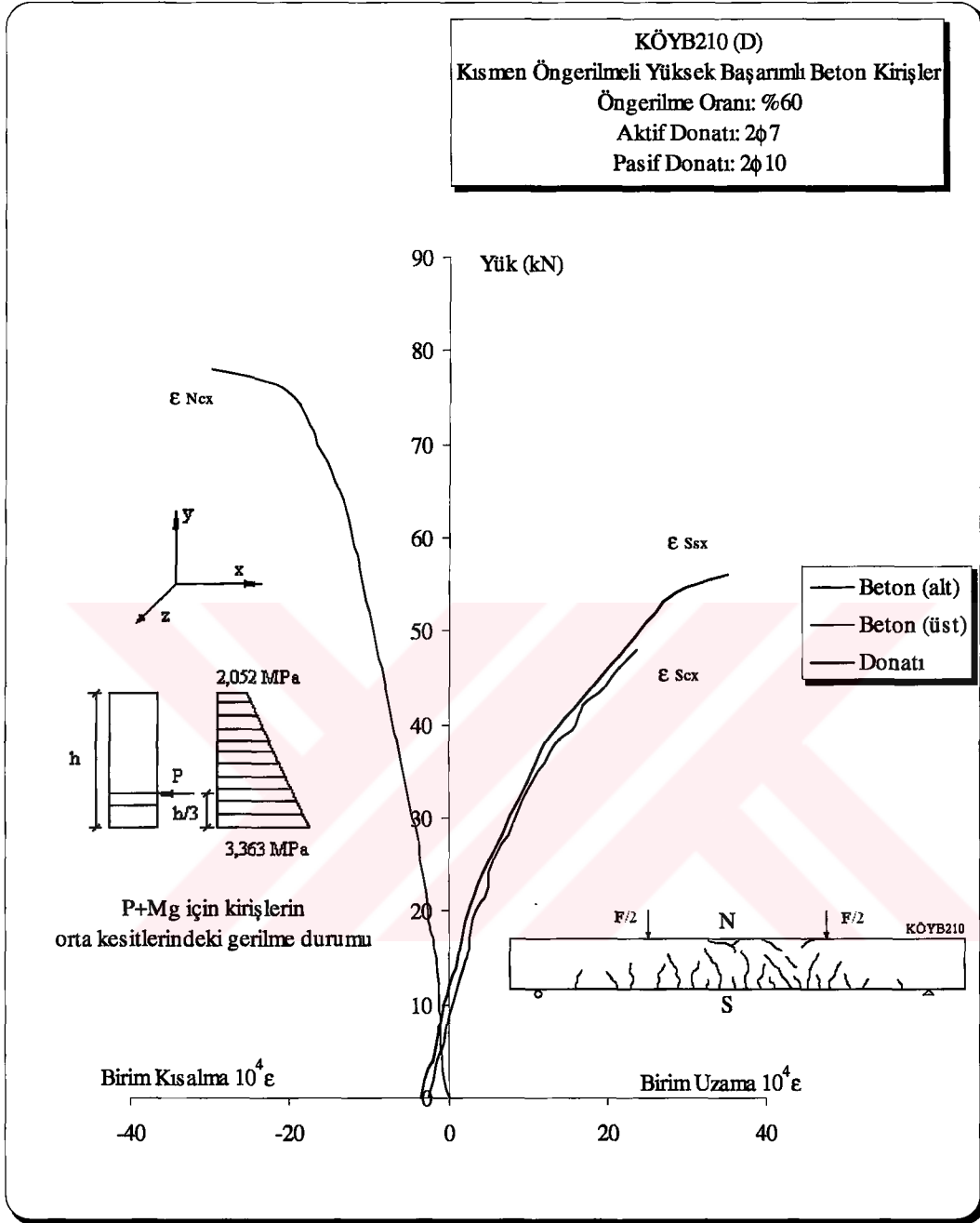
Şekil 2.48. Öngerilme oranı %40 olan B tipi kısmen öngerilmeli, 1 $\phi$ 7 aktif ve 2 $\phi$ 10 pasif donatıya sahip, yüksek başarımli beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB110 (B)]



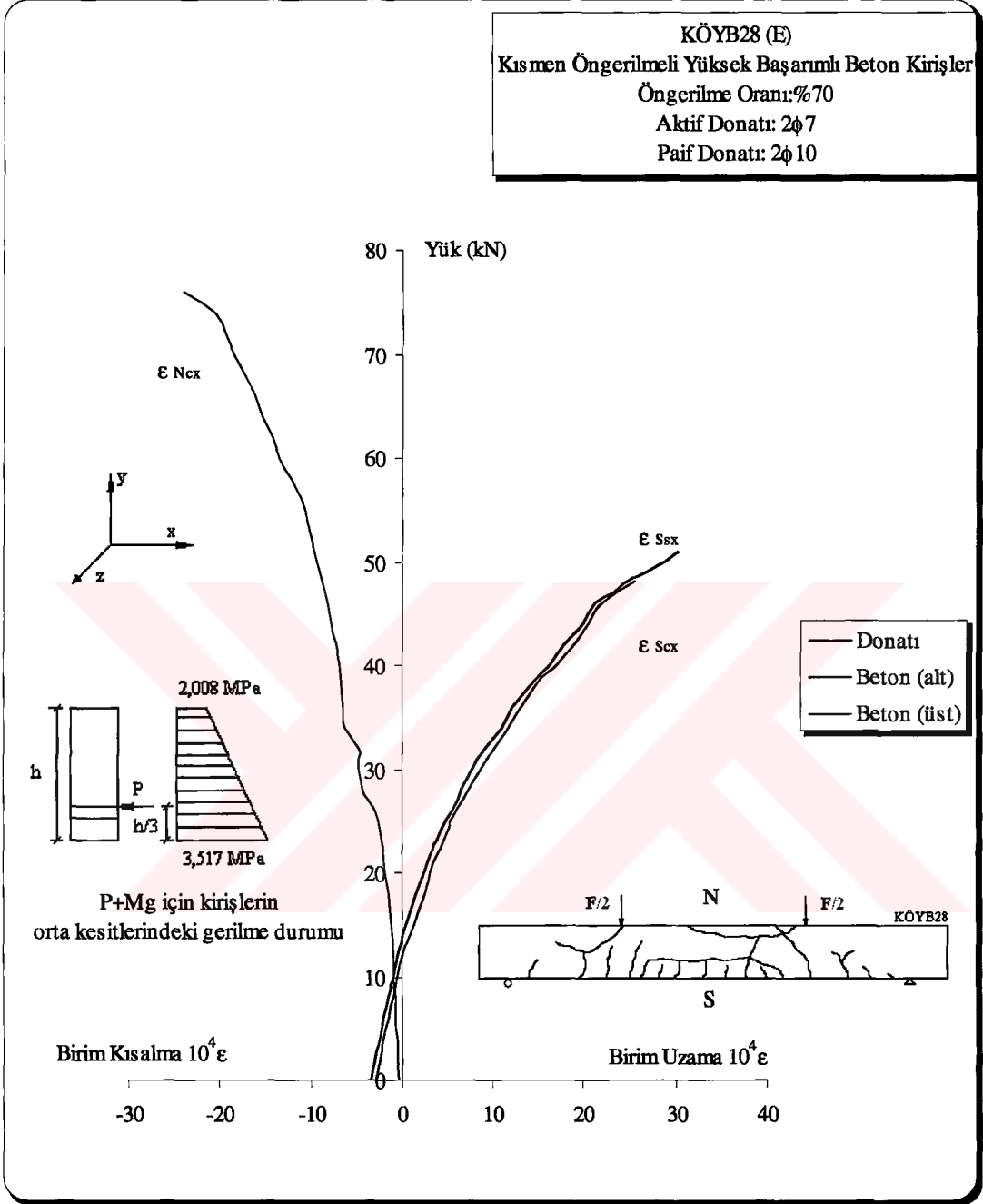
Şekil 2.49. Öngerilme oranı %50 olan C tipi kısmen öngerilmeli, 1 $\phi$ 7 aktif ve 2 $\phi$ 8 pasif donatıya sahip, yüksek başarımlı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB18 (C)]



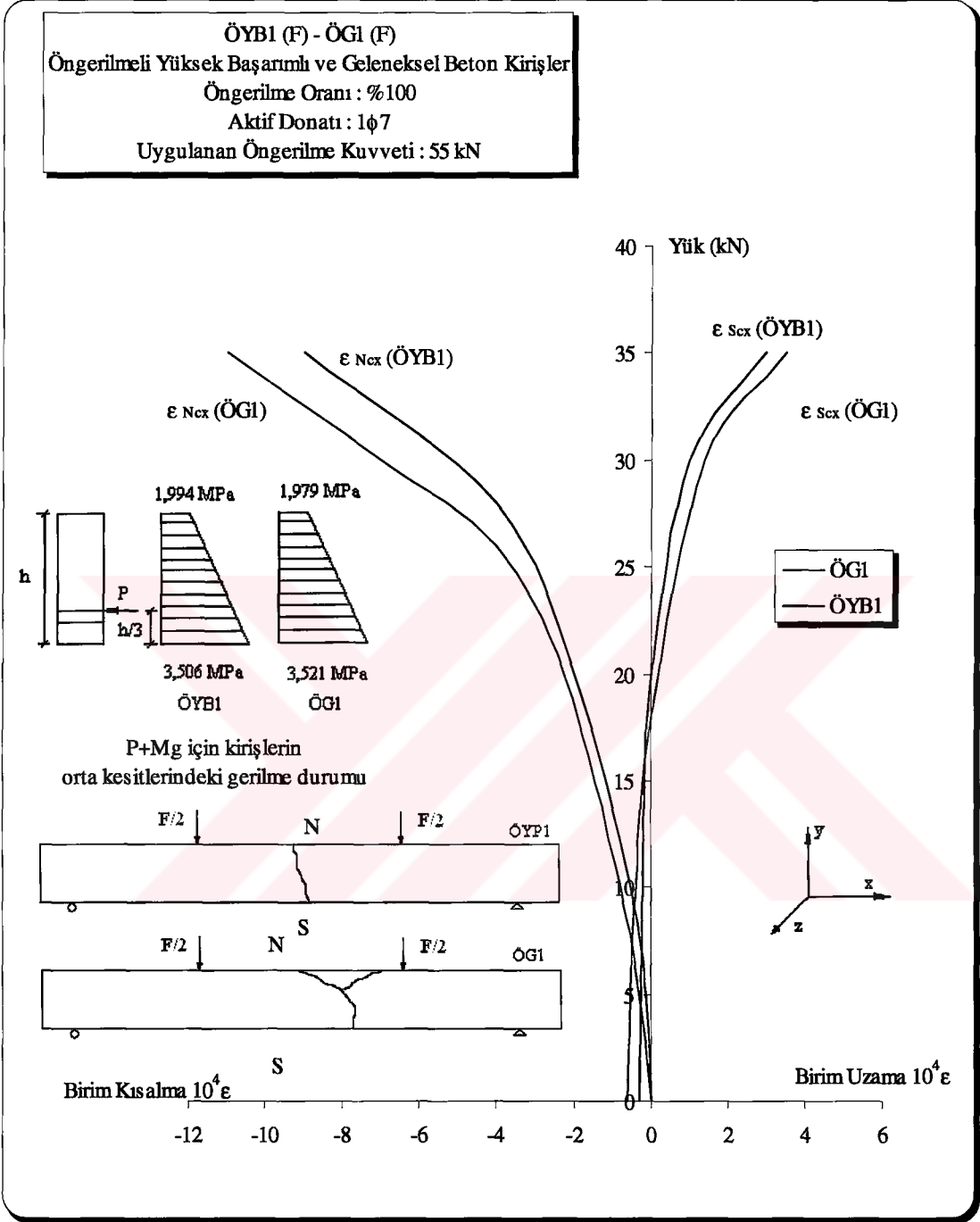
Şekil 2.50. Öngerilme oranı %50 olan C tipi kısmen öngerilmeli, 1 $\phi$ 7 aktif ve 2 $\phi$ 8 pasif donatıya sahip, geleneksel beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖG18 (C)]



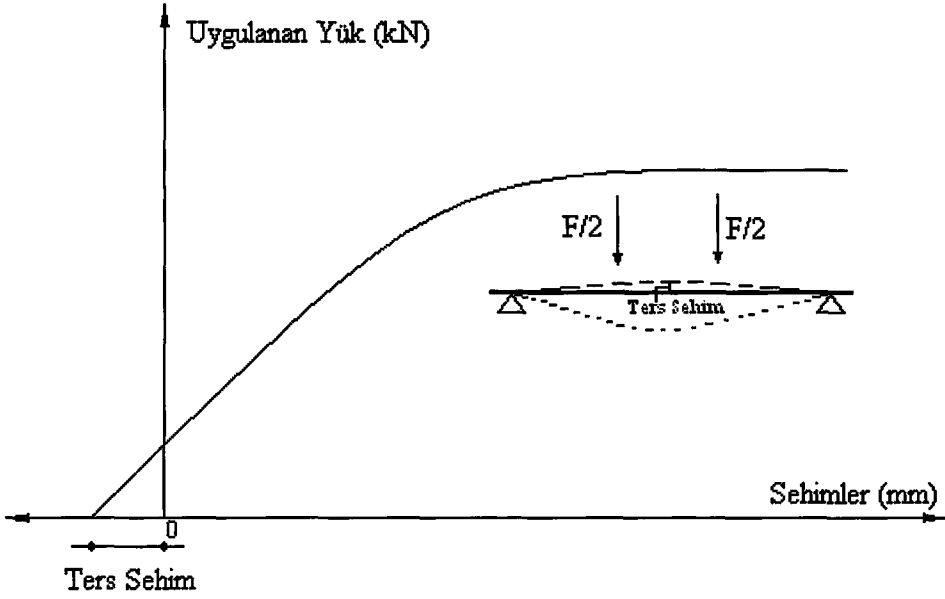
Şekil 2.51. Öngerilme oranı %60 olan D tipi kısmen öngerilmeli, 2 $\phi$ 7 aktif ve 2 $\phi$ 10 pasif donatıya sahip, yüksek başarımlı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB210 (D)]



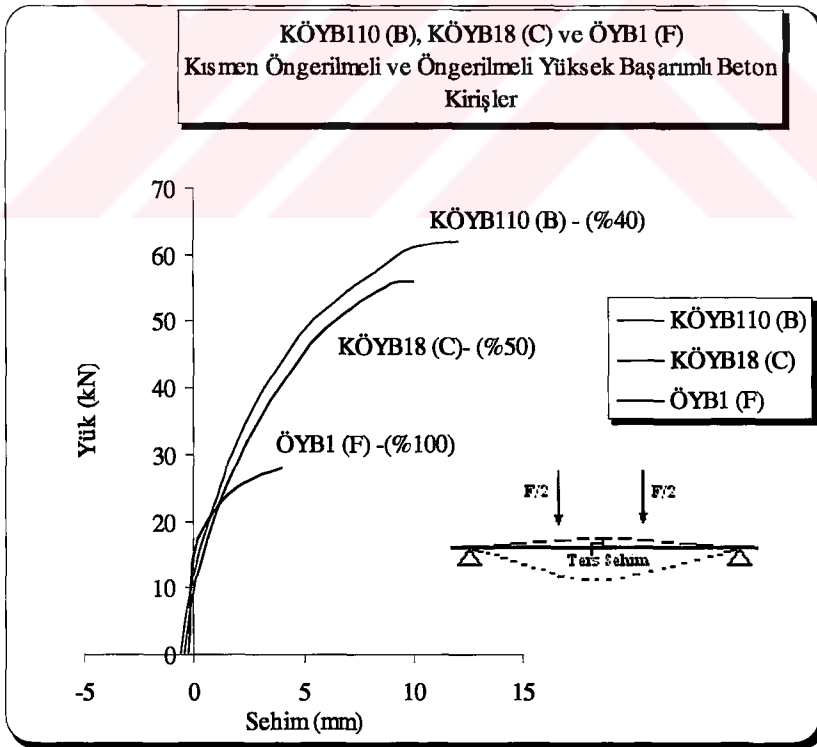
Şekil 2.52. Öngerilme oranı %70 olan E tipi kısmen öngerilmeli, 2 $\phi$ 7 aktif ve 2 $\phi$ 8 pasif donatıya sahip, yüksek başarımlı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB28 (E)]



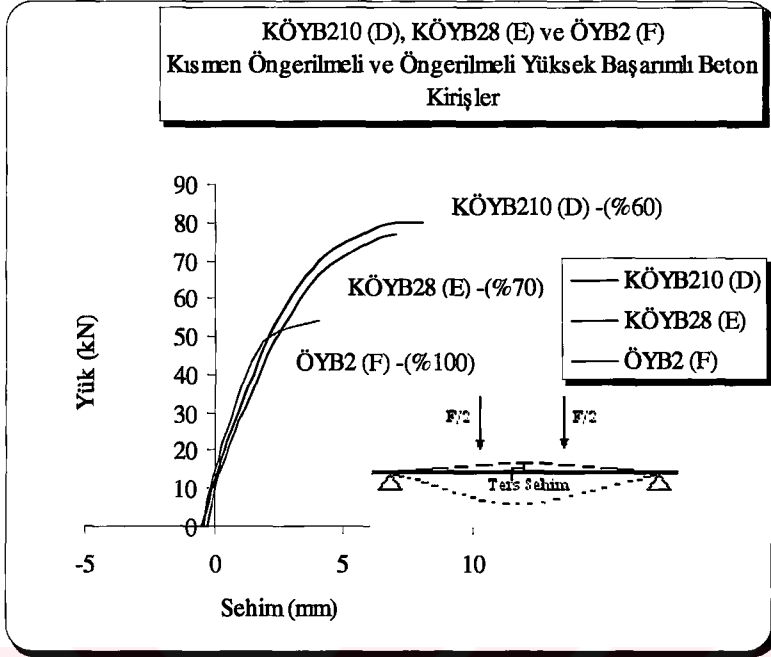
Şekil 2.53. Öngerilme oranı %100 olan F tipi öngerilmeli, 1Ø7 aktif donatıya sahip, yüksek başarımlı ve geleneksel beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [ÖYB1 (F)-ÖG1 (F)]



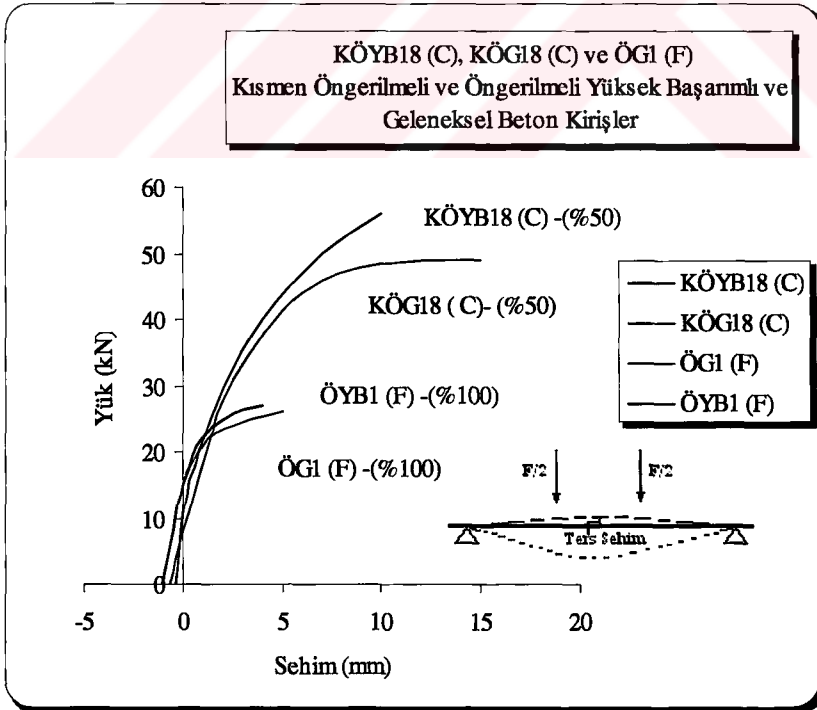
Şekil 2.54. Uygulanan yükün fonksiyonu olarak kirişlerin yük-sehim diyagramlarının genel durumu



Şekil 2.55. Öngerilme oranı %40, %50, %100 olan B,C ve F tipi kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarılı beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları

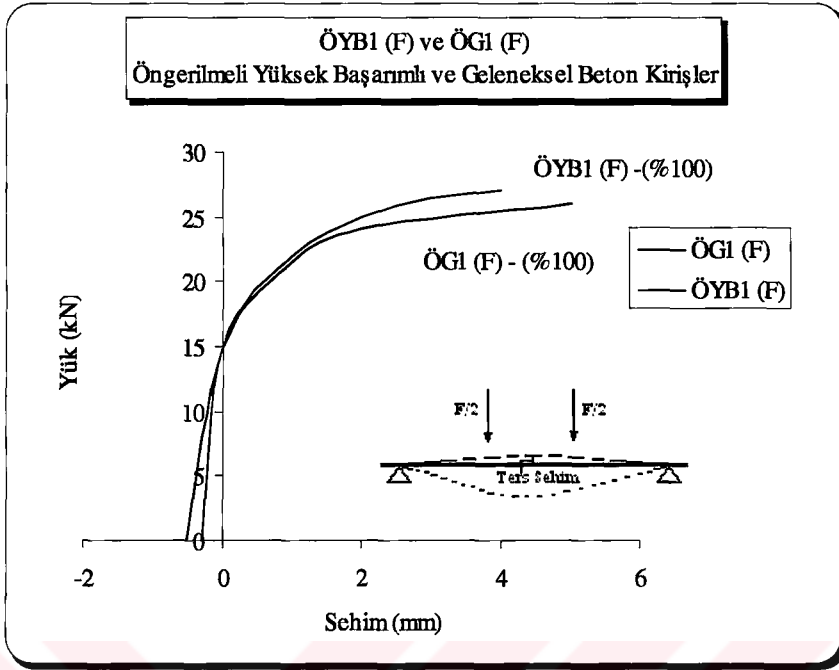


Şekil 2.56. Öngerilme oranı %60, %70 ve %100 olan D, E ve F tipi kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarılı beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları

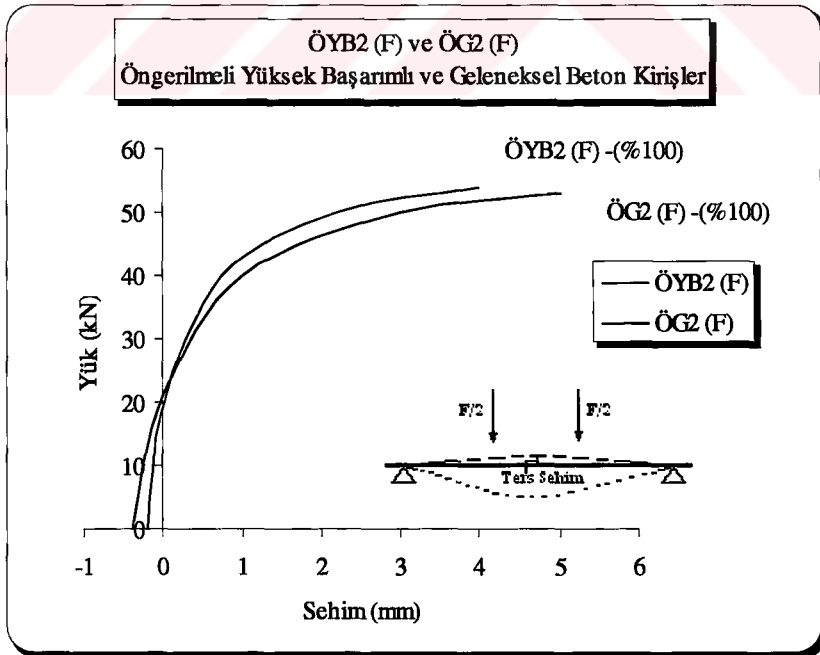


Şekil 2.57. Öngerilme oranı %50 ve %100 olan C ve F tipi kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarılı ve geleneksel beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları





Şekil 2.58. Öngerilme oranı %100 olan F tipi öngerilmeli yüksek başarımli ve geleneksel beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları [ÖYB1 (F) ve ÖG1(F)]

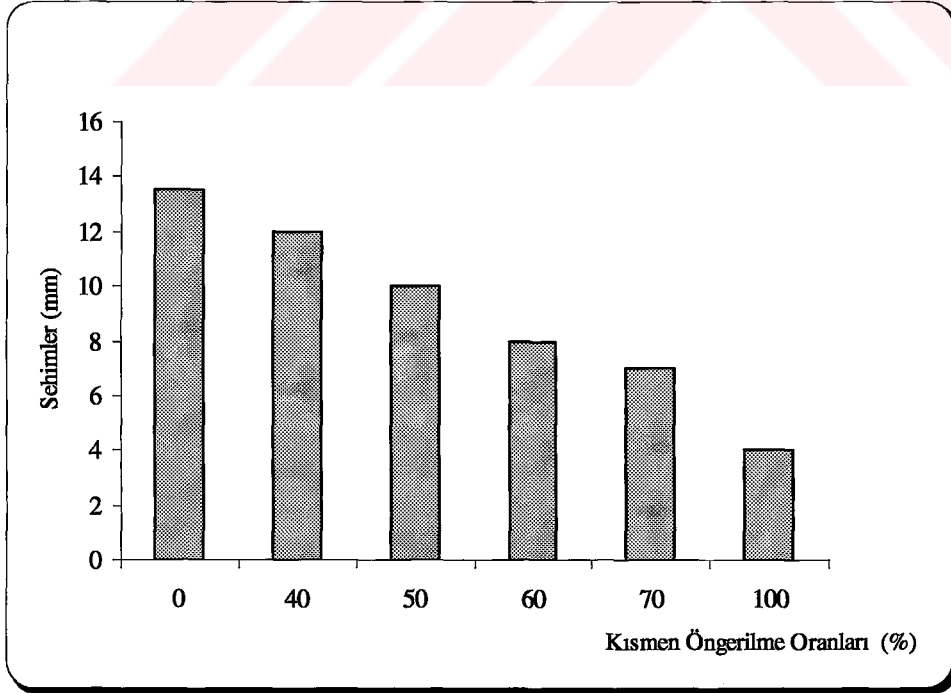


Şekil 2.59. Öngerilme oranı %100 olan F tipi öngerilmeli yüksek başarımli ve geleneksel beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları [ÖYB2 (F) ve ÖG2(F)]

Deney kirişlerine ilişkin yukarıda verilen deneysel diyagramlara göre (Şekil 2.48' den Şekil 2.59' a kadar) belirlenen kırılma yükleri, kırılma momentleri ve sehimler Çizelge 2.37' de, kısmen öngerilme oranı ile sehimlerin değişimi ise Şekil 2.60' da verilmektedir.

Çizelge 2.37. Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarımlı ve geleneksel beton deney kirişlerine ilişkin kırılma yükleri, deneysel kırılma momentleri ve sehimler

Kiriş Kod ve Tipleri	Kırılma Yüğü (kN) ( $F_r$ )	Deneysel Kırılma Momenti (kNm)	Kırılma Yüğü'nün %75'i Altındaki Sehimler (mm)
KÖYB110 (B)	62	20,77	12,00
KÖYB18 (C)	56	18,76	10,00
KÖG18 (C)	49	16,42	15,00
KÖYB210 (D)	80	26,80	8,00
KÖYB28 (E)	77	25,80	7,00
ÖYB1 (F)	28	9,38	4,00
ÖYB2 (F)	54	18,10	4,00
ÖG1 (F)	26	8,71	5,00
ÖG2 (F)	53	17,80	5,00



Şekil 2.60. Kısmen öngerilme oranı ile sehimlerin değişimi

### 2.2.2.10. Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Kırılmalarının İncelenmesi

Betonarme kirişlerin kırılmalarının incelenmesi daha önce Madde 2.2.1.9' da yapılmıştır. Bu başlık altında ise kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarımli ve geleneksel beton kirişlerin kırılmaları üzerinde durulmaktadır.

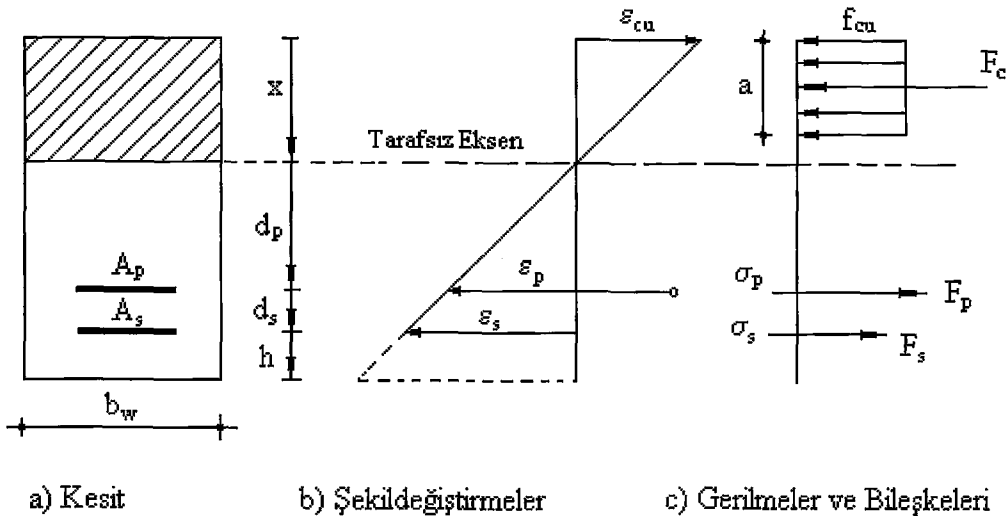
#### 2.2.2.10.1. Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Kırılma ve Kullanım Momentlerinin Hesabında İzlenen Yol

Deney bulgularının irdelenmesinde kullanabilmek için çalışmamıza konu olan kirişlerin kırılma ve kullanım momentleri hesaplanmaktadır.

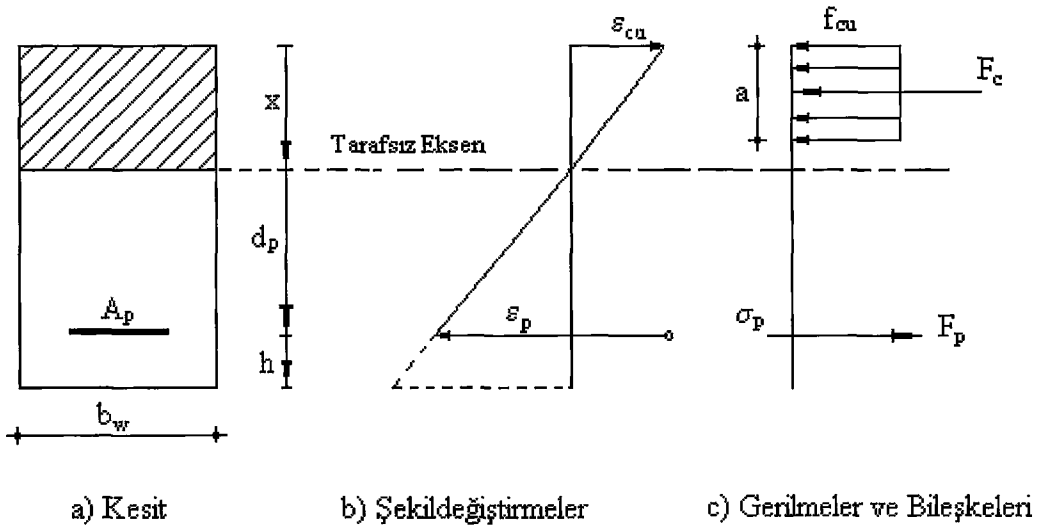
##### 2.2.2.10.1.1 Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Teorik Kırılma Momentinin Hesabı

###### 2.2.2.10.1.1.1. Hesap Kabulleri

Betonarme kirişlerin kırılma ve kullanım momentlerinin hesabında yapılan kabuller burada da aynen geçerli olmakta, ancak incelenen kesit artık kısmen öngerilmeli yada öngerilmeli beton bir kesit olduğundan, bunlara ilişkin betonda kırılma anındaki, basınç gerilmelerinin dağılım diyagramları, şekildeğiştirmeler, gerilmeler ve bileşkeleri kısmen öngerilmeli beton kirişler için Şekil 2.61' de, öngerilmeli beton kirişler için ise Şekil 2.62' de verilmektedir.



Şekil 2.61. Kısmen öngerilmeli beton bir kesitte şekildeğiştirmeler, gerilmeler ve bileşkeleri



Şekil 2.62. Öngerilmeli beton bir kesitte şekildeğiştirmeler, gerilmeler ve bileşkeleri

### 2.2.2.10.1.1.2. Hesap İlkesi

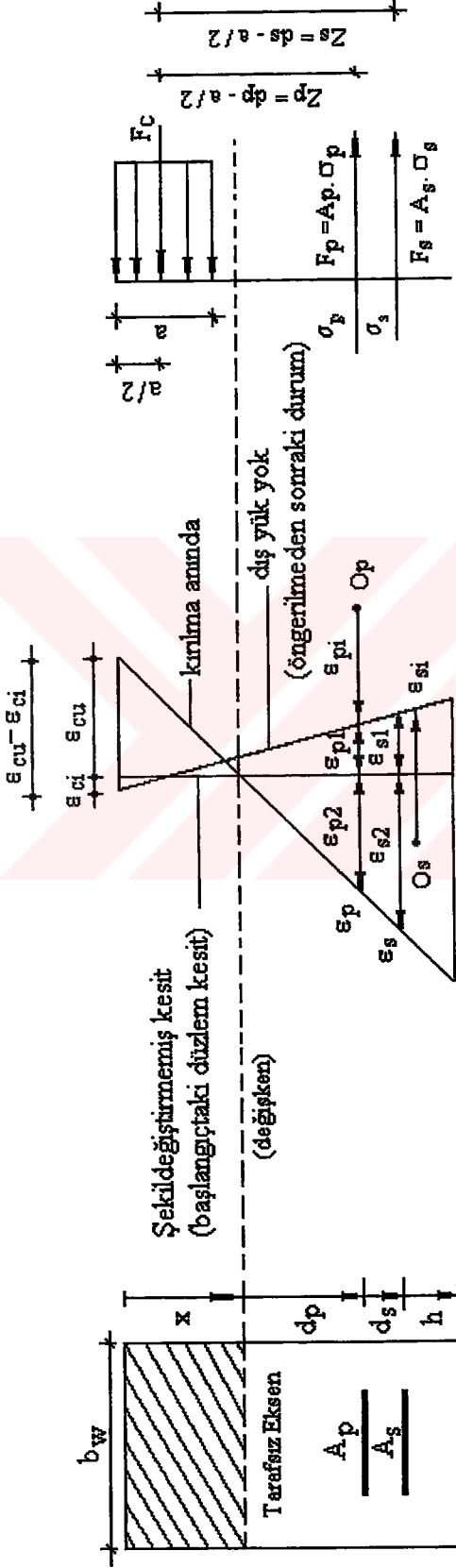
Kırılma momentinin hesabındaki ilkeler daha önce betonarme kirişler için Madde 2.2.1.9.1.1.2.' de belirtildiği gibidir. Buna göre kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlere ilişkin şekildeğiştirme diyagramları, gerilme diyagramları, kesitin denge denklemlerinin belirlenmesi ve hesap yöntemi aşağıda verilmektedir.

#### a) Şekildeğiştirme diyagramının belirlenmesi

Salt eğilme etkisindeki kısmen öngerilmeli beton kirişlerin kırılma anında kesitlerindeki şekildeğiştirme diyagramları, kesitte oluşan gerilmeler ve bileşkeleri Şekil 2.63' de verilmektedir.

Burada dikkate alınan kesit eğer öngerilmeli beton bir kesit ise Şekil 2.63' deki kesitte pasif donatının olmayacağını belirtmeye gerek yoktur.

Bu şekil üzerinde, betondan bağımsız başlangıç şekildeğiştirmelerini dikkate almak için, aktif donatı şekildeğiştirmelerinin orijini ( $O_p$ ) betonun elastik şekildeğiştirmelerinin sıfır olduğu başlangıçtaki düzlem kesitin sağına doğru kaydırılmıştır. Buna karşılık, büzülme ve sünme (elastik olmayan şekildeğiştirmeler) etkisiyle pasif donatı ek kısaltmaların etkisinde olduğundan şekildeğiştirmemiş hali yani, şekildeğiştirmesinin orijini başlangıçtaki düzlem kesitin solunda bulunmaktadır [116,121].



a) Kesit

b) Şekildeğiştirmeler

c) Gerilmeler ve Bileşkeleri

$O_p$  ve  $O_s$  : sırasıyla aktif ve pasif donatıların birim boy değışimlerinin orjünlerini göstermektedir.

Şekil 2.63. Kısmen öngerilmeli beton bir kesitin şematik şekildeğiştirme diyagramı, kırılma anında kesitte oluşan, gerilmeler ve bileşkeleri [46].

Kırılma anında donatıların toplam şekildeğişimleri:

$$\text{Aktif donatıda; } \epsilon_p = \epsilon_{pi} + \epsilon_{p1} + \epsilon_{p2} \quad (2.60)$$

$$\text{Pasif donatıda; } \epsilon_s = \epsilon_{si} + \epsilon_{s1} + \epsilon_{s2} \quad (2.61)$$

şeklinde olup bu eşitliklerde;  $\epsilon_{pi}$  ve  $\epsilon_{si}$  sırasıyla aktif ve pasif donatıların başlangıç birim boy değişimlerini (uzamalar pozitif),  $\epsilon_{p1}$  ve  $\epsilon_{s1}$  sırasıyla aktif ve pasif donatı seviyesindeki beton liflerde basınç boşalmasından (betondaki basınç gerilmelerinin sıfıra dönmesinde) meydana gelen birim boy değişimlerini,  $\epsilon_{p2}$  ve  $\epsilon_{s2}$  sırasıyla aktif ve pasif donatı için betonda basınç boşalmasından sonra meydana gelen birim boy değişimlerini göstermektedir. Buradaki  $\epsilon_{pi}$  ve  $\epsilon_{p1}$ 'nin belirlenmesinde ise,  $\sigma_{pi}$  yüksüz durumda gerilme kayıpları da dikkate alınarak hesaplanan aktif donatı başlangıç gerilmesini,  $E_p$  aktif donatının elastiklik modülünü,  $\sigma_c$  yüksüz durumda aktif donatı seviyesindeki beton liflerdeki basınç gerilmesini ve  $E_c$  betonun elastiklik modülünü göstermek üzere,

$$\epsilon_{pi} = \frac{\sigma_{pi}}{E_p} \quad (2.62)$$

$$\epsilon_{p1} = \frac{\sigma_c}{E_c} \quad (2.63)$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır.

### b) Gerilme diyagramının belirlenmesi

Aktif ve pasif donatılardaki normal gerilmeler, gerilme-şekildeğiştirme diyagramları yardımıyla, şekildeğiştirmelere karşılık olarak elde edilmektedir (bkz. Şekil 2.10, Şekil 2.11, Şekil 2.39). Betondaki basınç gerilmeleri ise Şekil 2.63' deki gibidir.

### c) Kesitin denge denklemlerinin belirlenmesi

Kısmen öngerilmeli beton bir kesitin taşıma gücüne göre hesabında kullanılan denge denklemleri:

## 1) Kuvvet denge denklemi

Kuvvet denge denklemi,  $F_c$ ,  $F_s$  ve  $F_p$  sırasıyla beton basınç gerilmeleri, pasif donatı gerilmeleri ve aktif donatı gerilmeleri bileşke kuvvetlerini göstermek üzere;

$$F_c = F_s + F_p \quad (2.64)$$

şeklinde yazılmakta ve,  $A_s$  ve  $A_p$  sırasıyla pasif ve aktif donatı alanlarını,  $\sigma_s$  ve  $\sigma_p$  sırasıyla kırılma anında pasif ve aktif donatılardaki gerilmeleri göstermek üzere,  $F_s = A_s \cdot \sigma_s$  ve  $F_p = A_p \cdot \sigma_p$  olarak,  $F_c$  ise daha önce betonarme kirişler için Çizelge 2.15' de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

Burada Kaynak [117]' de önerilmeli beton elemanlarda eşdeğer dikdörtgen gerilme diyagramını dolayısıyla da beton basınç bileşke kuvvetini ( $F_c$ ) belirleyen  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  katsayılarının,  $f_{ck} \rightarrow MPa$  karakteristik beton basınç dayanımını göstermek üzere,  $f_{ck} \leq 30MPa$  için  $k_1=k_3=0,85$ ,  $f_{ck} > 30MPa$  için  $k_1 = 0,85 - 0,0075(f_{ck} - 30)$ ,  $k_3 = 0,85$  ve  $f_{ck}$  ne olursa olsun  $k_2 = k_1/2$  olarak alınmasının öngörüldüğünü belirtmek uygun olmaktadır.

## 2) Moment denge denklemi

Moment denge denklemi,  $M_r$  teorik kırılma momentini,  $Z_s$  ve  $Z_p$  sırasıyla pasif ve aktif donatı ağırlık merkezlerinin  $F_c$ ' nin tatbik noktasına olan uzaklıklarını, diğer bir deyişle moment kollarını, göstermek üzere,

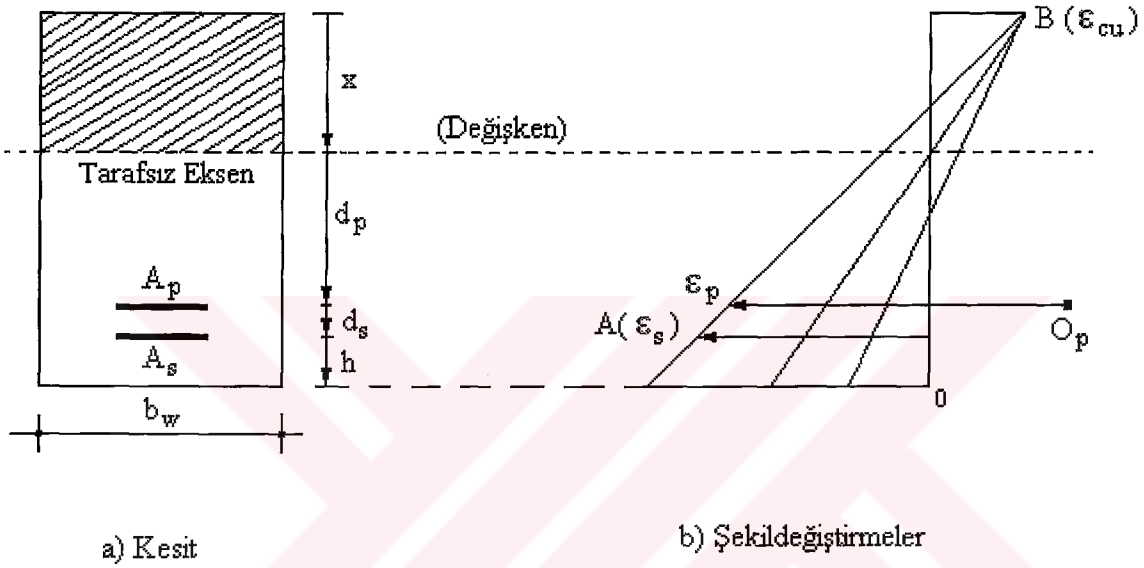
$$M_r = F_s Z_s + F_p Z_p \quad (2.65)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

## d) Hesap yöntemi

Kullanılan donatıların gerilme-şekildeğiştirme bağıntılarının karmaşıklığı nedeniyle, alışılmış hesap yoluyla denge denklemlerinin yazımı, kırılma momentinin doğru olarak

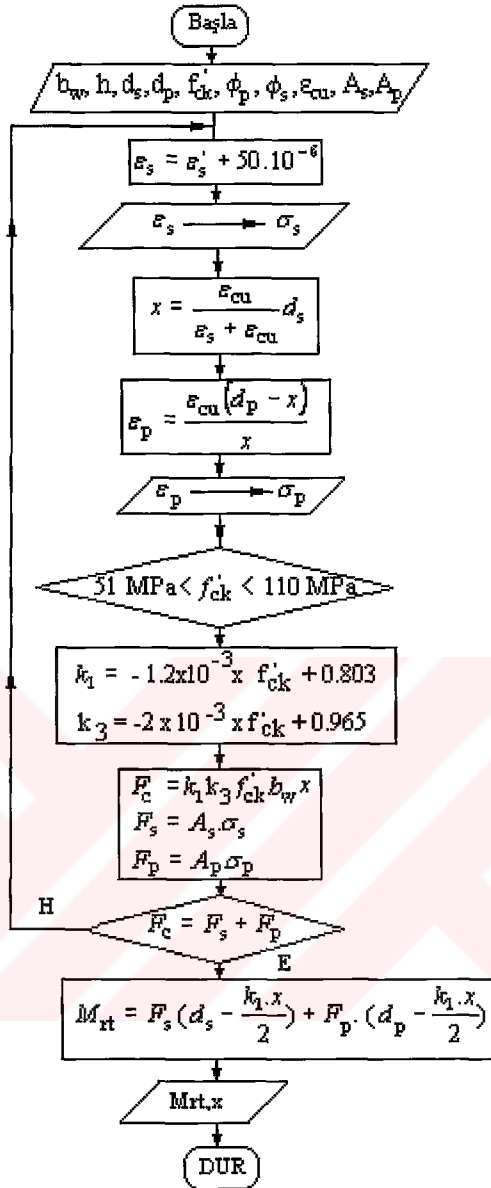
tainine imkan vermediği, bu nedenle kırılma momentinin ardışık yaklaşım yöntemiyle hesaplamak zorunda olduğu daha önce betonarme kirişlere ilişkin açıklamalarda belirtilmişti. Bunun için kırılma anında betonun birim kısalması  $\epsilon_{cu}$  belliyken, denge gerçekleşinceye kadar salt eğilme etkisindeki kesitin şekildeğiştirme diyagramını  $B(\epsilon_{cu})$  noktası etrafında döndürmek yeterli olmaktadır. (Şekil 64).



Şekil 2.64 Kısmen öngerilmeli beton bir kesitin kırılma anındaki şekildeğiştirme diyagramının araştırılması

Bu ardışık yaklaşım yöntemiyle eğilme etkisindeki kısmen öngerilmeli yüksek başarılı beton bir kesitin kırılma momentini hesaplamak için geliştirilen bir bilgisayar programının akış diyagramı Şekil 2.65' de, bu programla hesaplanan teorik kırılma momentleri ( $M_{rt}$ ) Çizelge 2.38' de verilmektedir.





Şekil 2.65. Kısmen öngerilmeli yüksek başarımlı beton kirişler için teorik kırılma momentinin hesabında kullanılan bilgisayar programı akış diyagramı

## 2.2.2.10.1.2. Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Tasarım Kırılma Momentleri ve Kullanım Momentlerinin Hesabı

### 2.2.2.10.1.2.1. Hesap Kabulleri

Düzlem kesitlerin düzlem kalma, çekme etkisindeki betonun rolü ve malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme diyagramlarına ilişkin Madde 2.2.1.9.1.1.1' de betonarme kirişler

için belirtilen kabuller burada da aynen yapılmakta ve aşağıdaki iki koşuldan biri yada ikisi aynı anda sağlandığında kırılma sınır durumuna ulaşılmaktadır:

- a) Betonun üst lifindeki birim kısalmanın  $\varepsilon_{cu} = 3 \times 10^{-3}$  değerini alması,
- b) Aynı seviyede betondaki basınç boşalmasından sonraki donatı birim uzaması  $\varepsilon_{s2}$  yada  $\varepsilon_{p2}$  (bkz. Şekil 63)  $10 \times 10^{-3}$ ' e varması.

#### 2.2.2.10.1.2.2. Hesap İlkesi

Tasarım kırılma momentinin Kaynak [22]' ye göre hesabında, teorik kırılma momentinin hesabındaki yol aynen izlenmektedir.

#### 2.2.2.10.1.3. Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Karakteristik ve Ortalama Kırılma Momentinin Hesabı

Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerin karakteristik ve ortalama kırılma momentlerinin ( $M_{rk}, M_{rm}$ ) hesabında, tasarım kırılma momenti ( $M_{rd}$ ) hesabındaki yol aynen izlenmekte ancak hesaplarda malzemelerin karakteristik ve ortalama dayanımları kullanılmaktadır.

#### 2.2.2.10.1.4. Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Kullanım Momentleri Hesabı

Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerin kullanım momenti ( $M_s$ ) hesabı için betonarme kirişlerde yapılan kabuller ve hesap ilkesinin aynen geçerli olduğu varsayılmakta dolayısıyla da bu hesaplarda da (2.17) bağıntısı kullanılmaktadır.

#### 2.2.2.10.2. Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Kırılma ve Kullanım Momentleri

Çalışmamıza konu olan kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerin deneysel olarak ve hesap yoluyla belirlenen kırılma ve kullanım momentleri aşağıdaki Çizelge 2.38' de verilmektedir.

Çizelge 2.38: Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton deney kirişlerinin kırılma ve kullanım momentleri

Kiriş Kod ve Tipleri	$M_{re}$ (kNm)	$M_{rt}$ (kNm)	$M_{rm}$ (kNm)	$M_{rk}$ (kNm)	$M_{rd}$ (kNm)	$M_s$ (kNm)
KÖYB110 (B)	20,77	18,33	16,53	16,50	14,01	9,34
KÖYB18 (C)	18,76	16,14	13,24	13,19	11,24	7,49
KÖG18 (C)	16,42	13,89	12,47	12,43	10,38	6,92
KÖYB210 (D)	27,47	24,20	22,39	22,18	18,50	12,33
KÖYB28 (E)	25,80	22,90	19,30	19,09	15,96	10,64
ÖYB2 (F)	18,10	16,16	13,92	13,71	11,75	7,84
ÖG2 (F)	17,80	15,90	14,02	13,91	11,63	7,74

### 2.2.2.10.3. Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Deneysel Emniyet Katsayıları

Bu çalışmada deneysel kırılma momentinin diğer momentlere oranının, deneysel emniyet katsayısı olarak adlandırıldığı daha önce belirtilmişti (bkz. Madde 2.2.1.9.3). Buna göre Çizelge 2.38 yardımıyla  $\gamma_s = M_{re}/M_s$ ,  $\gamma_r = M_{re}/M_{rt}$ ,  $\gamma_r^* = M_{re}/M_{rm}$ ,  $\gamma_r^{**} = M_{re}/M_{rk}$  ve  $\gamma_r^{***} = M_{re}/M_{rd}$  şeklinde hesaplanan emniyet katsayıları Çizelge 2.39'da verilmektedir.

Çizelge 2.39. Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişler için deneysel emniyet katsayıları

Kiriş Kod ve Tipleri	Deneysel Emniyet Katsayıları				
	$\gamma_s$	$\gamma_r$	$\gamma_r^*$	$\gamma_r^{**}$	$\gamma_r^{***}$
KÖYB110 (B)	2,22	1,13	1,26	1,25	1,48
KÖYB18 (C)	2,50	1,16	1,42	1,48	1,67
KÖG18 (C)	2,37	1,18	1,33	1,32	1,58
KÖYB210 (D)	2,23	1,14	1,23	1,24	1,48
KÖYB28 (E)	2,42	1,13	1,34	1,35	1,62
ÖYB2 (F)	2,31	1,12	1,30	1,32	1,54
ÖG2 (F)	2,30	1,12	1,27	1,28	1,53

### **2.2.2.11. Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Çatlama Durumlarının İncelenmesi**

Avrupa Beton Komitesi (CEB) betonarme, öngerilmeli ve kısmen öngerilmeli betona ilişkin tek bir yönetmelik hazırlamak amacıyla beton yapıları dört sınıfta toplamaktadır [125,126]. Buna göre:

#### **I. sınıf yapılar**

Bu yapılar boş durumda ve en elverişsiz kullanım yükleri altında kesitlerinin hiç birinde çekme gerilmesi olmayan yapılar olarak tanımlanmaktadır. Öngerilmeli beton elemanların bu sınıfa girdiği açıktır.

#### **II. sınıf yapılar**

Bu yapılar boş durumda ve en elverişsiz kullanım yükleri altında kesitlerinde çatlama zorunluluğu olmayacak kadar çekme gerilmesine izin verilen ve sabit yüklerin yönetmeliklerce artırılmış değerleri altında basınç boşalması sınırına ulaşmak zorunda da olmayan yapılar olarak tanımlanmaktadır.

#### **III. sınıf yapılar**

Kısmen öngerilmeli beton adıyla da anılan bu yapılar, kesitlerinde boş durumda ve kullanım yüklerinin seyrek olarak ortaya çıkan türlerinin de etkidiği durumlarda betonun çatlamasına izin verilen, fakat bu seyrek etkiyen kullanım yüklerinin ortadan kalkması halinde çatlağın kapandığı yapılar olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir deyişle, çatlak açıklıkları sınırlı kalmak koşuluyla çatlamlarına izin verilen ancak sabit yükün, yönetmeliklerce önerilen artırılmış değerleri altında çatlak oluşum sınırına ulaşmak zorunda olmayan yapılardır.

#### **IV. sınıf yapılar**

Son olarak bu yapıların çatlamları kabul edilmekte, bununla beraber yapının kullanım amacına ve yerine göre çatlak genişliklerinin sınırlı olması istenmektedir. Betonarme yapılar bu son sınıfa girmektedir.

Görüldüğü gibi, Avrupa Beton Komitesi (CEB), betonarme, öngerilmeli ve kısmen öngerilmeli betona ilişkin ortak bir yönetmelik hazırlamak amacıyla beton yapıları, yukarıda tanımlanmaya çalışılan, dört sınıfa ayırırken, çatlama yada çatlama ölçütünü kullanmaktadır. Durum böyle olunca, kirişlerin çatlamlarının incelenmesi, özellikle kısmen öngerilmeli beton yapılara karşılık gelen II. ve III. sınıf yapılar için çok daha önemli olmaktadır.

Gerçekten, çatlama elemanlarda bu çalışmada aktif adı verilen öngerilme donatısının varlığı, bu donatıların yorulma ve korozyonla kırılmalarına neden olabilmektedir. Bu durumda, kullanım halindeki III. sınıf yapılarda, özellikle gerçek çatlak genişlikleriyle, gerçek çatlama momentinin bilinmesi gerekmektedir.

Diğer taraftan II. sınıf yapılar için de muhtemel çatlama momentinin değerinin, yani eğilme etkisindeki kirişlerde betonun çekmedeki davranışının bilinmesi gerekmektedir. Betonarme elemanlarda çatlama sorunu laboratuvarlarda olduğu kadar, gerçek yapılar üzerinde de ciddi ve geniş incelemelere konu olmasına rağmen, kısmen öngerilmeli beton da bu konuda yapılan incelemeler maalesef yeterli değildir. Bu nedenle bu başlık altında, kısmen öngerilmeli betonda çatlama olayı hakkında bazı hatırlatmalardan sonra, çalışmalarımıza konu olan kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarılı ve geleneksel beton kirişlerin kırılma anında momentin sabit olduğu bölgede oluşan çatlak sayıları, çatlak mesafeleri, deneysel ve teorik çatlak genişlikleri, şematik çatlak durumları, deneysel ve teorik ilk çatlama momentleri üzerinde durulmaktadır.

#### **2.2.2.11.1. Kısmen Öngerilmeli Betonda Çatlama**

Bilindiği gibi, betonarmede çatlama konusunda bir çok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların doğal sonucu olarak çatlak genişlikleri üzerine çok sayıda deneysel yada teorik bağıntılar elde edilmiştir. Bu konuda önerilen çeşitli teoriler arasında hiçbir çelişki bulunmamaktadır. Gerçekten dikkate alınan etkenler aynı olup, sadece katsayılar ve bazen de parametrelerin etkime dereceleri değişmektedir. Söz konusu teorilerin hepsinde esas değişken çatlama kesitteki  $\sigma_s$  pasif donatı gerilmesi olmaktadır (bkz. Madde 2.2.1.10.1). Bu durumda Avrupa Beton Komitesi (CEB) betonarme yapı tekniği için kullanılması önerilen bağıntıların basitleştirilmiş hallerinin kısmen öngerilmeli beton yapı tekniği için de kullanılabileceğini öngörmektedir.

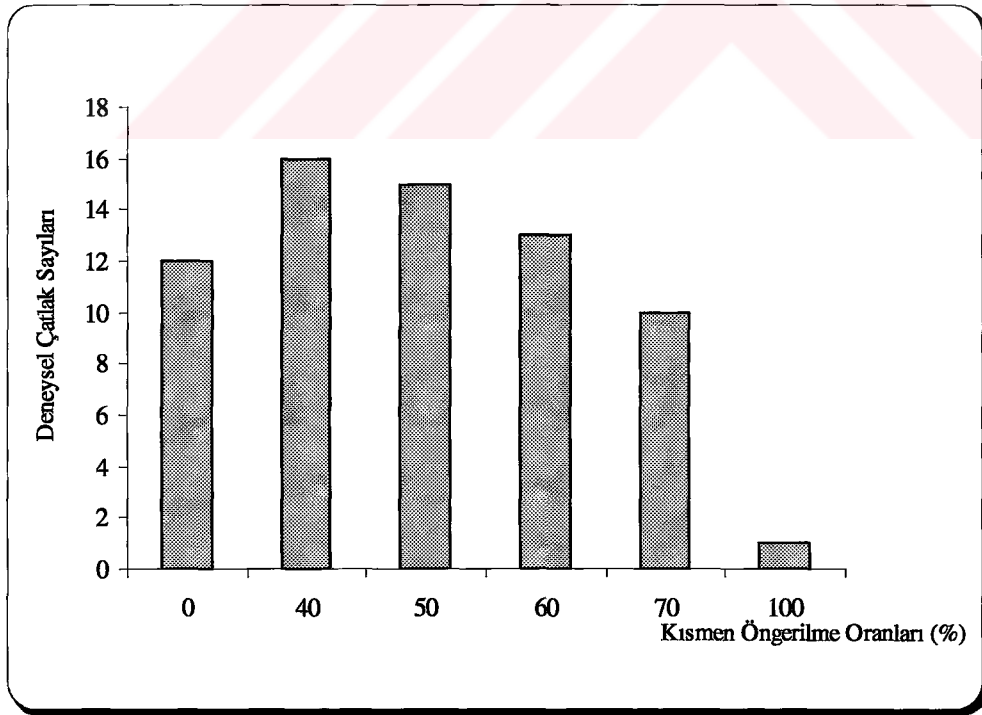
#### **2.2.2.11.2. Beton Kalitesinin Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Çatlama Durumu Üzerindeki Etkisi**

Bu çalışmaya konu olan kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarılı ve geleneksel beton deney kirişlerin kırılma anında, momentin sabit olduğu bölgede, belirlenen çatlak sayıları, ortalama çatlak mesafeleri, deneysel, teorik ve karakteristik çatlak genişlikleri aşağıdaki Çizelge 2.40' da, bunların kısmen öngerilme oranına (PPR)

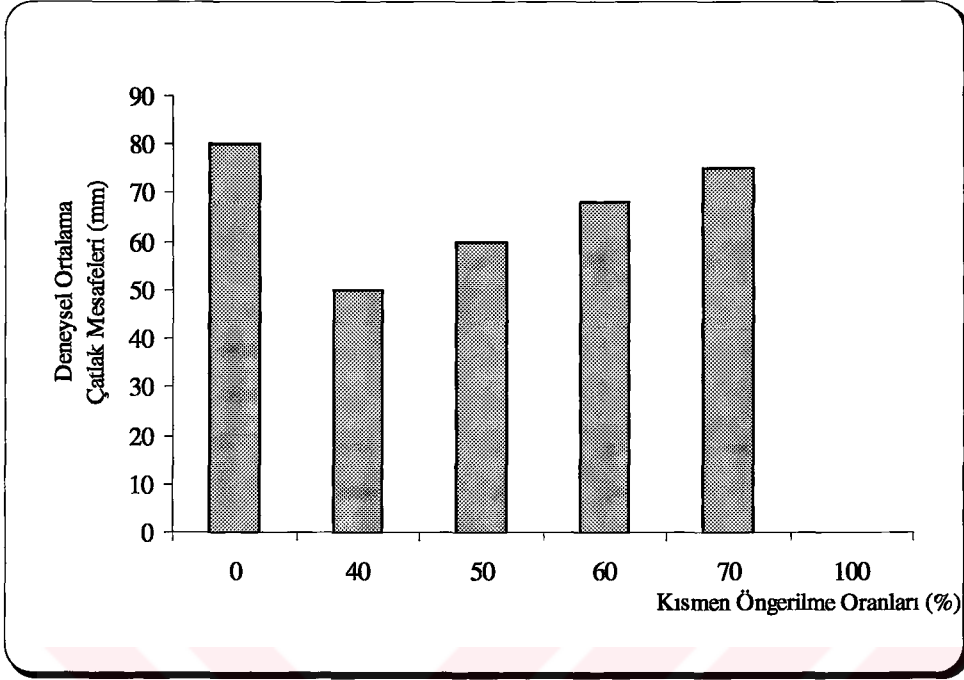
göre değişimleri Şekil 2.66, Şekil 2.67 ve Şekil 2.68' de, kirişlerin kırılma yükü altında ön yüzlerinde meydana gelen şematik çatlama durumları ise Şekil 2.69 ve Şekil 2.70' de verilmektedir.

Çizelge 2.40 Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerde kırılma yükleri altında momentin sabit olduğu bölgede oluşan çatlak sayısı, ortalama çatlak mesafeleri, deneysel, teorik ve karakteristik çatlak genişlikleri

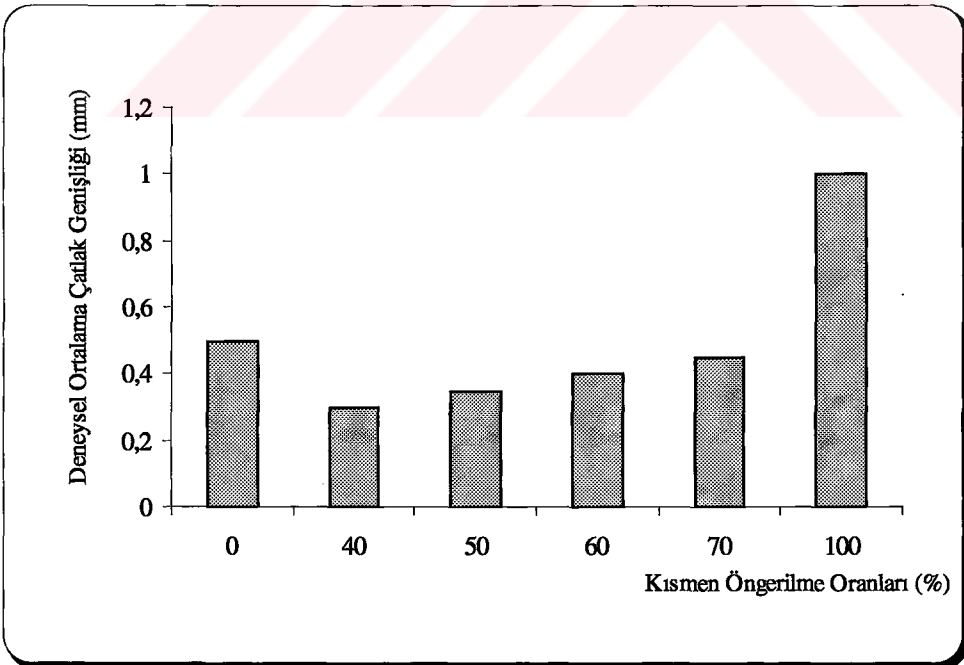
Kiriş Kod ve Tipleri	Çatlak Sayıları	Ortalama Çatlak Mesafesi (mm)	Deneysel Ortalama Çatlak Genişliği ( $w_m$ ) (mm)	Teorik Ortalama Çatlak Genişliği ( $w_m$ ) (mm)	Karakteristik Çatlak Genişliği ( $w_k$ ) (mm)
KÖYB110 (B)	16	50	0,30	0,030	0,051
KÖYB18 (C)	15	60	0,35	0,036	0,061
KÖG18 (C)	5	90	0,80	0,049	0,083
KÖYB210 (D)	13	68	0,40	0,040	0,068
KÖYB28 (E)	10	75	0,45	0,051	0,086
ÖYB2 (F)	1	-	-	0,060	0,102
ÖG2(F)	1	-	-	0,060	0,102



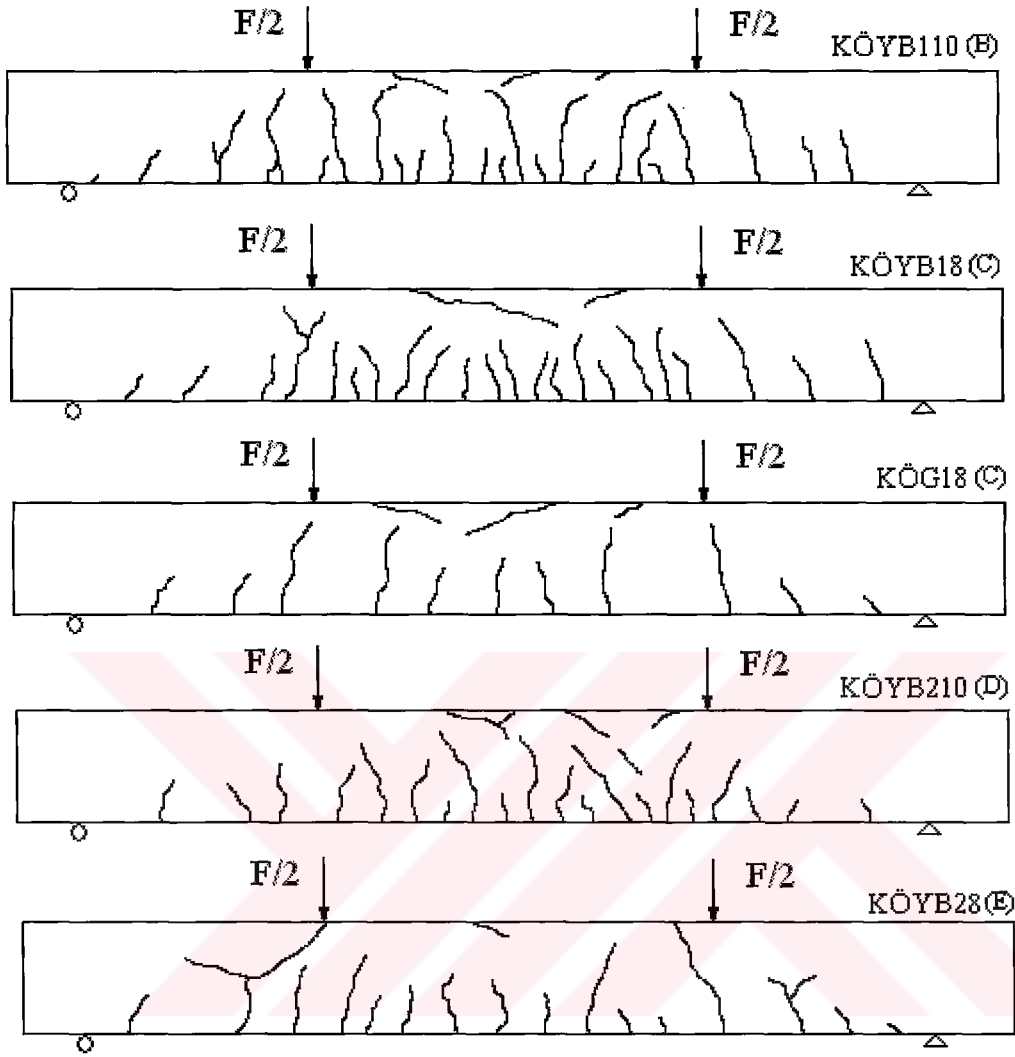
Şekil 2.66. Kısmen öngerilmeli yüksek başarımlı beton kirişlerin kırılma yükü altında momentin sabit olduğu bölgelerinde çatlak sayılarının kısmen öngerilme oranıyla değişimi



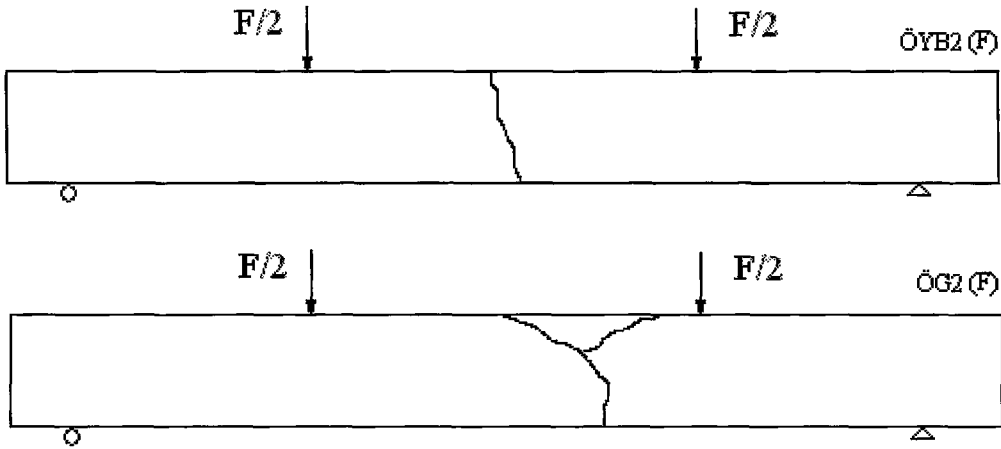
Şekil 2.67. Kısmen öngerilmeli yüksek başarımlı beton kirişlerin kırılma yükü altında momentin sabit olduğu bölgelerinde deneysel ortalama çatlak mesafelerinin kısmen öngerilme oranıyla değişimi



Şekil 2.68. Kısmen öngerilmeli yüksek başarımlı beton kirişlerin kırılma yükü altında momentin sabit olduğu bölgelerinde deneysel ortalama çatlak genişliklerinin kısmen öngerilme oranıyla değişimi



Şekil 2.69. Kısmen öngerilmeli yüksek başarımlı ve geleneksel beton kirişlerin kırılma yükü altında ön yüzlerinin şematik çatlama durumu



Şekil 2.70. Öngerilmeli yüksek başarımlı ve geleneksel beton kirişlerin kırılma yükü altında ön yüzlerinin şematik çatlama durumu



Daha önce verilen Çizelge 2.40 ile Şekil 2.69 ve Şekil 2.70' den aderansı geliştirilmiş yeterli pasif donatıya sahip kısmen öngerilmeli beton kirişlerde normal gelişen yaygın çatlakların, pasif donatısı olmayan öngerilmeli beton kirişlerde ise anormal gelişen yerel çatlakların meydana geldiği görülmektedir.

### 2.2.2.11.3. Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin İlk Çatlama Momentleri

Deneysel ilk çatlama momentleri, kiriş alt yüzünde beton ve donatıya yapıştırılan birim şekildeğiştirme ölçerleri yardımıyla belirlenen maksimum birim uzamalara bağlı olarak hesaplanmaktadır. Zira, betonda ilk mikro çatlak oluşur oluşmaz yük-şekil değiştirme eğrilerinin eğimleri ani olarak değişmektedir (bkz. Şekil 2.48 - Şekil 2.53).

Teorik çatlama momentleri ise: Kaynak [117]' de verilen,  $f_{ctd}$  betonun hesap merkezi çekme dayanımını,  $A_c$  beton kesit alanını,  $P_{ef}$ , kayıplardan sonra etkin öngerilme kuvvetini,  $W$  kesitin mukavemet momentini,  $M_g$  yük dağıtma köprüsü ve özağırlıktan doğan momenti ve  $e$  aktif donatı ağırlık merkezinin brüt beton alanı ağırlık merkezi arasındaki uzaklığını göstermek üzere,

$$M_{cr} = \left[ 2f_{ctd} + \frac{P_{ef}}{A_c} + \frac{P_{ef} \cdot e}{W} - \frac{M_g}{W} \right] W \quad (2.66)$$

bağıntıyla hesaplanmaktadır.

Bu bağıntıyla hesaplanan teorik ilk çatlama momentleri ve deneysel ilk çatlama momentlerinin aktif ve pasif donatı oranlarıyla değişimi ile ilk çatlama oluşturulan maksimum birim uzamaları Çizelge 2.41' de verilmektedir.

Çizelge 2.41. Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerin donatı oranları, deneysel ve teorik ilk çatlama momentleri ile ilk çatlama oluşturulan maksimum birim uzamalar

Kiriş Kod ve Tipleri	Toplam Donatı Oranı $\rho_{top}$	Pasif Donatı Oranı $\rho_s$	Aktif Donatı Oranı $\rho_p$	Deneysel İlk Çatlama Momentleri (kNm)	Teorik İlk Çatlama Momentleri (kNm)	İlk Çatlama Oluşturan Maks.Birim Uzamalar ( $10^6 \epsilon_{ct}$ )
KÖYB110(B)	0,0098	0,0079	0,0019	6,53	6,17	115
KÖYB18(C)	0,0069	0,0050	0,0019	6,70	6,27	100
KÖG18 (C)	0,0069	0,0050	0,0019	5,51	5,03	110
KÖYB210(D)	0,0117	0,0079	0,0038	6,80	6,28	115
KÖYB28 (E)	0,0088	0,0050	0,0038	7,04	6,38	110
ÖYB2(F)	0,0038	-	0,0038	6,32	5,98	100
ÖG2 (F)	0,0038	-	0,0038	5,69	5,35	105

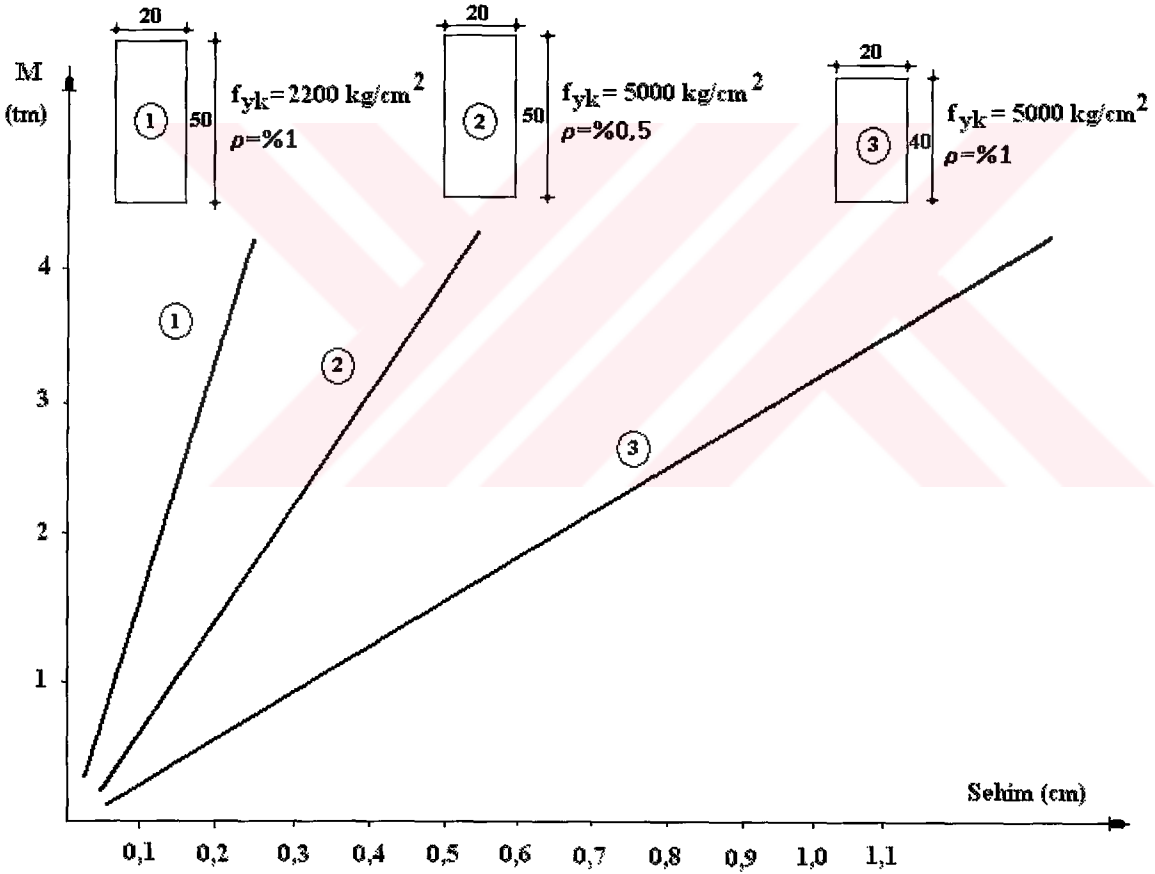
Bu çizelgeden deneysel çatlama momenti değerlerinin, teorik çatlama momenti değerlerine pratik olarak eşit olduğu görülmektedir. Durum böyle olunca, daha önce gerçekleştirilen çalışmaların da doğruladığı gibi [115,127], çekme etkisi altındaki beton kesitte plastikleşme olmamaktadır.

#### 2.2.2.12. Kısmen Öngerilmeli Beton Kiriş Eğriliklerinin Öngerilmeli Beton Kirişinkine Oranlarının Kısmen Öngerilme Oranı ve Kirişlere Uygulanan Momente Göre Değişimlerinin Belirlenmesi

Bilindiği gibi yapıların kullanılabilir kalarak, dış yükleri göçmeye karşı belirli bir emniyetle taşınmaları gerekmektedir. Bu nedenle yapıların kullanılabilir kaldığını gösterebilmek için, bunların kullanım yükleri altında hesaplanan çatlak genişliği ve sehim gibi özelliklerinin yönetmeliklerde izin verilen sınırları geçmediğini göstermek zorunlu olmaktadır.

Yapıların sadece göçmeye karşı emniyetli olmaları yeterli olsaydı yapıyı oluşturan eleman boyutlarının önemli derecede küçültülmesi mümkün olabilecekti. Günümüzde yapılarda kullanılan beton ve donatı malzemelerinin kalitesi geçmişe göre daha yüksek olduğundan ve hesaplarda emniyet gerilmeleri yöntemi yerine taşıma gücü yöntemi

kullanıldığından elemanlar daha narin olmakta, dolayısıyla da yapıda kullanılan malzeme miktarı azalmaktadır. Böyle bir gelişmeden beklenen ekonomik kazanç ihmal edilemeyecek kadar büyük olmakla beraber bunun elde edilebilmesinin, narinleşen elemanlarda transformasyonlar büyüterek yapının kullanılır kalma ihtimalini azaltacağından, ancak transformasyonların, özellikle bunlardan şekildeğiştirmelerin, sınırlandırılmasıyla mümkün olacağı açıktır. Şekildeğiştirmelerin sınırlandırılması ise ortaya yeni bir problem koymaktadır. Zira beton bir elemanın rijitliği kesit boyutlarıyla, özellikle de çatlamış olması durumunda, çekme bölgesindeki donatı oranıyla çok büyük ölçüde değişmektedir (Şekil 2.71).



Şekil 2.71. Betonarme kiriş sehimlerinin karşılaştırılması [128].

Bu başlık altında, bazı teorik hatırlatmalardan sonra, çalışmamıza konu olan kısmen öngerilmeli beton kiriş eğriliklerinin öngerilmeli beton kirişinkine oranlarının kısmen öngerilme oranı (PPR) ve kirişlere uygulanan momente göre değişimleri dolayısıyla da rijitliklerinin incelenmesi ve böylece, adaptasyon özeliğini tamamen kaybettirmemek koşuluyla, optimum öngerilme oranının belirlenmesi üzerinde durulmaktadır.

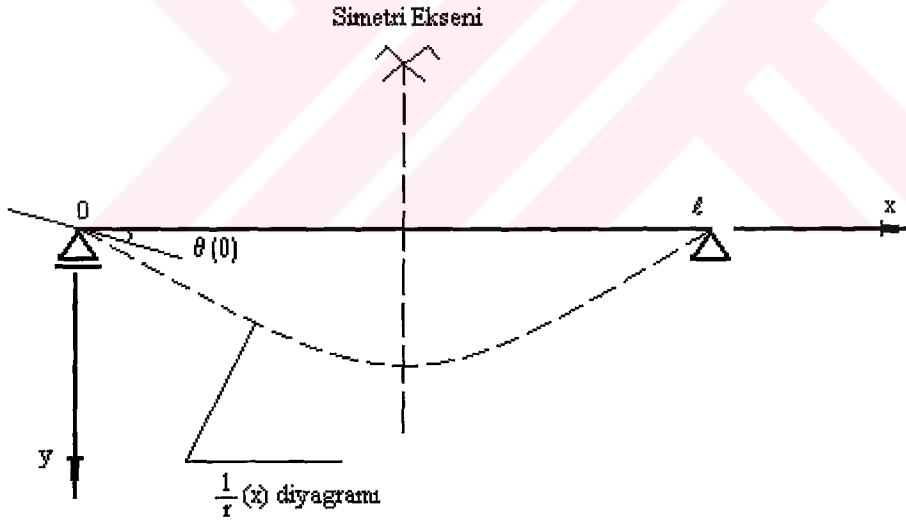
### 2.2.2.12.1. Teorik Hatırlatmalar

#### a) Çatlamamış kirişlerin eğriliği

Yapı mekaniğinden bilindiğine göre, sabit kesitli simetrik yüklü basit bir kirişin (Şekil 2.72) eğriliği:  $(1/r)$ ,  $(1/r_0)$  ilk eğriliği,  $\varepsilon_c$  üst lifteki kısalmayı,  $\varepsilon_{ct}$  alt lifteki uzamayı,  $h$  kiriş yüksekliğini,  $M$  uygulanan eğilme momentini,  $E_c$  uç lifler üzerinde ulaşılan gerilmelere karşılık gelen sekant modülünü ve  $I$  betonarme kesitin eylemsizlik momentini göstermek üzere;

$$\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_{ct}}{h} = \frac{M}{E_c I} \quad (2.67)$$

şeklinde ifade edilmektedir.



Şekil 2.72. Basit bir kirişte eğrilik diyagramı [111].

#### b) Çatlamış kirişlerin eğriliği

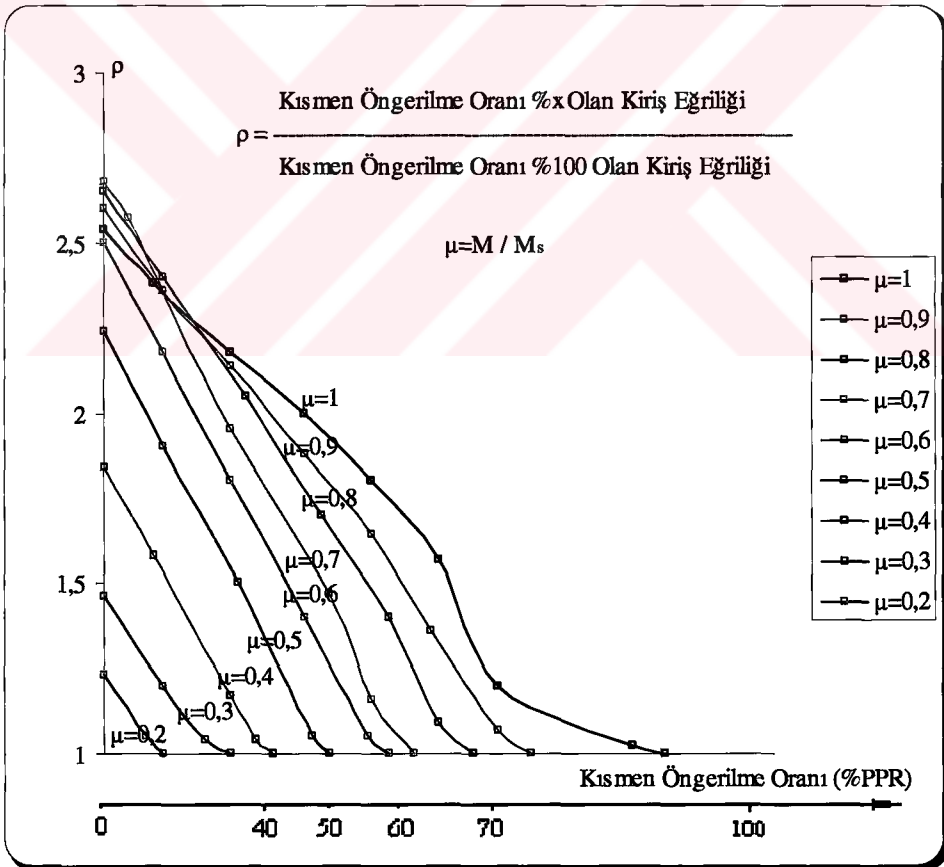
Çatlamış kirişlerin eğriliği çatlaklar arasındaki bölgede önemli derecede artmaktadır [129]. Bu bakımdan ortalama eğrilik elde etmek için yükleme esnasında düzlem kalan kesitlerin rölatif dönmelerini belirlemek uygun olmaktadır. Bu da bizzat çatlamış kesit ve iki çatlak arasında kalan bölgedeki kesitin dönmelerinin belirlenmesini gerektirmektedir.

Bu konuda daha ayrıntılı bilgi için Kaynak [111]' e başvurulabilir. Buna göre ortalama eğrilik ( $1/r_m$ ),  $\epsilon_{sm}$  ve  $\epsilon_{cm}$  sırasıyla söz konusu iki düzlem arasında donatıda ve üst beton lifteki şekildeğişimleri ve  $I_{cr}$  çatlama kesitin eylemsizlik momentini göstermek üzere;

$$\frac{1}{r_m} = \frac{\epsilon_{sm} + \epsilon_{cm}}{h} = \frac{M}{E_c I_{cr}} \quad (2.68)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Buna göre çalışmamıza konu olan kısmen öngerilmeli yüksek başarımlı beton kiriş eğriliklerinin öngerilmeli yüksek başarımlı beton kirişinkine oranının kısmen öngerilme oranı (PPR) ve kirişlere uygulanan momente göre değişimleri aşağıdaki Şekil 2.73' de verilmektedir.



Şekil 2.73. Kısmen öngerilmeli yüksek başarımlı beton kiriş eğriliklerinin öngerilmeli yüksek başarımlı beton kirişinkine oranının kısmen öngerilme oranı ve kirişlere uygulanan momente göre değişimleri

Burada bu şeklin öngerilmeli beton kirişlerin eğrilikleri hesaplanınca (kısmen öngerilmeli kirişlere göre bu hesabı yapmak daha kolaydır) kısmen öngerilmeli beton kirişlerin eğriliklerinin hesaplanmasında abak olarak kullanılabilir yararlı bir şekil olduğunu belirtmek uygun olmaktadır.

### 2.2.2.13. Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kirişlerin Denetim Deneyleri

Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerin üretiminde kullanılan yüksek başarılı ve geleneksel betonların mekanik özellikleri yönünden yeniden üretilebilirliklerini denetlemek amacıyla her bir karışımdan alınan standart silindirik numuneler üzerinde merkezi basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Buna göre üretilen yüksek başarılı ve geleneksel betonların ortalama merkezi basınç dayanımları Çizelge 2.42’de verilmektedir.

Çizelge 2.42. Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton deney kirişlerinin üretiminde kullanılan yüksek başarılı ve geleneksel betonların ortalama merkezi basınç dayanımları

Kiriş Kod ve Tipleri	Ortalama Merkezi Basınç Dayanımları (MPa)	
	Yüksek Başarılı Betonlarda	Geleneksel Betonlarda
KÖYB110 (B)	65	-
KÖYB18 (C)	64	-
KÖYB210 (D)	65	-
KÖYB28 (E)	63	-
KÖG18 (C)	-	35
ÖYB2 (F)	66	-
ÖG2 (F)	-	36

Bu çizelgeden, beton gibi heterojen dolayısıyla da özellikleri dağılım gösteren bir malzeme için denetim numunelerinden elde edilen, yüksek başarılı ve geleneksel betonların ortalama merkezi basınç dayanımları arasındaki farkın büyük olmadığı, dolayısıyla da betonların yeniden üretilebilirliğinin yeterli düzeyde olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum bu betonlarla üretilen kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerin davranışlarının karşılaştırılmasına imkan tanımaktadır.

### 2.2.2.14. Onuncu Seri Kısmen Öngerilmeli Yüksek Başarımlı ve Geleneksel Beton Deney Kirişleri

Daha önce de belirtilmeye çalışıldığı gibi, çalışmalarımızda dikkate alınan kısmen öngerilme oranı tanımlamasına bağlı kalmakla birlikte bu kez Kaynak [117]' deki kısmen öngerilmenin tanımına uygun olarak aktif donatılar kapasitelerinin belirli oranlarında (%30, %50 ve %60) çekilmesinin kiriş davranışlarına etkilerinin incelenmesi de amaçlanmıştır.

Bu amaçla Çizelge 2.22' de verilen B, C, D ve E kirişlerinin tam kapasiteyle çekilmeyen aktif ve pasif donatılarıyla üretilen B', C', D' ve E' sembolleriyle gösterilen kısmen öngerilmeli yüksek başarımlı ve geleneksel beton kirişlerin salt eğilmedeki davranışları B, C, D ve E kirişlerinkiyile karşılaştırmalı olarak incelenmektedir. Bu kirişlerin pasif ve aktif donatı miktar ve oranları, tam kapasite öngerilme kuvvetinin oranları, uygulanan öngerilme kuvvetleri ve kısmen öngerilme oranları Çizelge 2.43' de verilmektedir.

Çizelge 2.43. Aktif donatıları tam kapasiteyle çekilmeyen kısmen öngerilmeli yüksek başarımlı ve geleneksel beton kirişlerin bazı özellikleri

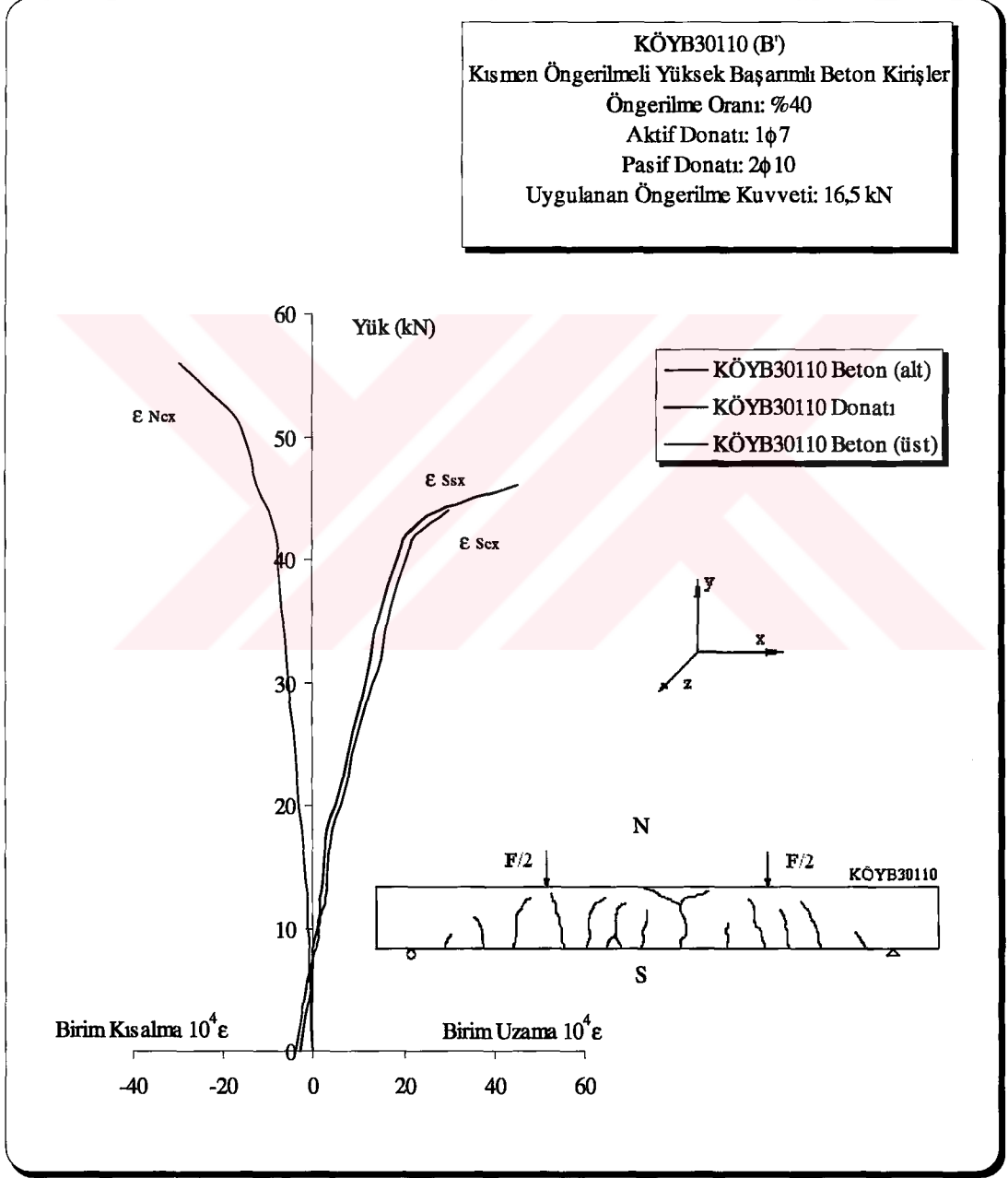
Kiriş Kod ve Tipleri	Pasif Donatı	Aktif Donatı	Pasif Donatı Oranı $\rho_s$	Aktif Donatı Oranı $\rho_p$	Öngerilme Kuvveti Yüzdesi (%P)	Uygulanan Öngerilme Kuvveti (kN)	Kısmen Öngerilme Oranı (%PPR)
KÖYB30110(B')	2 Ø 10	1Ø7	0,0079	0,0019	30	16,5	40
KÖYB50110(B')	2 Ø 10	1Ø7	0,0079	0,0019	50	27,5	40
KÖYB60110(B')	2 Ø 10	1Ø7	0,0079	0,0019	60	33,0	40
KÖYB3018 (C')	2 Ø 8	1Ø7	0,0050	0,0019	30	16,5	50
KÖYB5018 (C')	2 Ø 8	1Ø7	0,0050	0,0019	50	27,5	50
KÖYB6018 (C')	2 Ø 8	1Ø7	0,0050	0,0019	60	33,0	50
KÖG3018 (C')	2 Ø 8	1Ø7	0,0050	0,0019	30	16,5	50
KÖG5018 (C')	2 Ø 8	1Ø7	0,0050	0,0019	50	27,5	50
KÖG6018 (C')	2 Ø 8	1Ø7	0,0050	0,0019	60	33,0	50
KÖYB30210(D')	2 Ø 10	2Ø7	0,0079	0,0038	30	16,5	60
KÖYB50210(D')	2 Ø 10	2Ø7	0,0079	0,0038	50	27,5	60
KÖYB60210(D')	2 Ø 10	2Ø7	0,0079	0,0038	60	33,0	60
KÖYB3028 (E')	2 Ø 8	2Ø7	0,0050	0,0038	30	16,5	70
KÖYB5028 (E')	2 Ø 8	2Ø7	0,0050	0,0038	50	27,5	70
KÖYB6028 (E')	2 Ø 8	2Ø7	0,0050	0,0038	60	33,0	70

Notlar:

- 1) KÖYBabc; Kısmen Öngerilmeli Yüksek Başarımlı Beton Kiriş,
  - 2) KÖGabc; Kısmen Öngerilmeli Geleneksel Beton Kiriş
- a: Öngerilme kuvveti yüzdesi (%) 30,50,60  
b: Aktif donatı adedi 1Ø7, 2Ø7 , 1 ve 2 şeklinde kodlanmıştır,  
c: Pasif donatı çapı Ø8, Ø10, 8 ve 10 şeklinde kodlanmıştır.

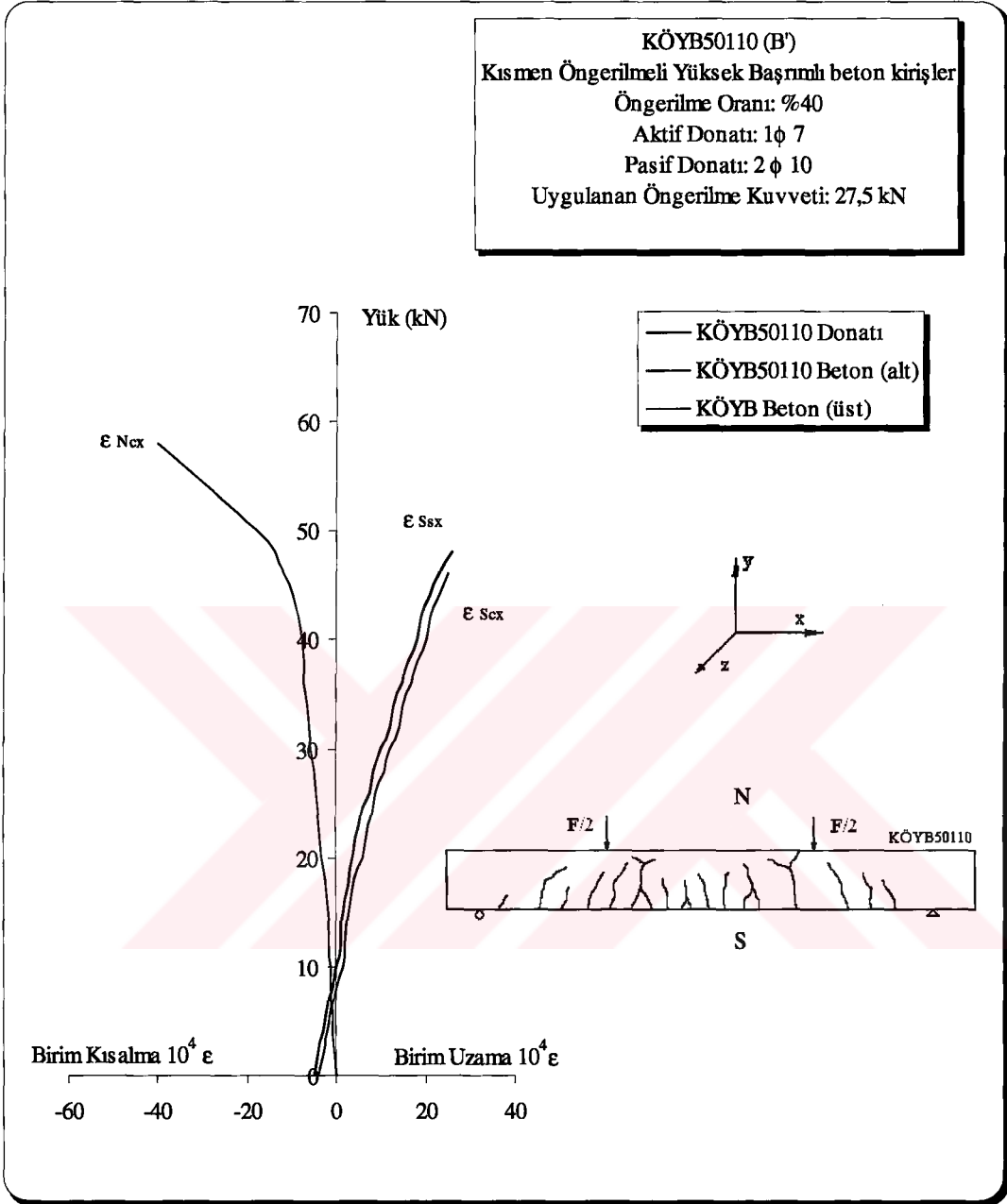
### 2.2.2.14.1. Onuncu Seri Kısmen Öngerilmeli Yüksek Başarımlı ve Geleneksel Beton Deneysel Kirişlerine İlişkin Yük-Şekildeğiştirme ve Yük-Sehim Diyagramları

Bu kirişlerin salt eğilme etkisi altında deneysel davranışlarından elde edilen yük-şekildeğiştirme diyagramları Şekil 2.74' den Şekil 2.88' e kadar, yük-sehim diyagramları ise Şekil 2.89' dan Şekil 2.93' e kadar verilmektedir.

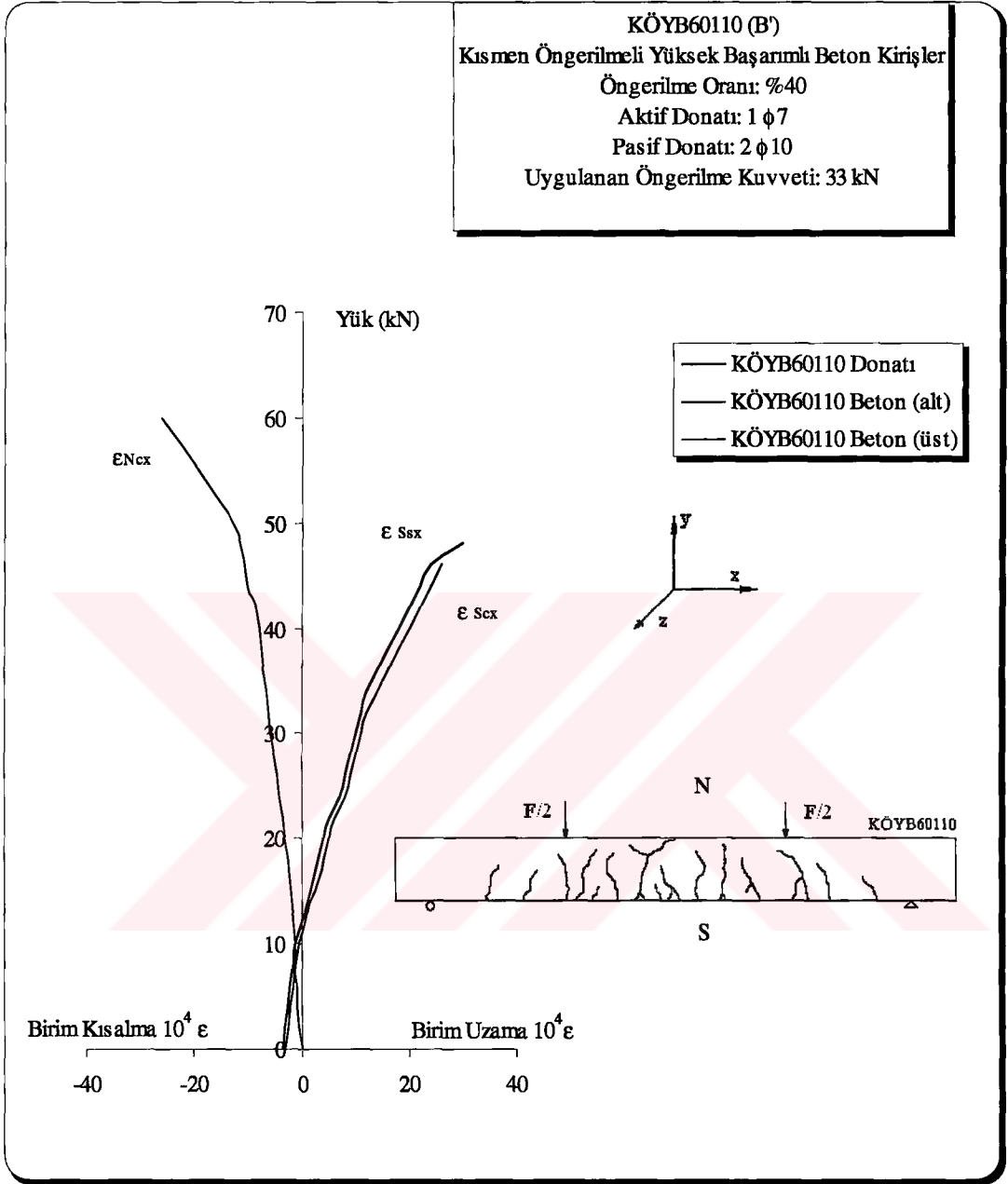


Şekil 2.74. Öngerilme oranı %40 ve aktif donatı kapasitenin %30' u oranında çekilmiş B' tipi kısmen öngerilmeli, 1 $\phi$ 7 aktif ve 2 $\phi$ 10 pasif donatıya sahip, yüksek başarımlı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB30110 (B')]

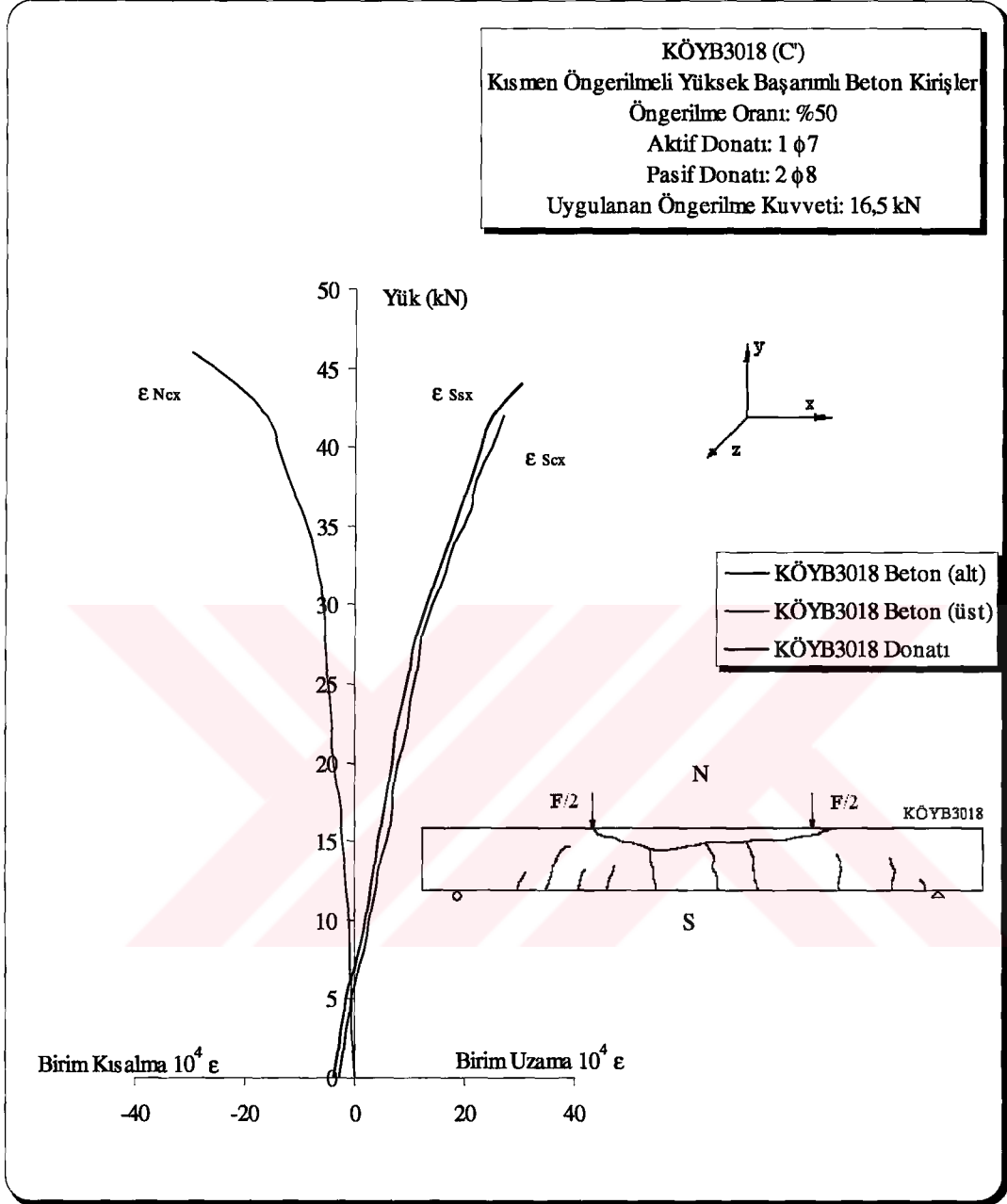




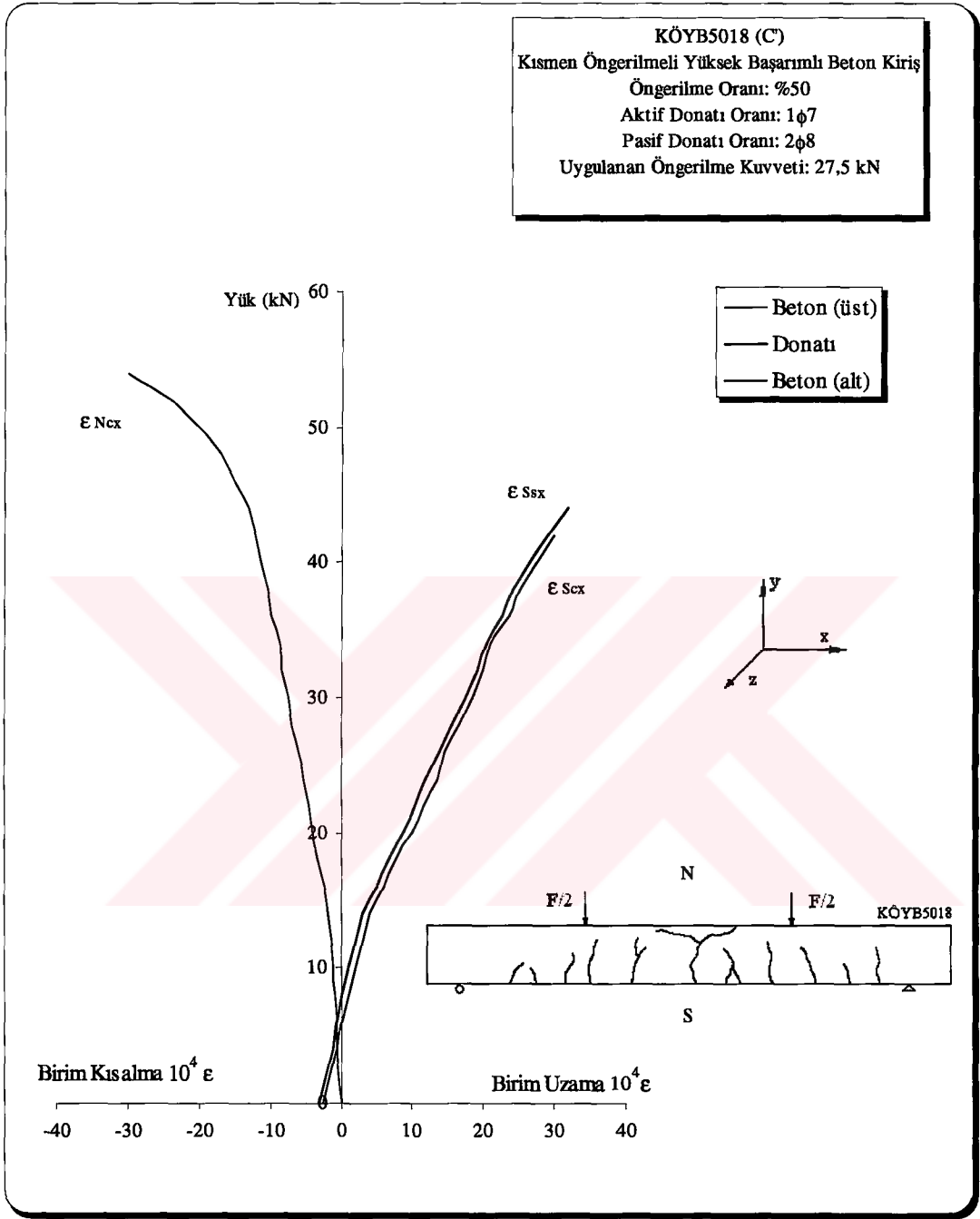
Şekil 2.75. Öngerilme oranı %40 ve aktif donatı kapasitesinin %50'si oranında çekilmiş B' tipi kısmen öngerilmeli, 1 $\phi$ 7 aktif ve 2 $\phi$ 10 pasif donatıya sahip, yüksek başarımli beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB50110 (B')]



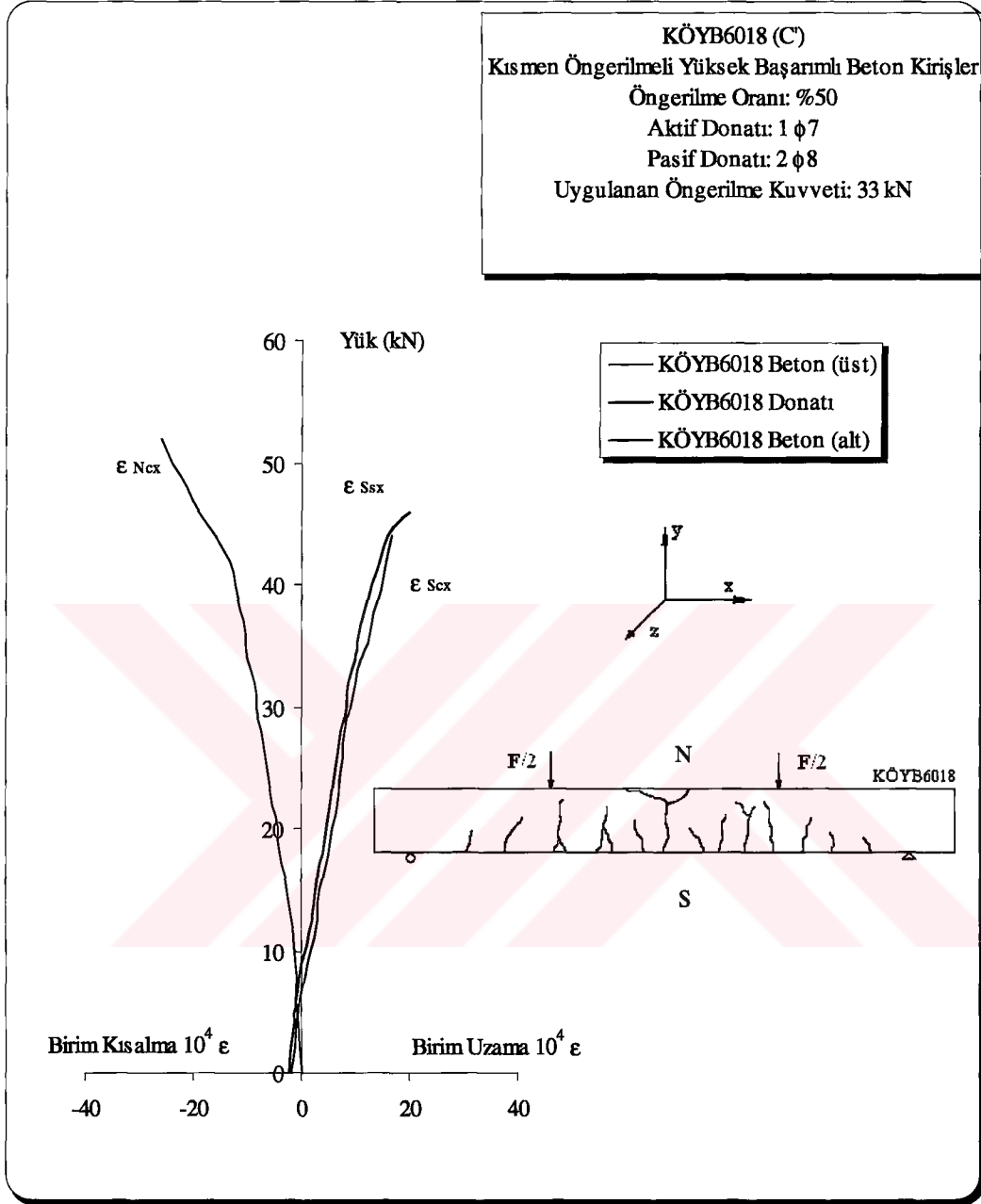
Şekil 2.76. Öngerilme oranı %40 ve aktif donatı kapasitesinin %60'ı oranında çekilmiş B' tipi kısmen öngerilmeli, 1 $\phi$ 7 aktif ve 2 $\phi$ 10 pasif donatıya sahip, yüksek başarımli beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB60110 (B')]



Şekil 2.77. Öngerilme oranı %50 ve aktif donatı kapasitesinin %30'u oranında çekilmiş C' tipi kısmen öngerilmeli, 1 $\phi$ 7 aktif ve 2 $\phi$ 8 pasif donatıya sahip, yüksek başarımli beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB3018 (C')]



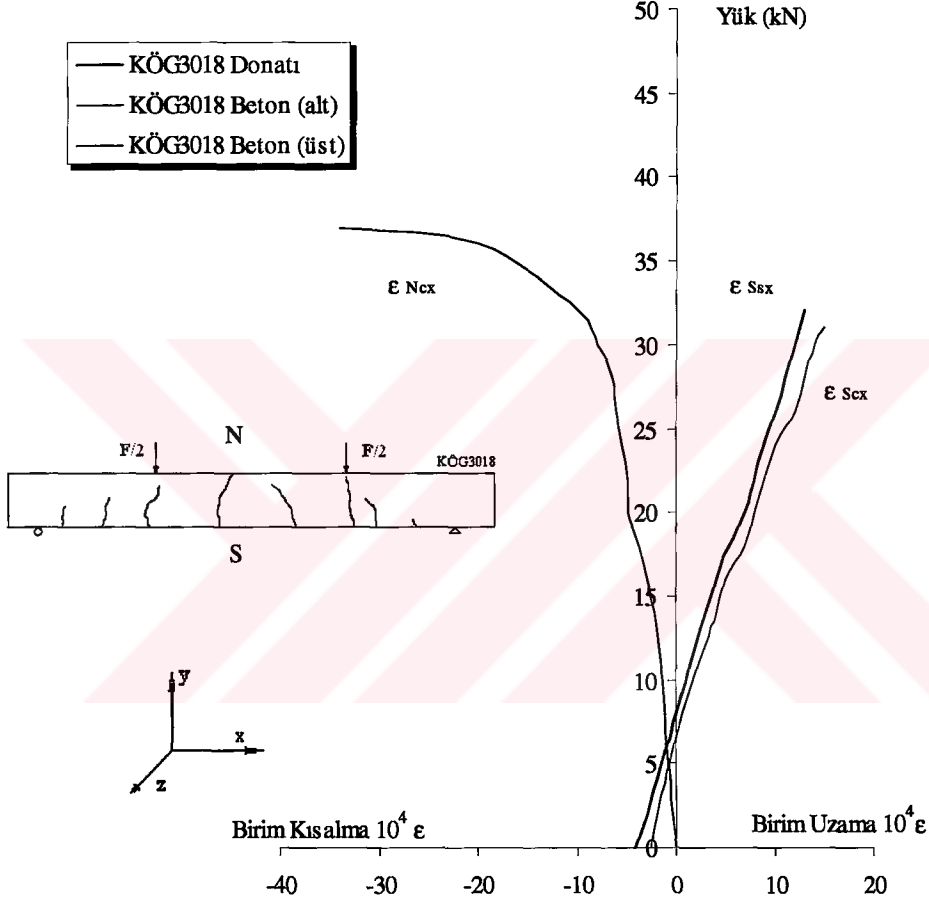
Şekil 2.78. Öngerilme oranı %50 ve aktif donatı kapasitesinin %50'si oranında çekilmiş C' tipi kısmen öngerilmeli, 1Ø7 aktif ve 2Ø8 pasif donatıya sahip, yüksek başarımli beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB5018 (C')]



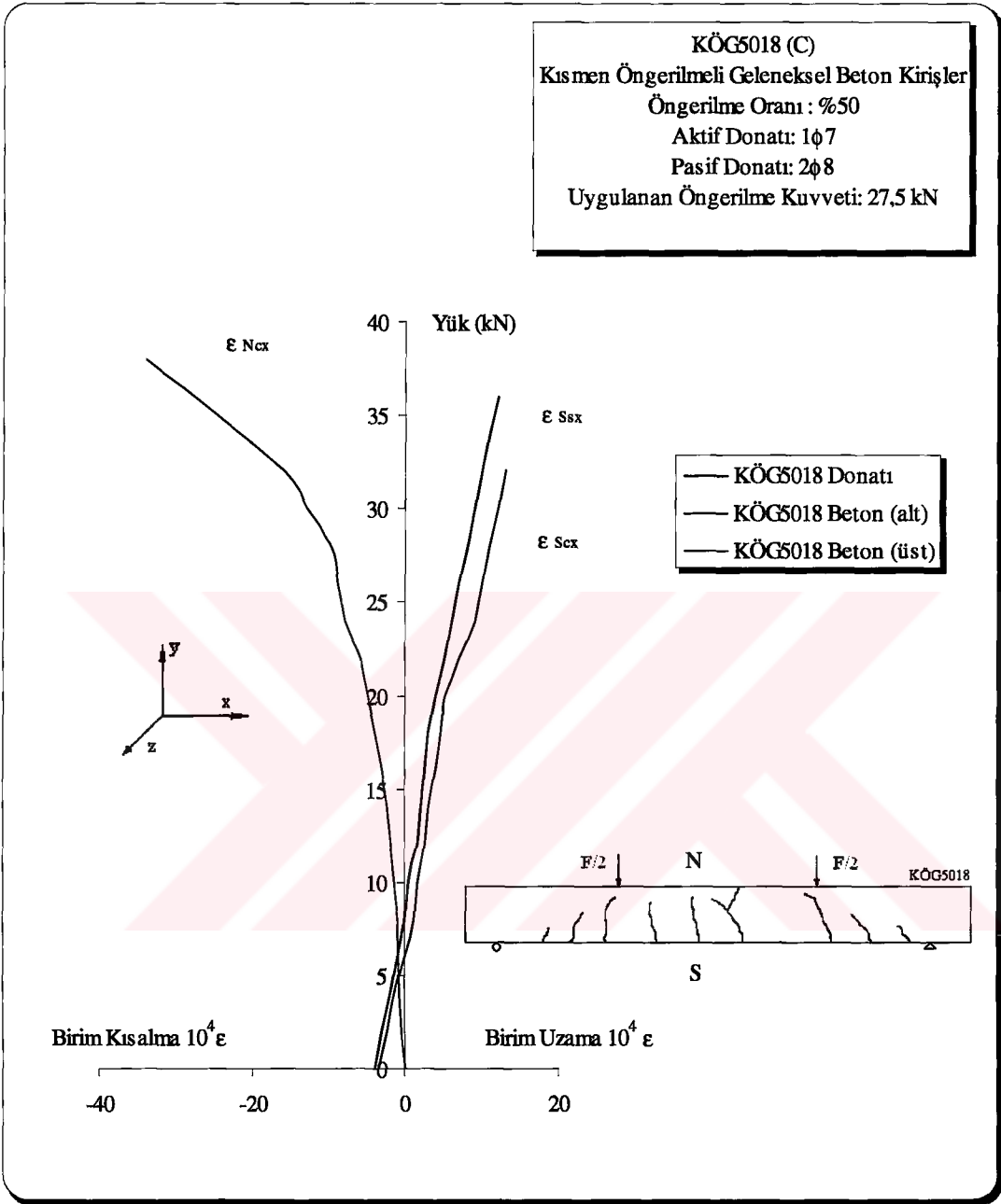
Şekil 2.79. Öngerilme oranı %50 ve aktif donatı kapasitesinin %60'ında çekilmiş C' tipi kısmen öngerilmeli, 1 $\phi 7$  aktif ve 2 $\phi 8$  pasif donatıya sahip, yüksek başarımli beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB6018 (C')]

KÖG3018 (C)  
 Kısmen Öngerilmeli Geleneksel Beton Kirişler  
 Öngerilme Oranı : %50  
 Aktif Donatı: 1 $\phi$ 7  
 Pasif Donatı: 2 $\phi$ 8  
 Uygulanan Öngerilme Kuvveti: 16,5 kN

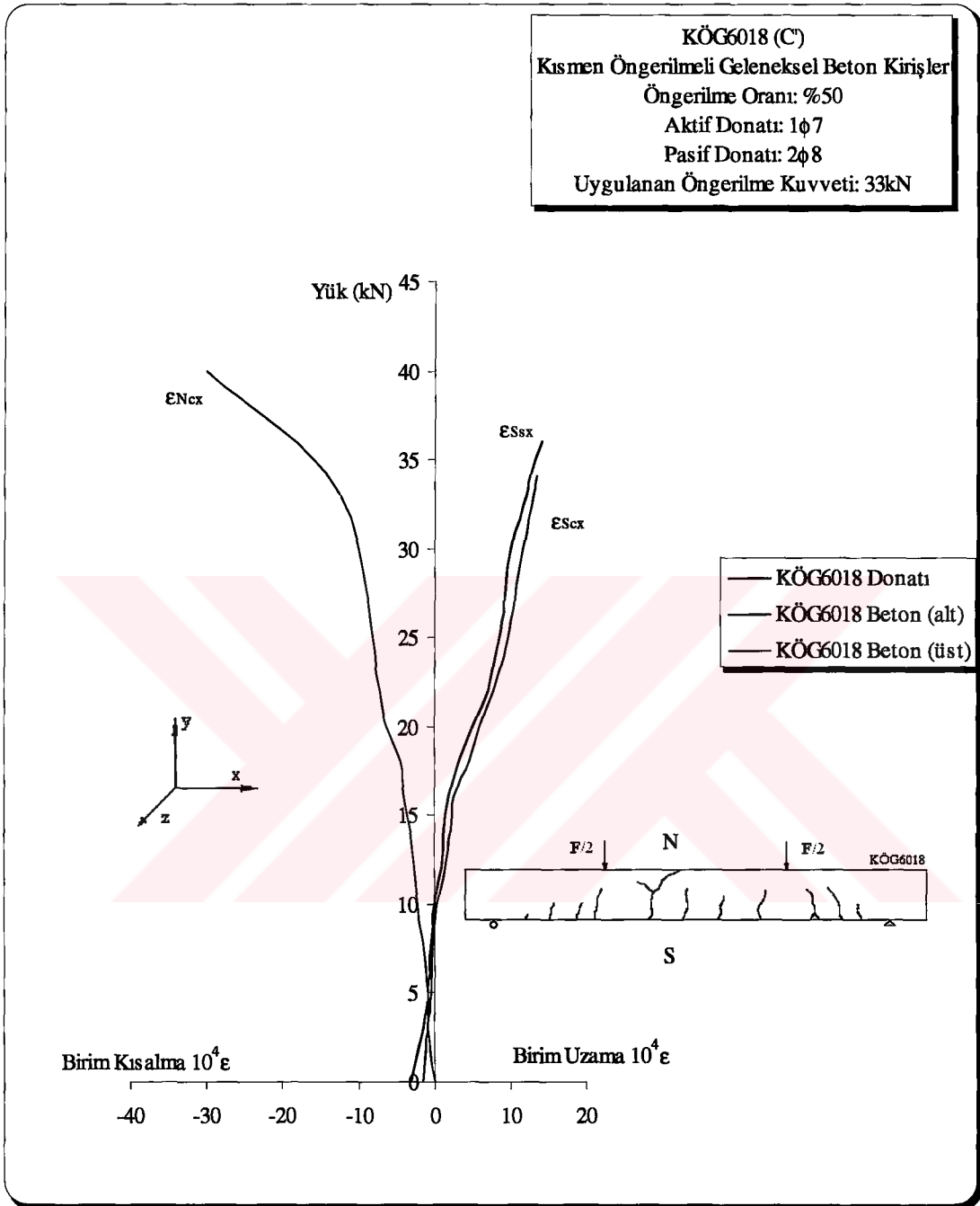
— KÖG3018 Donatı  
 — KÖG3018 Beton (alt)  
 — KÖG3018 Beton (üst)



Şekil 2.80. Öngerilme oranı %50 ve aktif donatı kapasitesinin %30'u oranında çekilmiş C' tipi kısmen öngerilmeli, 1 $\phi$ 7 aktif ve 2 $\phi$ 8 pasif donatıya sahip, geleneksel beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı  
 [KÖG3018 (C')]

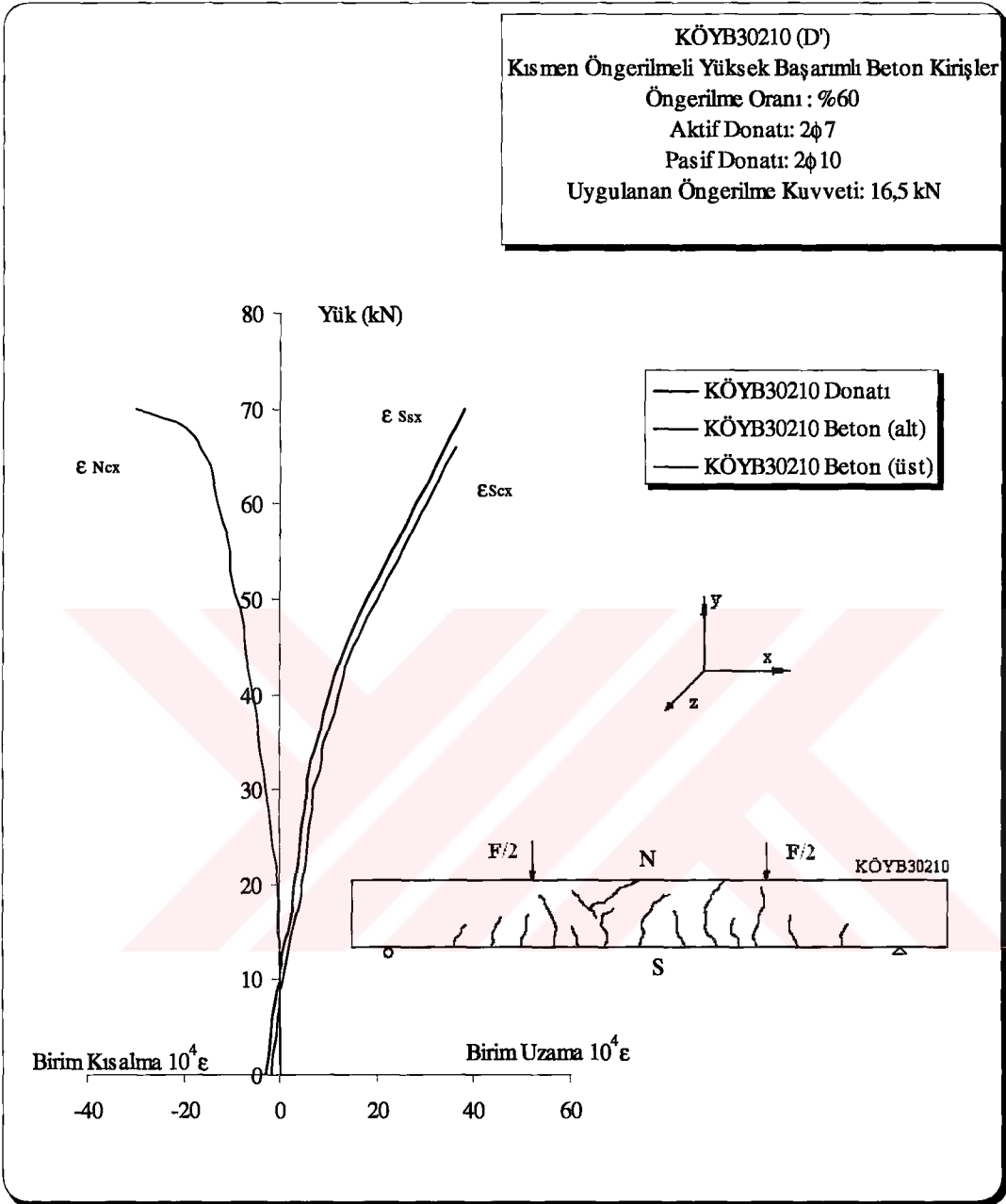


Şekil 2.81. Öngerilme oranı %50 ve aktif donatı kapasitesinin %50'si oranında çekilmiş C' tipi kısmen öngerilmeli, 1 $\phi$ 7 aktif ve 2 $\phi$ 8 pasif donatıya sahip, geleneksel beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖG5018 (C')]

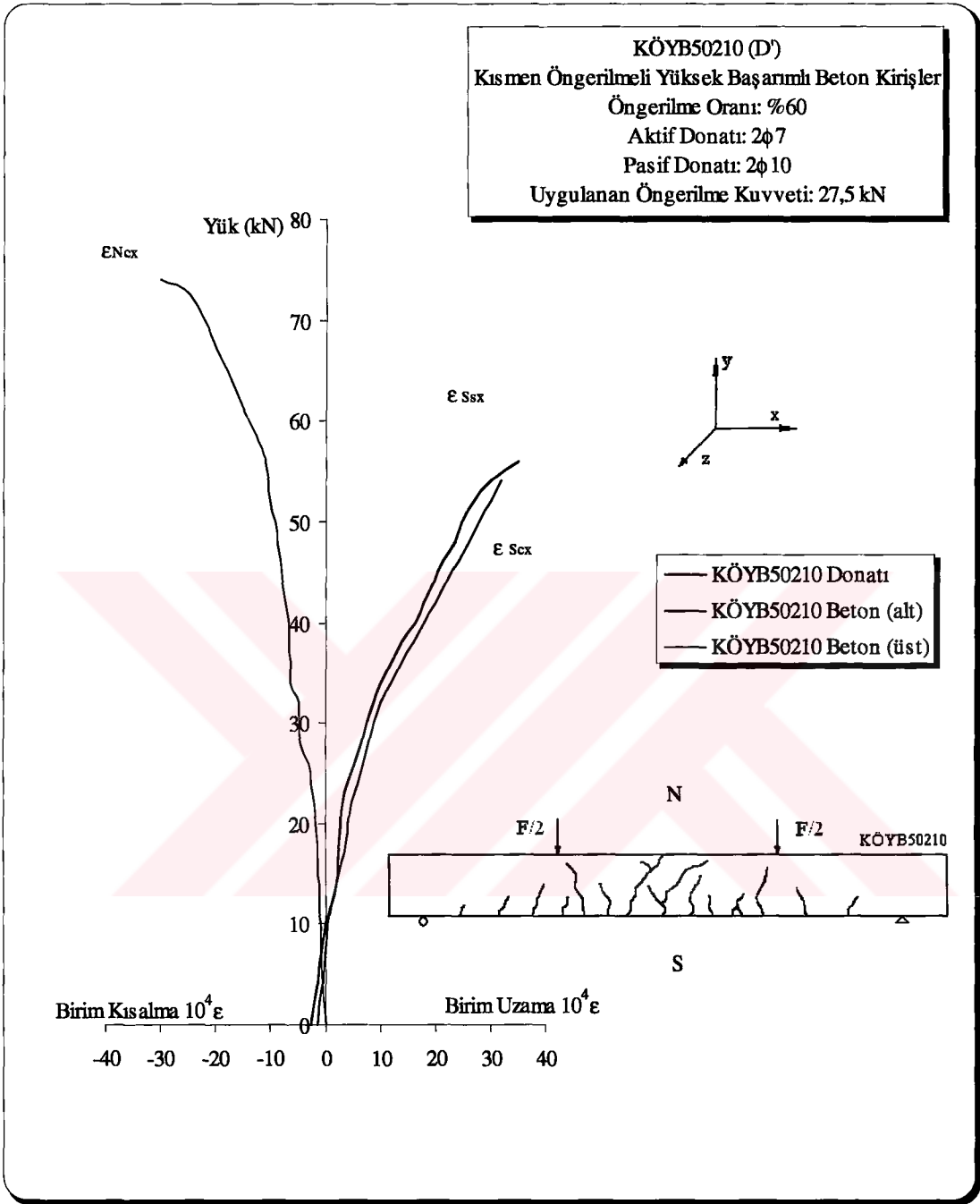


Şekil 2.82. Öngerilme oranı %50 ve aktif donatı kapasitesinin %60'ı oranında çekilmiş C' tipi kısmen öngerilmeli, 1 $\phi$ 7 aktif ve 2 $\phi$ 8 pasif donatıya sahip, geleneksel beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı  
[KÖG6018 (C')]

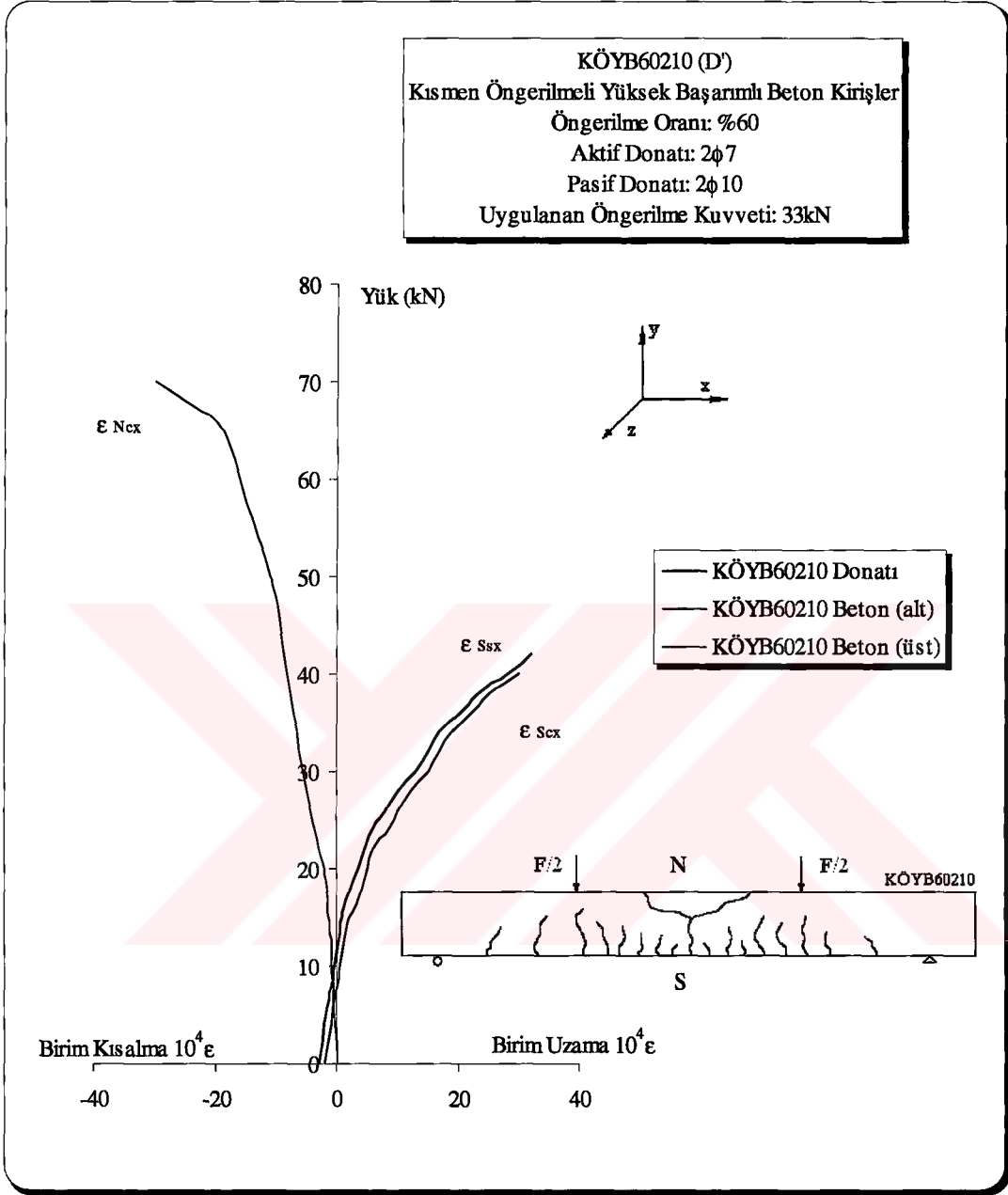




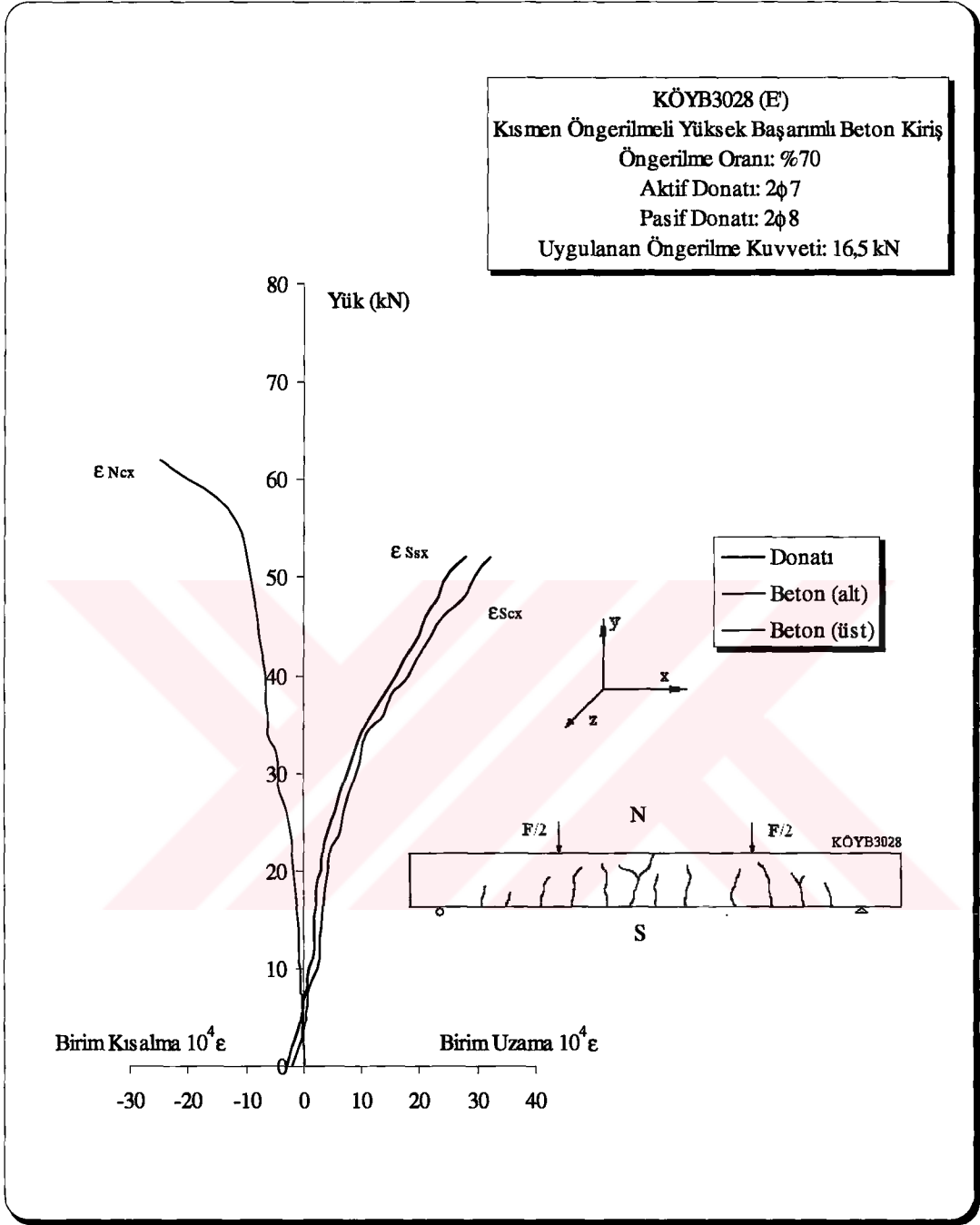
Şekil 2.83. Öngerilme oranı %60 ve aktif donatı kapasitesinin %30'u oranında çekilmiş D' tipi kısmen öngerilmeli, 2 $\phi$ 7 aktif ve 2 $\phi$ 10 pasif donatıya sahip, yüksek başarımlı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB30210 (D')]



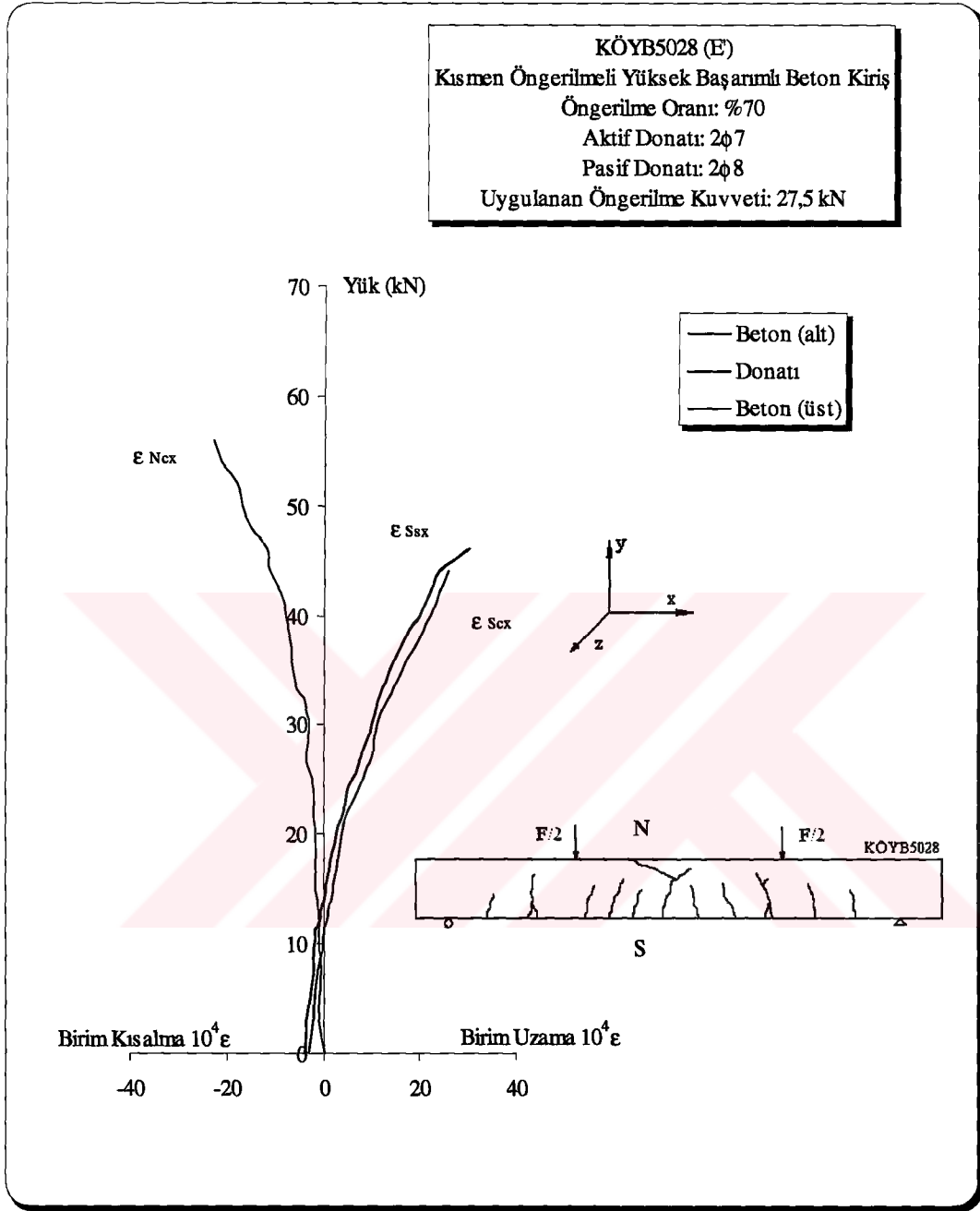
Şekil 2.84. Öngerilme oranı %60 ve aktif donatı kapasitesinin %50'si oranında çekilmiş D' tipi kısmen öngerilmeli, 2 $\phi$ 7 aktif ve 2 $\phi$ 10 pasif donatıya sahip, yüksek başarımlı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB50210 (D')]



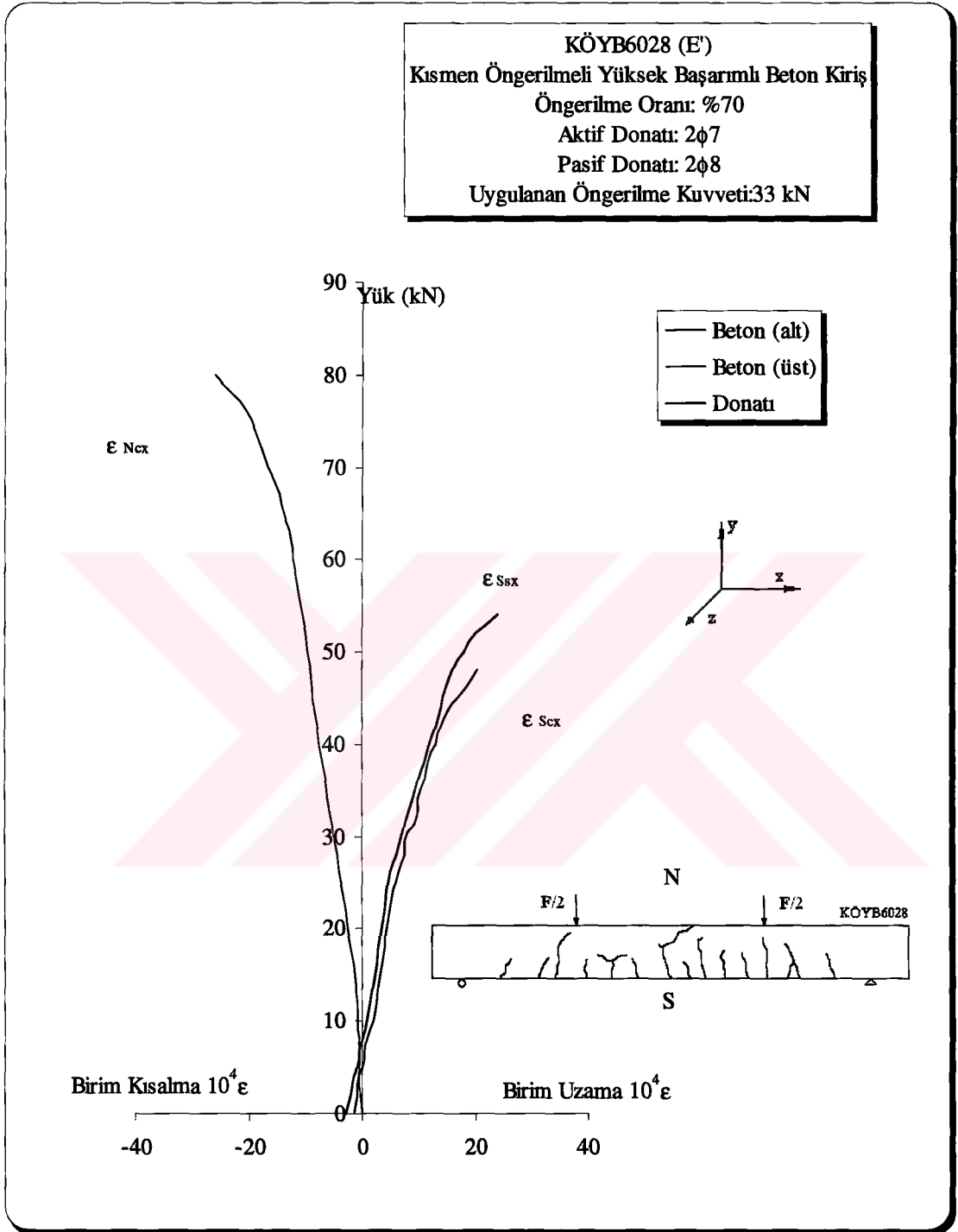
Şekil 2.85. Öngerilme oranı %60 ve aktif donatı kapasitesinin %60'ı oranında çekilmiş D' tipi kısmen öngerilmeli, 2Ø7 aktif ve 2Ø10 pasif donatıya sahip, yüksek başarımli beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB60210 (D')]



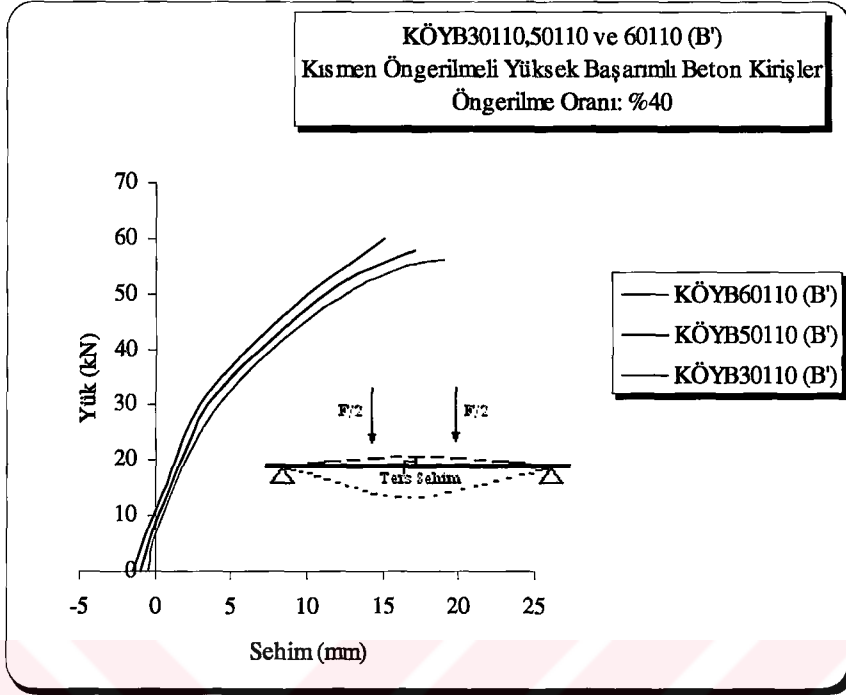
Şekil 2.86. Öngerilme oranı %70 ve aktif donatı kapasitesinin %30'u oranında çekilmiş E' tipi kısmen öngerilmeli, 2 $\phi$ 7 aktif ve 2 $\phi$ 8 pasif donatıya sahip, yüksek başarımli beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB3028 (E')]



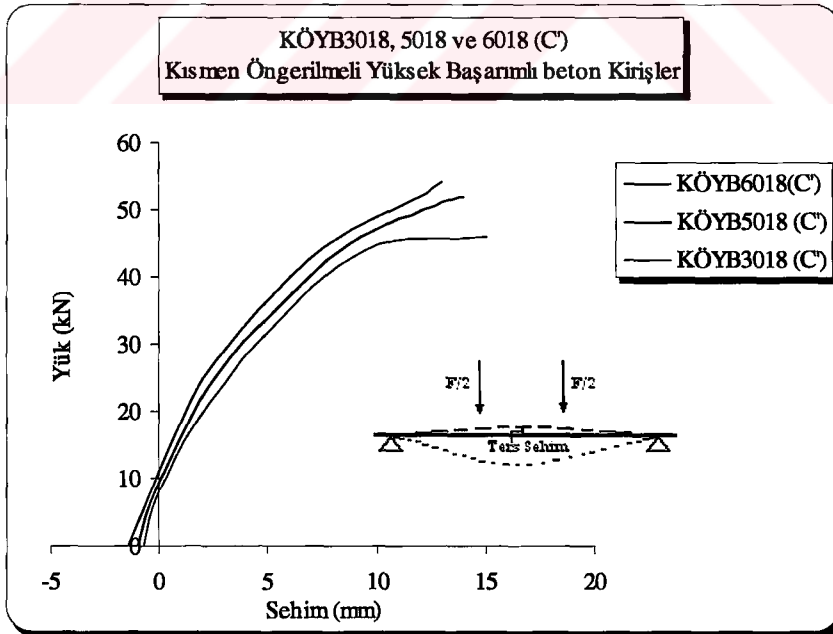
Şekil 2.87. Öngerilme oranı %70 ve aktif donatı kapasitesinin %50'si oranında çekilmiş E' tipi kısmen öngerilmeli, 2 $\phi$ 7 aktif ve 2 $\phi$ 8 pasif donatıya sahip, yüksek başarılı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB5028 (E')]



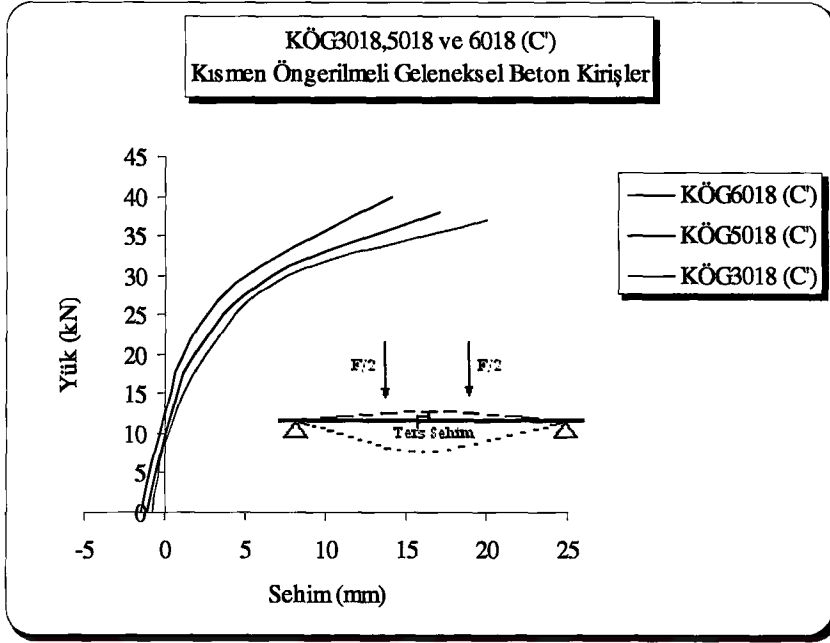
Şekil 2.88. Öngerilme oranı %70 ve aktif donatı kapasitesinin %60'ı oranında çekilmiş E' tipi kısmen öngerilmeli, 2 $\phi$ 7 aktif ve 2 $\phi$ 8 pasif donatıya sahip, yüksek başarımlı beton kirişlere ilişkin tipik yük-şekildeğiştirme diyagramı [KÖYB6028 (E')]



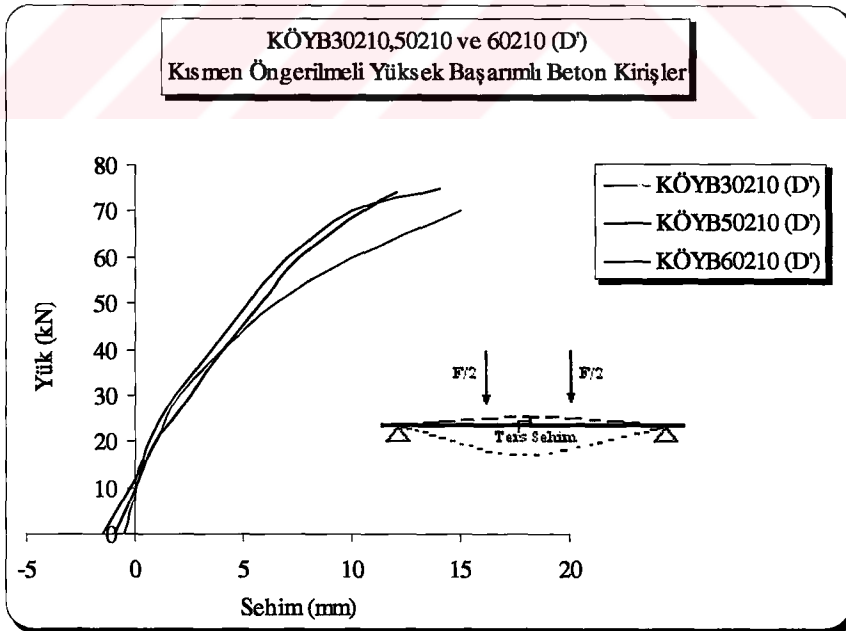
Şekil 2.89. Öngerilme oranı %40 olan ve aktif donatıları kapasitelerinin çeşitli oranlarında çekilmiş B' tipi kısmen öngerilmeli, 1Ø7 aktif ve 2Ø10 pasif donatıya sahip, yüksek başarımlı beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları



Şekil 2.90. Öngerilme oranı %50 olan ve aktif donatıları kapasitelerinin çeşitli oranlarında çekilmiş C' tipi kısmen öngerilmeli, 1Ø7 aktif ve 2Ø8 pasif donatıya sahip, yüksek başarımlı beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları

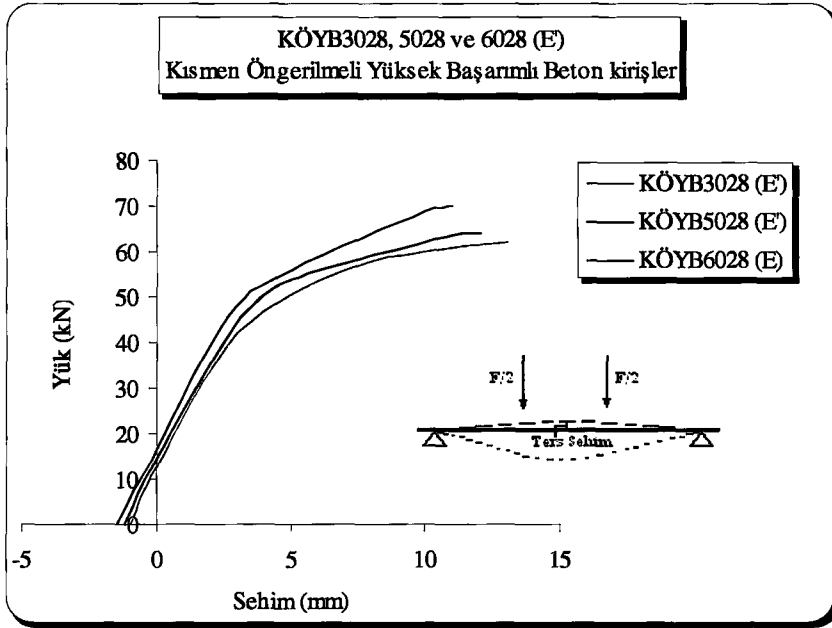


Şekil 2.91. Öngerilme oranı %50 olan ve aktif donatıları kapasitelerinin çeşitli oranlarında çekilmiş C' tipi kısmen öngerilmeli, 1Ø7 aktif ve 2Ø8 pasif donatıya sahip, geleneksel beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları



Şekil 2.92. Öngerilme oranı %60 olan ve aktif donatıları kapasitelerinin çeşitli oranlarında çekilmiş D' tipi kısmen öngerilmeli, 2Ø7 aktif ve 2Ø10 pasif donatıya sahip, yüksek başarımlı beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları





Şekil 2.93. Öngerilme oranı %70 olan ve aktif donatıları kapasitelerinin çeşitli oranlarında çekilmiş E' tipi kısmen öngerilmeli, 2Ø7 aktif ve 2Ø8 pasif donatıya sahip, yüksek başarımlı beton kirişlere ilişkin yük-sehim diyagramları

Yukarıda verilen deneysel yük-şekildeğiştirme ve yük-sehim diyagramları yardımıyla belirlenen kırılma yükleri, kırılma momentleri ve bunlara karşılık gelen sehimler Çizelge 2.44' de verilmektedir.

#### 2.2.2.14.2. Onuncu Seri Kısmen Öngerilmeli Yüksek Başarımlı ve Geleneksel Beton Deney Kirişlerinin Kırılma ve Kullanım Momentleri

Onuncu seri kısmen öngerilmeli beton kirişlerin deneysel olarak ve hesap yoluyla belirlenen kırılma ve kullanım momentleri Çizelge 2.45' de verilmektedir.

##### 2.2.2.14.2.1. Onuncu Seri Kısmen Öngerilmeli Yüksek Başarımlı ve Geleneksel Beton Kirişlerin Deneysel Emniyet Katsayıları

Onuncu seri kısmen öngerilmeli yüksek başarımlı ve geleneksel beton deney kirişlerinin Çizelge 2.45 yardımıyla belirlenen deneysel emniyet katsayıları Çizelge 2.46' da verilmektedir.

### 2.2.2.14.3. Onuncu Seri Kısmen Öngerilmeli Yüksek Başarımlı ve Geleneksel Beton Deney Kirişlerinin Çatlama Durumlarının İncelenmesi

Bu serideki kısmen öngerilmeli yüksek başarımlı ve geleneksel beton deney kirişlerinin kırılma anında momentin sabit olduğu bölgede belirlenen çatlak sayıları, ortalama çatlak mesafeleri ve çatlak genişlikleri Çizelge 2.47' de, kirişlerin kırılma yükü altında ön yüzlerinin şematik çatlama durumu Şekil 2.94' den Şekil 2.98' e kadar, deneysel ve teorik ilk çatlama momentlerinin aktif ve pasif donatı oranlarıyla değişimi ise Çizelge 2.48' de verilmektedir.

### 2.2.2.14.4. Onuncu Seri Kısmen Öngerilmeli Yüksek Başarımlı ve Geleneksel Beton Kirişlerin Denetim Deneyleri

Bu serideki kısmen öngerilmeli beton kirişlerin üretiminde kullanılan yüksek başarımlı ve geleneksel betonların mekanik özellikleri yönünden yeniden üretilebilirliklerini denetlemek amacıyla her bir karışımdan alınan standart silindir numuneler üzerinde merkezi basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Buna göre üretilen yüksek başarımlı ve geleneksel betonların ortalama merkezi basınç dayanımları Çizelge 2.49' da verilmektedir.

Çizelge 2.44. Onuncu seri kısmen öngerilmeli yüksek başarımlı ve geleneksel beton deney kirişlerine ilişkin deneysel kırılma yükleri, kırılma momentleri ve bunlara karşılık gelen sehimler

Kiriş Kod ve Tipleri	Kırılma Yüğü (kN) ( $F_r$ )	Deneysel Kırılma Momenti (kNm)	Kırılma yükünün %75'i altındaki sehim (mm)
KÖYB30110 (B')	56	18,76	19,00
KÖYB50110 (B')	58	19,43	17,00
KÖYB60110 (B')	60	20,10	15,00
KÖYB3018 (C')	46	15,41	15,00
KÖYB5018 (C')	52	17,42	14,00
KÖYB6018 (C')	54	18,09	13,00
KÖG3018 (C')	37	12,40	20,00
KÖG5018 (C')	38	12,73	17,00
KÖG6018 (C')	40	13,40	14,00
KÖYB30210 (D')	70	23,45	15,00
KÖYB50210 (D')	74	24,79	12,00
KÖYB60210 (D')	75	25,13	14,00
KÖYB3028 (E')	62	20,77	13,00
KÖYB5028 (E')	64	21,44	12,00
KÖYB6028 (E')	70	23,45	11,00

Çizelge 2.45. Onuncu seri kısmen öngerilmeli yüksek başarımli ve geleneksel beton deney kirişlerinin kırılma ve kullanım momentleri

Kiriş Kod ve Tipleri	$M_{re}$ (kNm)	$M_{rt}$ (kNm)	$M_{rm}$ (kNm)	$M_{rk}$ (kNm)	$M_{rd}$ (kNm)	$M_s$ (kNm)
KÖYB30110(B')	18,76	17,05	16,53	15,40	14,01	9,34
KÖYB50110(B')	19,43	17,80				
KÖYB60110(B')	20,10	18,20				
KÖYB3018 (C')	15,41	14,40	13,24	12,19	11,24	7,49
KÖYB5018 (C')	17,42	15,55				
KÖYB6018 (C')	18,09	16,05				
KÖG3018 (C')	12,40	10,50	11,47	10,43	9,38	6,25
KÖG5018 (C')	12,73	10,65				
KÖG6018 (C')	13,40	12,10				
KÖYB30210(D')	23,45	20,75	20,30	18,20	17,16	11,44
KÖYB50210(D')	24,79	22,14				
KÖYB60210(D')	25,13	23,70				
KÖYB3028 (E')	20,77	17,75	17,30	16,10	15,27	10,20
KÖYB5028 (E')	21,44	18,48				
KÖYB6028 (E')	23,45	21,50				

Çizelge 2.46. Onuncu seri kısmen öngerilmeli yüksek başarımli ve geleneksel beton deney kirişlerinin deneysel emniyet katsayıları

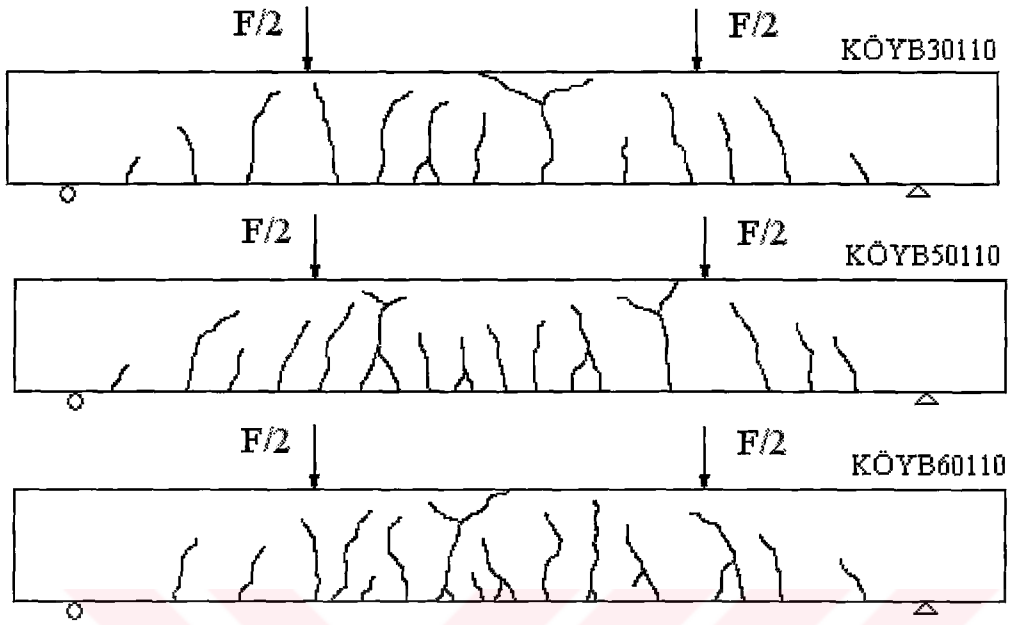
Kiriş Kod ve Tipleri	Deneysel Emniyet Katsayıları				
	$\gamma_s$	$\gamma_r$	$\gamma_r^*$	$\gamma_r^{**}$	$\gamma_r^{***}$
KÖYB30110(B')	2,00	1,10	1,13	1,21	1,34
KÖYB50110(B')	2,08	1,09	1,18	1,26	1,39
KÖYB60110(B')	2,15	1,10	1,22	1,29	1,43
KÖYB3018 (C')	2,05	1,07	1,16	1,26	1,37
KÖYB5018 (C')	2,32	1,12	1,32	1,42	1,55
KÖYB6018 (C')	2,41	1,13	1,37	1,48	1,61
KÖG3018 (C')	2,00	1,07	1,08	1,18	1,32
KÖG5018 (C')	2,03	1,09	1,10	1,22	1,35
KÖG6018 (C')	2,14	1,11	1,16	1,28	1,42
KÖYB30210(D')	2,05	1,03	1,15	1,28	1,37
KÖYB50210(D')	2,17	1,07	1,22	1,36	1,44
KÖYB60210(D')	2,19	1,04	1,23	1,38	1,46
KÖYB3028 (E')	2,04	1,12	1,20	1,29	1,36
KÖYB5028 (E')	2,10	1,14	1,23	1,33	1,40
KÖYB6028 (E')	2,29	1,15	1,34	1,44	1,54

Çizelge 2.47. Onuncu seri kısmen öngerilmeli yüksek başarımli ve geleneksel beton kirişlerde kırılma anında momentin sabit olduğu bölgede oluşan çatlak sayıları, ortalama çatlak mesafeleri, ortalama ve karakteristik çatlak genişlikleri

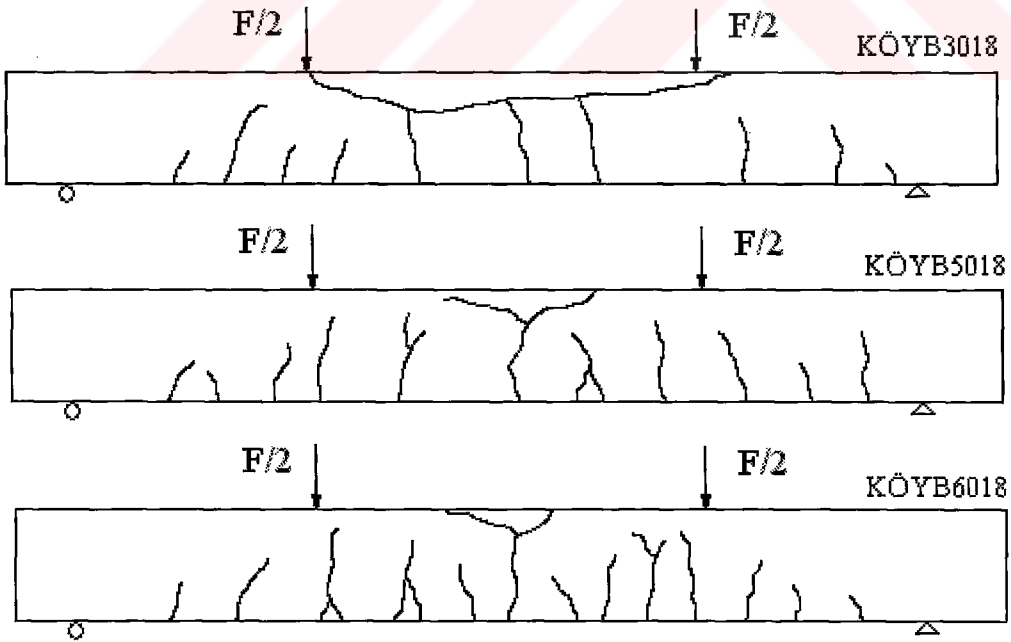
Kiriş Kod ve Tipleri	Çatlak Sayıları	Ort. Çatlak Mesafesi (mm)	Ort. Çatlak Genişliği ( $w_m$ ) (mm)	Karak. Çatlak Genişliği ( $w_k$ )(mm)
KÖYB30110(B')	7	90	0,036	0,061
KÖYB50110(B')	8	70	0,036	0,061
KÖYB60110(B')	10	55	0,036	0,061
KÖYB3018 (C')	4	115	0,051	0,086
KÖYB5018 (C')	5	101	0,051	0,086
KÖYB6018 (C')	8	85	0,051	0,086
KÖG3018 (C')	2	100	0,037	0,063
KÖG5018 (C')	3	95	0,037	0,063
KÖG6018 (C')	4	90	0,037	0,063
KÖYB30210(D')	8	56	0,030	0,051
KÖYB50210(D')	9	53	0,030	0,051
KÖYB60210(D')	12	46	0,030	0,051
KÖYB3028 (E')	6	110	0,040	0,068
KÖYB5028 (E')	7	90	0,040	0,068
KÖYB6028 (E')	9	80	0,040	0,068

Çizelge 2.48. Onuncu seri kısmen öngerilmeli yüksek başarımli ve geleneksel beton kirişlerin donatı oranları, deneysel ve teorik ilk çatlama momentleri ve ilk çatlama oluşturulan maksimum birim uzamalar

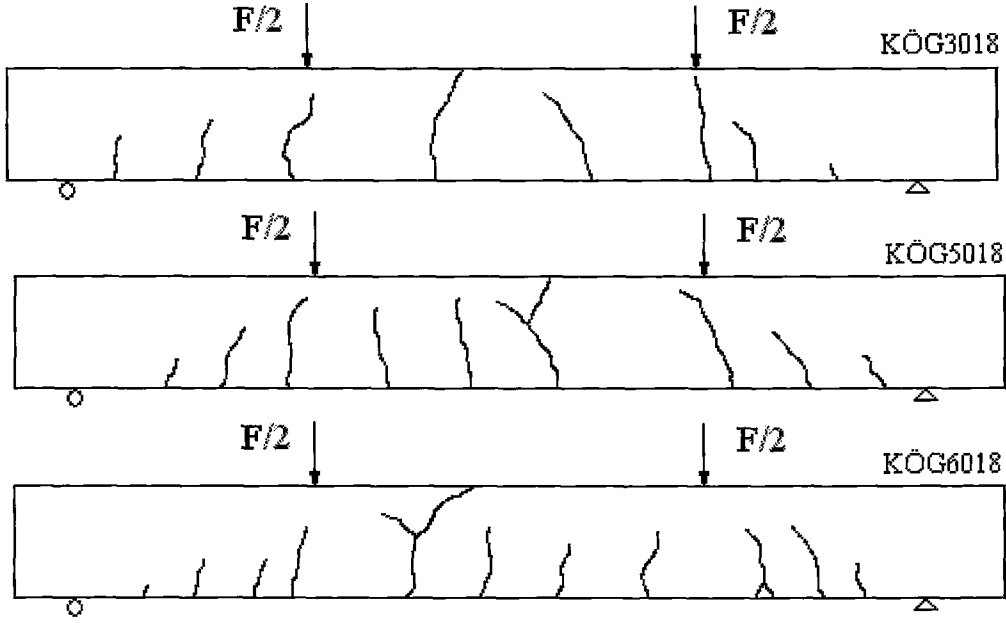
Kiriş Kod ve Tipleri	Pasif Donatı Oranı $\rho_s$	Aktif Donatı Oranı $\rho_p$	Toplam Donatı Oranı $\rho_{top}$	Deneysel İlk Çatlama Momenti (kNm)	Teorik İlk Çatlama Momenti (kNm)	İlk Çatl. Oluşturan Maks. Birim Uzamalar ( $10^6 \epsilon_{ct}$ )
KÖYB30110(B')	0,0079	0,0019	0,0098	4,01	3,55	105
KÖYB50110(B')	0,0079	0,0019	0,0098	4,80	4,30	103
KÖYB60110(B')	0,0079	0,0019	0,0098	5,20	4,68	105
KÖYB3018 (C')	0,0050	0,0019	0,0069	4,20	3,65	105
KÖYB5018 (C')	0,0050	0,0019	0,0069	4,80	4,40	103
KÖYB6018 (C')	0,0050	0,0019	0,0069	5,30	4,77	100
KÖG3018 (C')	0,0050	0,0019	0,0069	3,40	2,90	115
KÖG5018 (C')	0,0050	0,0019	0,0069	4,20	3,65	110
KÖG6018 (C')	0,0050	0,0019	0,0069	4,60	4,02	105
KÖYB30210(D')	0,0079	0,0038	0,0117	4,30	3,64	110
KÖYB50210(D')	0,0079	0,0038	0,0117	4,90	4,39	108
KÖYB60210(D')	0,0079	0,0038	0,0117	5,50	4,76	105
KÖYB3028 (E')	0,0050	0,0038	0,0088	4,50	3,73	108
KÖYB5028 (E')	0,0050	0,0038	0,0088	5,40	4,49	105
KÖYB6028 (E')	0,0050	0,0038	0,0088	5,90	4,87	100



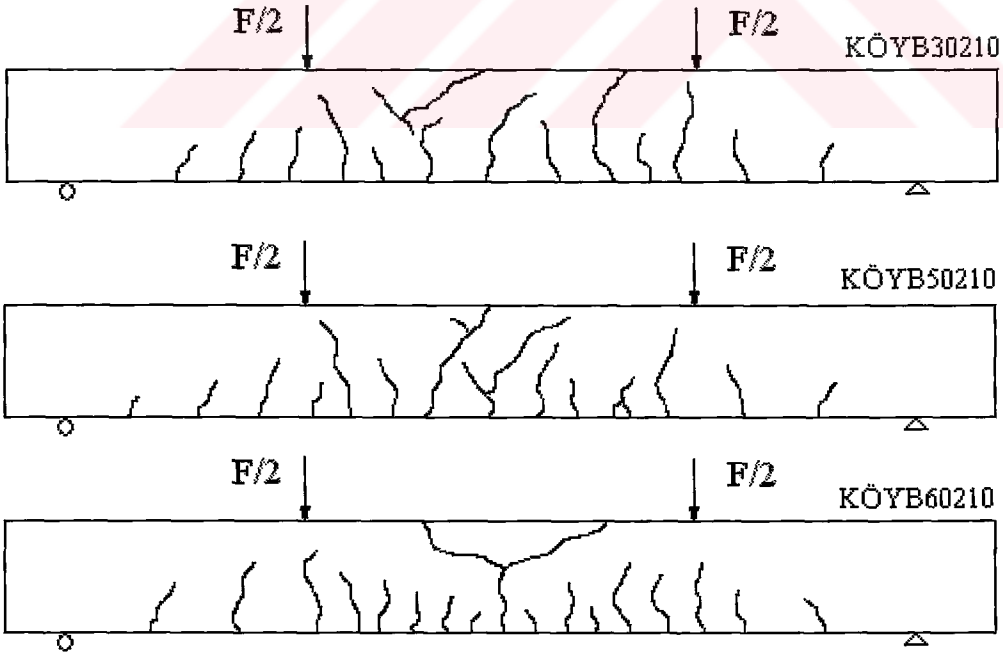
Şekil 2.94. KÖYB30110 (B'), KÖYB50110 (B') ve KÖYB60110 (B') kirişlerinin kırılma yükü altında ön yüzlerinin şematik çatlama durumu



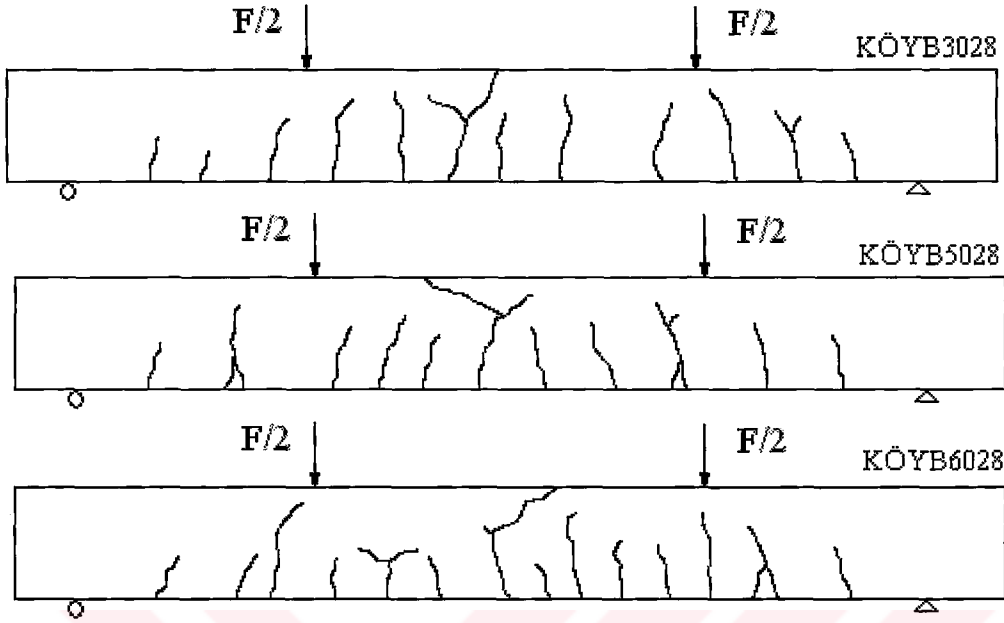
Şekil 2.95. KÖYB3018 (C'), KÖYB5018 (C') ve KÖYB6018 (C') kirişlerinin kırılma yükü altında ön yüzlerinin şematik çatlama durumu



Şekil 2.96. KÖG3018 (C'), KÖG5018 (C') ve KÖG6018 (C') kirişlerinin kırılma yükü altında ön yüzlerinin şematik çatlama durumu



Şekil 2.97. KÖYB30210 (D'), KÖYB50210 (D') ve KÖYB60210 (D') kirişlerinin kırılma yükü altında ön yüzlerinin şematik çatlama durumu



Şekil 2.98. KÖYB3028 (E'), KÖYB5028 (E') ve KÖYB6028 (E') kirişlerinin kırılma yükü altında ön yüzlerinin şematik çatlama durumu

Çizelge 2.49. Onuncu seri kısmen öngerilmeli beton deney kirişlerinin üretiminde kullanılan yüksek başarımlı ve geleneksel betonların ortalama merkezi basınç dayanımları

Kiriş Kod ve Tipleri	Ortalama Merkezi Basınç Dayanımları (MPa)	
	Yüksek Başarımlı Betonlarda	Geleneksel Betonlarda
KÖYB30110(B')	62	-
KÖYB50110(B')	61	-
KÖYB60110(B')	62	-
KÖYB3018 (C')	61	-
KÖYB5018 (C')	58	-
KÖYB6018 (C')	63	-
KÖG3018 (C')	-	35
KÖG5018 (C')	-	36
KÖG6018 (C')	-	36
KÖYB30210(D')	61	-
KÖYB50210(D')	66	-
KÖYB60210(D')	66	-
KÖYB3028 (E')	64	-
KÖYB5028 (E')	62	-
KÖYB6028 (E')	65	-

### 2.2.2.15. Kısmen Öngerilmeli ve Öngerilmeli Beton Kiriş Davranışlarının Karşılaştırılması ve İrdellemeler

Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarılı ve geleneksel beton kirişler üzerinde gerçekleştirilen teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen bulgular aşağıda karşılaştırılarak irdelenmektedir.

Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarılı ve geleneksel beton deney kirişlerinin başlangıç gerilmelerinin belirlenmesinde hesaplanan ani ve zamana bağlı kayıplardan betonun ani kısılması, sünme ve büzülme kayıpları dikkate alındığında, yüksek başarılı betonlarda söz konusu kayıpların geleneksel betonlardakilerden sırasıyla %30, %25 ve %20 civarında daha küçük olduğu görülmektedir. Bu bulgular teknik literatürde mevcut bulguları desteklemekte ve öngerilmeli yüksek başarılı beton kullanımıyla yapı elemanına uygulanacak ilk öngerilme kuvvetindeki kayıpların azalacağına işaret etmektedir (bkz. Çizelge 2.31 ve Çizelge 2.32).

Deney kirişlerinden alınan ölçümler, (bkz. Şekil 2.15) sabit bir öngerilme kuvveti için, pasif donatı miktarı arttıkça kiriş alt lifindeki birim kısılma değerinin ( $\epsilon_{scx}$ ) azaldığını ve bu azalmanın  $\sigma_{ci}$  ile doğrusal orantılı olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan bu ölçümler pasif donatı oranları eşit ve kısmen öngerilme oranları %50-%100 olan C ve F tipi yüksek başarılı betonla üretilen deney kirişlerindeki  $\epsilon_{scx}$  değerlerinin geleneksel betonla üretilenlerinkinden daha az olduğunu da ortaya koymaktadır (bkz. Çizelge 2.35). Bu bulgular, heterojen bir yapıya sahip, deney kirişlerinin yeniden üretiminde başarılı olunduğunu, pasif donatı-beton aderansının yeterliliğini, geleneksel betonların yüksek başarılı betonlara göre adaptasyon yapma kapasitelerinin daha büyük olduğunu ve deney düzeneğinin işlevini oldukça iyi bir hassasiyetle yaptığını göstermektedir.

Kısmen öngerilmeli yüksek başarılı beton kirişlerin deneysel ortalama sehimleri kısmen öngerilme oranı arttıkça azalmaktadır (bkz. Çizelge 2.37 ve Şekil 2.60). Bu bulgu ancak kısmen öngerilme oranındaki artışın kiriş rijitliğini artırmış olmasıyla açıklanabilmektedir.

Kısmen öngerilme oranı %50 olan yüksek başarılı beton kirişlerin (C tipi) deneysel ortalama sehimleri, aynı kısmen öngerilme oranına sahip, geleneksel beton kirişlerinkine göre %33, öngerilmeli yüksek başarılı beton kirişlerin (F tipi) deneysel ortalama sehimleri öngerilmeli geleneksel beton kirişlerinkine göre ise %20 daha küçüktür. Bu



durum kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarılı beton kirişlerin geleneksel betonla üretilenlerinkine göre sünekliklerinin daha az rijitliklerinin ise daha fazla olduğunu göstermektedir. Bu bulgu daha önce gerçekleştirilmiş olan çalışmalardan [42,43,44,45] elde edilen bulgularla da desteklenmektedir (bkz. Çizelge 2.37).

Kısmen öngerilme oranı %50 olan C tipi ve %100 olan F tipi kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli geleneksel beton kirişlerin deneysel kırılma yükleri ( $F_r$ ) dolayısıyla da deneysel kırılma momentleri ( $M_{re}$ ), aynı kısmen öngerilme oranlarına sahip, yüksek başarılı beton kirişlerinkine çok yakındır (%2-%10 civarında daha küçük). Bu da, betonarme kirişlerde olduğu gibi, bu kirişlerde kullanılan betonların basınç dayanımlarındaki değişimin kırılma momenti üzerindeki etkisinin önemli olmadığını göstermektedir (bkz. Çizelge 2.37).

Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarılı ve geleneksel beton deney kirişlerinin tümünde teorik kırılma momentleri ( $M_{rt}$ ) her zaman deneysel kırılma momentlerinden ( $M_{re}$ ) küçük olmaktadır (bkz. Çizelge 2.38). Betonarme kirişlerde de daha önce belirtmeye çalışıldığı gibi, kullanılan malzemenin mekanik özellikleri denetim altında tutulmuş olduğundan momentler arasındaki farkın malzeme karakteristiklerinden dolayı ortaya çıkma ihtimali yok denecek kadar azdır. Ancak bütün farkların aynı yönde gelişmiş olması en azından hesap varsayımlarının gerçeği tam olarak yansıtmadığına işaret etmektedir. Gerçekten betondaki gerilme dağılımı hesaplarda kabul edilen dağılımdan farklı olabileceği gibi eğilmedeki basınç dayanımının merkezi basınç dayanımından büyük olarak dikkate alınmasının daha doğru olma ihtimali de mevcuttur.

Deneysel kırılma momentinin teorik kırılma momentine oranı olarak belirlenen, deneysel emniyet katsayıları ( $\gamma_r$ ) B,C,D ve E tipi kısmen öngerilmeli yüksek başarılı beton kirişlerde sırasıyla 1,13 - 1,16 - 1,14 - 1,13, C tipi kısmen öngerilmeli geleneksel beton kirişlerde 1,18 ve F tipi öngerilmeli yüksek başarılı ve geleneksel beton kirişlerde sırasıyla 1,12 - 1,12' dir. Bu da teorik kırılma momentinin hesabında kullanılan, eşdeğer dikdörtgen gerilme dağılımını belirleyen ve yüksek başarılı betonlar için Kaynak [21]' de geleneksel betonlar için ise Kaynak [22]' de önerilen,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  katsayılarının pratik ihtiyaçlar için yeterli doğruluğa sahip olduklarını göstermektedir (bkz. Çizelge 2.39).

Bununla birlikte deneysel kırılma momentinin ( $M_{re}$ ) kullanım momentine ( $M_s$ ) ve tasarım kırılma momentine ( $M_{rd}$ ) oranı olarak belirlenen deneysel emniyet katsayıları ( $\gamma_s$  ve  $\gamma_r^{***}$ ) B,C,D ve E tipi kısmen öngerilmeli yüksek başarılı beton kirişlerde sırasıyla 2,22 - 2,50 - 2,23 - 2,42 ve 1,48 - 1,67 - 1,48 - 1,62, C tipi kısmen öngerilmeli geleneksel beton

kirişlerde sırasıyla 2,37 ve 1,32, F tipi öngerilmeli yüksek başarımlı ve geleneksel beton kirişlerde ise sırasıyla 2,31 – 2,30 ve 1,54 -1,53 değerlerini almaktadır. Bu da betonarme kirişlerde olduğu gibi kullanım momentinin dolayısıyla da tasarım kırılma momentinin hesaplanmasında kullanılan yöntemin bu kirişler için de oldukça emniyetli tarafta sonuçlar verdiğini göstermektedir (bkz. Çizelge 2.39).

Deneysel kırılma momentinin ( $M_{re}$ ), kullanım momentine ( $M_s$ ) oranı olarak belirlenen deneysel emniyet katsayısı ( $\gamma_s$ ), kısmen öngerilme oranı (PPR) ne olursa olsun, genellikle ikiden büyük kalmakta ve fazla değişmemektedir. Bu durum  $\gamma_s$  ile kısmen öngerilme oranı arasında bir bağıntısının bulunmadığını belirtmeye imkan vermektedir (bkz. Çizelge 2.39).

Kısmen öngerilmeli yüksek başarımlı beton kirişlerin kırılma yükü altında, momentin sabit olduğu bölgelerinde, kısmen öngerilme oranı arttıkça çatlak sayısının azaldığı dolayısıyla da ortalama çatlak mesafelerinin arttığı görülmektedir (bkz. Çizelge 2.40).

Kısmen öngerilme oranı %50 olan C tipi kısmen öngerilmeli geleneksel beton kirişlerin kırılma yükü altında, momentin sabit olduğu bölgelerinde, çatlakların sayısı, aynı kısmen öngerilme oranına sahip yüksek başarımlı beton kirişlerinkinden %66 daha az, deneysel ortalama çatlak mesafeleri %50 daha fazladır. (bkz.. Çizelge 2.40 ve Şekil 2.68). Bu durum çalışmalarımıza konu olan yüksek başarımlı betonun donatı-beton aderansının geleneksel betonunkinden daha iyi olduğunu, dolayısıyla da kesitten kesite adaptasyon kapasitelerinin daha yüksek olduğunu göstermekte ve böylece teknik literatürde bu konuda mevcut bilgileri de [36] teyit etmektedir.

Öngerilmeli yüksek başarımlı ve geleneksel beton kirişlerin kırılma yükü altında, momentin sabit olduğu bölgelerinde, çatlakların sayısı ise değişmemekte, kırılma tek bir çatlakla ani ve gevrek olarak meydana gelmektedir. Bu da öngerilmeli beton kirişlerin adaptasyon yapma kapasitelerinin olmadığına işaret etmektedir (bkz.. Çizelge 2.40 ve Şekil 2.69). Gerçekten kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarımlı ve geleneksel beton kirişlerin teorik ve deneysel çatlak sayıları ve ortalama çatlak mesafeleri üzerinde yapılan karşılaştırmaların tümü dikkate alındığında aderansı geliştirilmiş yeterli pasif donatıya sahip kısmen öngerilmeli beton kirişlerde normal gelişen oldukça yaygın çatlaklar, buna karşılık pasif donatısı olmayan öngerilmeli beton kirişlerde anormal gelişen yerel çatlakların olduğu görülmektedir (bkz. Şekil 2.68 ve Şekil 2.69).

Kısmen öngerilmeli yüksek başarımı beton kirişlerin deneysel ilk çatlama momentlerinin aynı öngerilme kuvveti altında pasif donatı oranı artıkça azaldığı görülmektedir (bkz. Çizelge 2.41).

Kısmen öngerilme oranı %50 olan C tipi kısmen öngerilmeli yüksek başarımı beton kirişlerin deneysel ilk çatlama momentleri, aynı kısmen öngerilme oranına sahip geleneksel beton kirişlerinkinden %20, kısmen öngerilme oranı %100 olan F tipi öngerilmeli yüksek başarımı beton kirişlerin deneysel ilk çatlama momentleri ise aynı kısmen öngerilme oranına sahip geleneksel beton kirişlerinkinden %11 civarında daha büyük olmaktadır (bkz. Çizelge 2.41). Bu da çalışmamızda kullanılan betonların çekme dayanımındaki değişimin ilk çatlama momenti üzerindeki etkisinin basınç dayanımı değişiminin kırılma momenti üzerindeki etkisinden çok daha büyük olduğunu göstermektedir. Bu durum yüksek başarımı betonların elastisite modülünün dolayısıyla da eğilme rijitliğinin geleneksel betonlarinkinden daha büyük olmasıyla da çelişmemektedir.

Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli yüksek başarımı ve geleneksel beton kirişlerin deneysel ilk çatlama momenti değerlerinin teorik ilk çatlama momenti değerlerine pratik olarak eşit olduğundan, daha önce gerçekleştirilen çalışmaların da doğruladığı gibi [115,127], çalışmamızda kullanılan deney kirişlerinin çekme etkisindeki beton kesitlerinde önemli bir plastikleşmenin olmadığını göstermektedir (bkz. Çizelge 2.41).

Kısmen öngerilmeli ve öngerilmeli beton kirişlerin aktif ve pasif donatı oranlarındaki dolayısıyla da kısmen öngerilme oranındaki değişim, betonarme kirişlerde de olduğu gibi, bu kirişlerin üretiminde kullanılan yüksek başarımı ve geleneksel betonun ilk çatlama oluşturduğu maksimum birim uzamalarını pratik olarak değiştirmemektedir. Daha önce de belirtmeye çalışıldığı gibi, bu durum kirişlerin ilk çatlama nedeninin, maksimum çekme gerilmelerinden çok, maksimum birim uzamalar olduğunu bir kez daha göstermek suretiyle daha önce gerçekleştirilmiş olan araştırma sonuçlarını [46] doğrulamaktadır (bkz. Çizelge 2.41).

Kısmen öngerilmeli yüksek başarımı beton kiriş eğriliklerinin öngerilmeli yüksek başarımı beton kirişinkine oranının kısmen öngerilme oranı (PPR) ve kirişlere uygulanan momente göre değişimlerinin dolayısıyla da rijitliklerinin incelenmesi ve böylece, adaptasyon özeliğini tamamen kaybettirmemek koşuluyla, optimum öngerilme oranının belirlenmesi üzerinde de durulan bu çalışmada söz konusu kirişlerin kullanım yükleri altında rijitliklerinin kısmen öngerilme oranının %70' değerine kadar hızla arttığı oysa bu öngerilme oranının daha büyük değerlerinde kiriş rijitliklerindeki artışın çok yavaş olduğu

görülmektedir. Bu nedenle %70 kısmen öngerilmeli oranı değerinin üzerinde üretim yapılarak kazanılacak olan rijitlik artışı dolayısıyla şekildeğişirmelerin sınırlandırılabilmesi için yapı elemanına sarf edilecek maliyete değmemektedir. Buna göre kısmen öngerilmeli yüksek başarımlı beton kirişlerin makul bir masrafla üretilebilmesi için gerekli olan optimum değer %70 civarında kalmasının yeterli olacağını söylemek mümkün olmaktadır (bkz. Şekil 2.73).

Onuncu seri kısmen öngerilmeli yüksek başarımlı ve geleneksel beton kirişler üzerinde gerçekleştirilen teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen bulguların karşılaştırılarak irdelenmesi ise aşağıda özetlenmektedir.

Kısmen öngerilmeli yüksek başarımlı ve geleneksel beton kirişlerin kırılma anındaki deneysel ortalama sehimleri, aynı kısmen öngerilmeli oranlarında, öngerilmeli kuvveti arttıkça azalmakta, kırılma yükleri dolayısıyla da deneysel kırılma momentleri ise artmaktadır. Bunlar beklenen bir bulgular olmakla beraber daha önce gerçekleştirilen çalışmaların bulgularıyla da çelişmemektedir (bkz. Çizelge 2.37 ve Çizelge 2.44).

Kısmen öngerilmeli yüksek başarımlı ve geleneksel beton deney kirişlerinin tümünde, kısmen öngerilmeli oranı ve öngerilmeli kuvveti ne olursa olsun, teorik kırılma momentleri ( $M_{rt}$ ) her zaman deneysel kırılma momentlerinden ( $M_{re}$ ) küçük olmakta ve böylece bu konudaki teorik düşüncelerimiz doğrulanmaktadır (bkz. Çizelge 2.38 ve Çizelge 2.45).

Deneysel kırılma momentinin ( $M_{re}$ ), kullanım momentine ( $M_s$ ) oranı olarak belirlenen deneysel emniyet katsayısının ( $\gamma_s$ ), kısmen öngerilmeli oranı (PPR) ne olursa olsun, genellikle ikiden büyük ve bu orana bağlı olarak fazla değişmeyen değerler aldığı daha önce belirtilmişti. Bu katsayı ( $\gamma_s$ ) öngerilmeli kuvvetiyle de değişmemektedir (bkz. Çizelge 2.46).

Öngerilmeli kuvvetinin artmasıyla çatlak sayısında artma dolayısıyla da deneysel ortalama çatlak mesafelerinde azalma gözlenmektedir (bkz. Çizelge 2.40 ve Çizelge 2.47). Bu durum Kaynak [46,130]'daki deneysel bulgularla da doğrulanmaktadır. Bu husus ancak basınç gerilmesi etkisinde bırakılan betonla donatı arasındaki dayanışmanın artmasıyla açıklanabilmektedir.

Aktif donatıları tam kapasiteyle çekilen B,C,D ve E tipi deney kirişlerinin deneysel çatlama momentleri aktif donatı kapasitesinin belirli oranlarında çekilenlerinkinden (B', C', D' ve E') ortalama %40 daha büyük olmaktadır (bkz. Çizelge 2.41 ve Çizelge 2.48).

Deneysel ilk çatlama momenti değerleri teorik ilk çatlama momenti değerlerine pratik olarak eşit olmaktadır. Bu bulgu bu çalışmanın koşulları altında ilk çatlama momentinin hesaplanması için geliştirilmiş olan bağıntının oldukça gerçekçi olduğuna işaret etmektedir. Diğer taraftan ilk çatlama oluşturulan maksimum birim uzamalar donatı oranı, kısmen öngerilme oranının değişmesiyle aynı kaldığı gibi öngerilme kuvvetinin değişmesiyle de pratik olarak aynı kalmaktadır (bkz. Çizelge 2.48). Böylece, ilk mikro çatlağı maksimum birim uzamaların oluşturduğu dikkate alındığında, bu bulguların beklenen bulgular olduğunu belirtmek için duraksamaya gerek kalmamaktadır.



### 3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

“Kısmen Öngerilmeli Yüksek Başarımli Beton Kirişlerin Davranışlarının İncelenmesi” konulu bu çalışmadan çıkartılabilecek başlıca sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmektedir.

1) Bu çalışmada kısmen öngerilme düzeyinin belirlenmesinde kullanılan ve kısmen öngerilme oranı olarak adlandırılan bağıntının bu amaçla kullanılan diğer bağıntılardan daha gerçekçi olduğu anlaşıldığından kullanımı, kesin tasarımlarda, tercih edilmelidir.

2) Bu çalışmaya konu olan yüksek başarımli betonların dayanımlarına karşılık gelen birim kısaltmaları, geleneksel betonunkilerden daha büyük nihai birim kısaltmaları ise daha küçük olmaktadır. Bu durum yüksek başarımli betonların elastik ötesi şekildeğiştirmelerinin çok küçük olduğu savını teyit etmektedir. Gerçekten yüksek başarımli betonlara ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrisi basınç dayanımının yaklaşık %90' ına kadar doğrusal kalmakta oysa geleneksel betonlarda bu özellik ancak basınç dayanımının yaklaşık %40' ına kadar muhafaza edilebilmektedir.

3) Kısmen öngerilmeli beton kirişlerin kesitlerinde aktif ve pasif donatının birlikte bulunmuş olması bu tekniğin hesaplarına bir takım belirsizlikler getireceğini düşündürmekle beraber bu çalışmaya konu olan deney kirişlerinin şekildeğiştirme, çatlama ve kırılma durumlarının incelenmesinden elde edilen bulguların irdelenmesi, kısmen öngerilme oranı ne olursa olsun, deneysel emniyet katsayısı pratik olarak değişmediğinden betonarme ve öngerilmeli beton hesabında kullanılan, CEB/FIP tarafından önerilen, yöntemin bu son yapı tekniği ile üretilen kirişler için de kullanılabileceğini göstermektedir.

4) Donatı miktarı, kısmen öngerilme oranı ve öngerilme kuvvetindeki değişimler bu çalışmaya konu olan kirişlerin üretiminde kullanılan betonların uzama kapasitelerini pratik olarak değiştirmemekte ve bu durum kirişlerde ilk çatlama maksimum birim uzamaların oluşturduğu savını desteklemektedir.

5) Kısmen öngerilme oranı %0 ve %100 arasında değişen kirişler üzerinde yapılan deneyler, yeterli nervürlü pasif donatıya sahip kısmen öngerilmeli beton kirişlerde betonarme kirişlerde olduğu gibi normal gelişen yaygın mikro çatlakların, pasif donatısı olmayan öngerilmeli beton kirişlerde ise anormal gelişen yerel makro çatlakların meydana geldiğini ve böylece tam öngerilmeli beton kirişlerde adaptasyon özeliğinin olmadığını kısmen öngerilmeli beton kirişlerde ise bu özeliğın bulunduğunu göstermiştir. Bu davranış

yapı emniyeti yönünden yerel makro çatlakların yaygın mikro çatlaklara göre daha elverişsiz olduğunu da doğrulamaktadır.

6) Bu çalışma minimum pasif donatıya sahip, kısmen öngerilmeli beton kirişlere betonarme yapı tekniği için geliştirilmiş olan genel çatlak teorisinin uygulanabileceğini de göstermektedir.

7) Deney kirişlerinin ilk çatlama momentleri teorik ilk çatlama momentleri ile pratik olarak uyuşmakta bu da, bir çok araştırmacının da belirttiği gibi, çekme etkisindeki betonlarda plastikleşmenin olmadığı varsayımının gerçekçiliğini teyit etmektedir.

8) Kullanım yükleri altında eğrilik-moment ilişkisini üç doğru parçasıyla temsil ettikten sonra kirişlerin ortalama eğriliği çatlamanın bir kesitte hesaplanan şekildeğiştirmeler yardımıyla belirlenebilmektedir.

9) Yüksek başarılı ve geleneksel betonlarda kırılma anındaki birim kısalmaları sırasıyla  $2.55 \times 10^{-3}$ ,  $3,8 \times 10^{-3}$  ve betonların eğilmedeki basınç dayanımlarını da merkezi basınç dayanımlarının 1,20 katı olarak dikkate almak ve Bernoulli- Navier hipotezini geçerli saymak suretiyle kırılma yükü ve kırılma şekildeğiştirmeleri belirlenebilmektedir.

10) Öngerilme oranı arttıkça deney kirişlerinin rijitlikleri artmakta dolayısıyla da eğrilikleri azalmaktadır. Bu durum adaptasyon özeliğini tamamen kaybettirmemek ve ekonomik de olmak koşuluyla kullanım yükleri altında olduğu kadar kırılma yükleri altında da şekildeğiştirmelerin belirli sınırlar içinde kalabilmesi için geleneksel betonlarla üretilen kısmen öngerilmeli beton kirişlerde %60 civarında olan optimum öngerilme oranının yüksek başarılı betonlarla üretilenlerde %70 olduğunu göstermekte ve aktif donatıların tam kapasiteyle çekilmemesi durumunda da bu oranlar değişmemektedir.

Özetle gerçekleştirilen bu çalışma, kısmen öngerilmeli beton kirişlerde yüksek başarılı beton kullanmanın bir çok yönden geleneksel beton kullanımına göre daha uygun olduğunu, geleneksel betonlarla üretilen kısmen öngerilmeli beton kirişlerde %60 civarında olan optimum öngerilme oranının yüksek başarılı betonlarla üretilenlerde %70 civarında bir değer aldığını, Türkiye ve Türkiye gibi aktif deprem kuşaklarında bulunan ülkelerde yekpare ve prefabrike yapılarda tam öngerilmeli beton kullanımı yerine, emniyet yönünden, optimum öngerilme oranına sahip kısmen öngerilmeli beton kullanılmasının daha uygun olacağını göstermektedir. Ancak bu sonuçların bu çalışmaya konu olan kirişler ve çalışma koşullarında geçerli olduğunu bunları genelleştirebilmek için daha çok sayıda benzer deneylerin değişik yüklemeler altında da yapılmasının yararlı olacağını belirtmek uygun olmaktadır.

#### 4. KAYNAKLAR

1. Compte rendu du Colloque sur le Béton Armé Partiellement Précontraint, 18, 19 October 1965. Annales des Travaux publics de Belgique Avril 1966.
2. Brenneisen, B., Résultats d'essais sur la Fissuration des Poutres Précontraintes et Partiellement Précontraintes, AITBTP, Janvier 1968.
3. Kocataşkın, F., Betonun Dünü, Bugünü, Yarını, 2. Ulusal Beton Kongresi, 27-30 Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 23-41.
4. Freyssinet, E., Une Révolution dans les Techniques du Béton, Compte Rendu Congrès de Berlin 1936.
5. Durmuş, A., Öngerilmeli Beton Ders Notları, Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Müh.Bölümü, Trabzon 1995.
6. Cestel et Guidi, Recherches Experimentales et Application de la Précontrainte Partielle Effectuées en Italie, AITBTP – Février 1969.
7. Abeles, P.W., Partial Prestressing and Its Suitability for Limit State Design, Structure Engineering, 49, 2 (1971) 67-86.
8. Rao A.S., Selection and Design of Partially Prestressed Concrete Sections for Strength and Serviceability, ACI Structural Journal, 38, 3 (1993) 98-114.
9. Chakrabarti, P.R., Ultimate Stress for Unbonded Post-Tensioning Tendons in Partially Prestressed Beams, ACI Structural Journal, 92, 6 (1995) 689-697.
10. Naaman A.E., Siriakorn A., Serviceability Based Design of Partially Prestressed Beams, Part 1 and Part 2, PCI Journal, 24, 2 Mar.-Apr. (1979) 64-89.
11. Tan K. H., Paramasivam P., and Murugappan K., Steel Fibers as Shear Reinforcement in Partially Prestressed Beams, ACI Structural Journal, 92, 6, Nov-Dec. (1995) 643-652
12. Taerwe L.R., Simplified Analysis of Stress Redistribution in Partially Prestressed Concrete Sections, ACI Structural Journal, 87, 1, Jan.-Feb. (1990) 93-98.
13. Thurlimann B., Case for Partial Prestressing, Proceedings, Structural Concrete Symposium, University of Toronto, May (1971) 253-301.
14. Abeles, P.W., Design of Partially Prestressed Concrete Beams, ACI Journal, Proceedings, 64, 10, October (1967) 669-677.



15. Üzümeri, Ş.M.,ve Özden, Ş., Yüksek Dayanımlı Betonun İnşaatta Kullanımı Konusunda Standartları ve Yönetmeliklerdeki Gelişmeler, TMMOB, İnşaat Mühendisleri Odası, 2. Ulusal Beton Kongresi, 27-30 Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, sayfa: 159-182.
16. Özkul, M.H., Karagüler, M.E., Yüksek Yapılarda Yüksek Dayanımlı Beton, 2. Ulusal Beton Kongresi, 27-30 Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, sayfa: 256-261.
17. ACI 363-R-84, State-of-the-Art Report on High –Strength Concrete, ACI Journal Proceedings, 81,4 (1984) 364-411.
18. Malier, Y., Les Bétons Á Hautes Performances, Caractérisation, Durabilité, Applications, Presses de lécole Nationale des Pont et Chaussées, Paris, 1992.
19. Akman, M.S., Yüksek başarılı Betonların Teknolojisi, Özellikleri, Sorunları, Geleceği, Türkiye İnşaat Mühendisliği XVI. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı, 1-3 Kasım 2001, Ankara
20. Buil, M., Zelwer, A., Extraction de la Phase Liquide des Ciments Durcis, Rapport du Lab., Central Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, (1989) 19.
21. Öztekin, E., Basit Eğilme Etkisinde Yüksek Performanslı Betonarme Kiriş Hesabı İçin Gerilme–Şekildeğiştirme ve Eşdeğer Gerilme Dağılım Modellerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2000.
22. TS 500, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, T.S.E, Ankara, 2000.
23. Larrard, F., Aitcin, P. C., The Strength Retrogression of Silica Fume Concrete, ACI Materials Journal, 90, 6 (1993) 581-585.
24. CEP-FIP (MC90), Model Code for Concrete Structures, Committee Euro-International du Béton, Bulletin d' Information, No 213/214, Lausanne, Switzerland, 1990.
25. Carrasquillo, R, L., Nilson, A.H., Slate, F.O., Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads, ACI Journal, ACI, May-June (1981) 171-178.
26. Akman, M.S., Yüksek Performanslı Betonlarda Otojen Rötne, SIKA Teknik Bülten, Sayı:2000/4, (2000) 3-9.
27. Tazawa, E.I., Matsuoka, Y., Miyazawa, S., and Okamoto, S., Effect of Autogeneous Shrinkage on Self Stres in Hardening Concrete, Poc. Of Intern. Symp. On Thermal Cracking in Concrete in Early Ages, München, Germany, (1994) 221-228.

28. Larrard, F., Malier, Y., Çok Yüksek Mukavemetli Betonların Mühendislik Özellikleri, 2. Ulusal Beton Kongresi, 27-30 Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 76-113.
29. Pigeon, M., The Durability of HS/HPC, 3rd General Rep. On Durability, 4th Intern. Symp. On the Utilization of High Strength/High Performance Concrete, 1, (1996) 39-45.
30. Perenchio, W.F., Klieger, P., Some Physical Properties of High Strength Concrete, Portland Cement Association, Research and Development Bulletin, RD056.01T, Skokie, 1978, 7 pp.
31. Breitenbücker, R., High Strength Concrete C105 with Increased Fire Resistance due to Polypropylene Fibers, Utilization of High Strength /High Performance Concrete, Paris, (1996) 571-578.
32. Malier, Y., Yüksek Başarımlı Beton, 2.Ulusal Beton Kongresi, 27-30 Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 53-66.
33. Swamy, R. N., Properties of High Strength Concrete, Cement, Concrete and Aggregates, 8, 1 (1986) 33-41.
34. Swamy, R.N., Anand, K.L., Shrinkage and Creep of High Strength Concrete, Civil Engineering and Public Works Review, 68,807 (1973) 859-868.
35. CEB-FIP, High Strength Concrete, State-of-the-Art Report, FIP/CEB Bulletin d'Information No.197, August (1990), 61 pages.
36. Mugurumu, H., Watanabe, F., Ductility Improvement of High Strength Concrete Column with Lateral Confinement, High Strength Concrete, Second International Symposium, ACI Sp. Publication, SP-121, ACI, Detroit, U.S.A., (1990).47-60.
37. Ersoy, U., Tankut, T., Yüksek Dayanımlı Betonun Yapısal Davranışı İle İlgili Bir İrdeleme, 2.Ulusal Beton Kongresi, 27-30 Mayıs 1991, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 122-139.
38. Ahmad, S.H., Shah, S.P., High Strength Concrete-A Review, Utilization of High Srength Concrete, Proceeding, Symposium in Stavanger, Norway, June 15-16, (1987) 255-268.
39. Pauw, A., Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density, ACI Journal, Proceedings, 157,6 (1960) 679-688.
40. Shin, S., Kamara, M., and Ghosh, S. K., Flexural Ductility, Strength Prediction and Hysteretic Behaviour of Ultra High Strength Concrete Members, High Strength Concrete, Second International Symposium, ACI Sp. Publication, SP-121, ACI, Detroit, (1990) 239-264.

41. Gradner, N.J., Zhao, J.W., Creep and Shrinkage Revised, ACI Materials Journal, 90,3 (1993) 236-246.
42. Arıoğlu, E., Yüksek ve Çok Yüksek Dayanımlı Betonlarda Süneklik Özeliğinin İncelenmesi ve Şartnamelerle Karşılaştırılması, Prefabrik Birliği Dergisi, sayı: 37, Ocak 1996, sayfa: 4-9.
43. Durmuş, A., Contribution a' l'étude des Criteres de Ruine d'elements de Structures en Béton-Application aux Pièces Armées Thése Universite de Toulouse, Novembre,1976.
44. Durmuş, A., Beton Yapı Elemanların Harabiyet Kriteri ve Bu Kriterin Betonarme Elemanlara Tatbiki, Türkiye İnşaat Mühendisliği 7. Teknik Kongresi, Ankara, Ekim, 1978.
45. Durmuş, A., Döşeme Plaklarının Öngerilmeli ve Kısmen Öngerilmeli Beton Kirişlerin Mekanik Davranışlarına Etkisi, Yapı Mekaniğinde Son Gelişmeler Semineri, Makaleler Kitabı, KTÜ Yayınları, Trabzon, 1986.
46. Durmuş, A., Döşemelerle Beraber Çalışan Öngerilmeli Beton ve Öngerilmeli Betonarme Kirişlerin Mekanik Davranışlarının Bu Sistemin Güvenliğine Etkileri Doçentlik Tezi, KTÜ, Trabzon,1982.
47. Durmuş, A., Doğangün, A. ve Akkurt, M.Y., Öngerilmeli Betonarme Davranışlarının İncelenmesi, K.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon 1996.
48. Tufan, O., Betonarme, Öngerilmeli ve Kısmen Öngerilmeli Beton Yapılar, MML Diploma Ödevi, K.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon, 1980.
49. Abeles, P.W. and Bardhan-Roy, B.K., Prestressed Concrete Designer's Handbook, 3d Edition, Cement and Concrete Association, London 1981.
50. Chakrabarti P.R., Whang T.P., Brown W., Arsad K.M., and Amazeua E., Unbonded post-tensioning tendons and partially prestressed beams, ACI Structural Journal, 91, 5, (1994) 616-625.
51. Muller J.F., Dux P.F., Fatigue of Prestressed Concrete Beams with Inclined Strands, Journal of Structural Engineering, 120, 4 Apr. (1994) 1122-1139.
52. Scholz H., Ductility, Redistribution, and Hyperstatic Moments in Partially Prestressed Members., ACI Structural Journal, 87, 3, (1990) 341-349.
53. Scholz H., Simple Deflection and Cracking Rules for Partially Prestressed Members, ACI Structural Journal , 88, 2 (1991) 199-203.
54. Chowdury, S.H., Wu, T.H., Crack Width Prediction of Reinforced and Partially Prestressed Concrete Beams, Fourteenth Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, University of Tasmania, Hobart, 11-23 Dec., pp. 558-563.

55. Alkokani, A.F., Behaviour and Design of Partially Prestressed Concrete Beams, PhD, The Pennsylvania State University, (1982) 179 pages.
56. El Shahawi, M.A.H., Fatigue and Cracking Behaviour of Partially Prestressed Concrete Members, PhD, Queen's University at Kingston, Canada, 1985.
57. CEB-FIP Joint Committee, International Recommendations for the Design and Construction of Prestressed Concrete Structures, Cement and Concrete Association, London 1970.
58. CEB Design Manual on Structural Effects of Time-Dependent Behaviour of Concrete, (CEB Bulletin D' Information No. 142/142bis), Georgi Publishing Co., Saint-Saphorin, (1984) 391pp.
59. CEB-FIP Model Code for Concrete Structures, 3rd Edition Comité Euro-International du Béton /Fédération Internationale de la Précontrainte, Paris, (1978) 348pp.
60. Harajli M.H., Kanj M.Y., Ultimate Flexural Strength of Concrete Members Prestressed with Unbonded Tendons, ACI Structural Journal, 88, 6 Nov-Dec., (1991) 663-673.
61. Naaman A.E., Unified Design Recommendations for Reinforced, Prestressed, and Partially Prestressed Concrete Bending and Compression Members, ACI Structural Journal, 89, 2, Mar.-Apr. (1992) 200-210,
62. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318-89/ACI 318R-89), ACI, Detroit, (1989) 353pp.
63. Krishna Mohan Rao S. V. and Dilger W. H., Evaluation of short-term deflections of partially prestressed concrete members, ACI Structural Journal, 89, 1 (1992) 71-78.
64. Branson, D.E. and Sheikh, A.F., Deflection of Partially Prestressed Members, NATO Semineri Notlari, 1984.
65. Tadros, M.K., Ghali, A., and Meyer, A.W., Prestress Loss and Deflection of Precast Concrete Members, PCI Journal, 30, 1 Jan.-Feb.(1985) 114-141.
66. Prasada Rao, A.S., Gandotra, K., and Ramaswamy, G.S., Flexural Tests on Beams Prestressed to Different Degree on Prestress, Journal of Institution of Engineers (India), 36, 5 May (1976) 247-253.
67. Moustafa, S. E., Design of Partially Prestressed Concrete Flexural Members, PCI Journal, 22, 3, May-June (1977) 12-29.
68. Brondum-Nielsen, T., Serviceability Limit State Analysis of Cracked, Partially Prestressed, or Reinforced Concrete Sections Under Symmetric Bending, ACI Journal, Proceeding, 83, 4 July-Aug. (1986) 547-552.

69. Rao A.S., Jayaraman R., Creep and Shrinkage Analysis of Partially Prestressed Concrete Members, Journal Structural Engineering, 115, 5, May (1989) 1169-1189.
70. Xin L.J., Gilbert R.I., Time Analysis of Partially Prestressed Beam Subjected to Changing Loads, Journal of Structural Engineering, 119, 9, Sep. (1993) 2593-2606.
71. Batson G., Jenkins E., and Spatney R., Steel Fibers as Shear Reinforcement in Beams, ACI Structural Journal, Proceedings, 69, 10, Oct. (1972) 640-644.
72. Lim T.Y., Paramasivam P., and Lee S.L., Shear and Moment Capacity of Reinforced Steel Fiber Concrete Beams, Magazine of Concrete Research, 39, 140 Sept. (1987) 148-160.
73. ACI Committee 544, Design Consideration for Steel Fiber Concrete (ACI 544, 4R), American Concrete Institute, Detroit, 1988.
74. Mansur M.A., Ong K.C.G., and Paramasivam P., Shear Strength of Fibrous Concrete Beams without Strirrups, Journal of Structural Engineering, ASCE, 11, 9, Sept. (1986) 2066-2079.
75. Narayanan R., and Darwish I.Y.S., Use of Steel Fiber as Shear Reinforcement, ACI Structural Journal, 84, 3 May-June (1987) 216-277.
76. Balaguru P., and Ezeldin A., Behaviour of Partially Prestressed Beams Made with High-Strength Fiber Reinforced Concrete, Fiber Reinforced Concrete : Properties and Applications, American Concrete Institute, (1987) 419-436.
77. Narayanan R., and Darwish I.Y.S., Shear in Prestressed Concrete Beams Containing Steel Fibers, International Journal of Coment Composites and Lightweight Concrete, 9, 2, May (1987) 81-90.
78. Olivier, J.J, The Use of Partial Prestressing for Road Bridges in South Africa, University of Pretoria (South Africa), 1994.
79. Khaleel, M.A., Reliability Based Analysis, Sensitivity and Design of Partially Prestressed Concrete Systems (Bridge Girders), PhD, Washington State University, (1992) 314 pages.
80. Marianos, W. N., Fatigue Life of Partially Prestressed Concrete Bridge Girders, PhD, Tulane University, (1992) 223 pages.
81. Teng S., Branson D.E., Initial and Time-Dependent Deformation of Progressively Cracking Nonprestressed and Partially Prestressed Concrete Beams, ACI Structural Journal, 90, 5 (1993) 480-488.

82. Pul, S., Doğu Karadeniz Bölümü Agregalarıyla Yüksek Performanslı Beton Üretimi ve Özelliklerinin Diğer Betonlarla Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2000.
83. TS 1226, Deney Elekleri-Metal Levhalı, Yuvarlak veya Kare Delikli, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1985.
84. TS 1227, Deney Elekleri-Tel Kafesli, Kare Göz Açıklıklı, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1985.
85. TS 706, Beton Agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1980.
86. TS 3526, Beton Agregalarından Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1980.
87. TS 3529, Beton Agregalarından Birim Ağırlık Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 1980.
88. TS 8537, Kum Eşdeğerliği Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1990.
89. TS 3285, Betonun Eğilmede Çekme Dayanımı Tayini Deneyi (Orta Noktasından Yüklenmiş Basit Kiriş Metodu İle), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1979.
90. TS 19, Portland Çimentosu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1992.
91. TS 10156, Çimento-Katkılı Çimento, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1992.
92. TS 802, Beton Karışım Hesapları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1985.
93. TS 3129, Betonun Yarmada Çekme Dayanımı Tayini Deneyi (Silindir Yarma Metodu), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1978.
94. CAN3-A23.3 M84, Design of Concrete Structures for Buildings, Canadian Standard Association, Rexdale, Ontario, Canada, 1984.
95. DIN 1045, Beton-Und Stahlbetonbau, Bemessung und Ausführung, 1982.
96. NS 3473, Design Rules, Norwegian Standard for Design of Concrete Structures, Oslo, Norway, 1992.
97. BS 8110, Structural Use of Concrete: Code of Practice for Design and Construction, Part 1, London, 1985.
98. Rak MK4, National Building Code of Finland, Concrete Structures, Concrete Association of Finland, 1989.
99. Eurocode-2 (EC2), Calcul des Ouvrages en Beton, 31 Oct.1990.

100. CEB-FIP, High Strength Concrete, State-of-the-Art Report, FIP/CEB Bulletin d'Information 197, August (1990), 61 pages.
101. TS 138, Çekme Deneyleri, (Metalik Malzeme İçin), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 1978.
102. TS 708, Beton Çelik Çubukları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1985.
103. Onaran, K., Malzeme Bilimi, 4. Baskı, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 1993.
104. Postacıoğlu, B., Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri, Cilt I, İTÜ Matbaası, İstanbul, 1981.
105. Durmuş, A., Hüsem, M., Birim Şekildeğiştirme Ölçerleri, KTÜ Matbaası, Trabzon, 2000.
106. Hüsem, M., Doğu Karadeniz Bölgesi Doğal Hafif Agregalarından Biriyle Yapılan Hafif Betonun Geleneksel Bir Betonla Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1995.
107. Guyon, Y., Construction en Béton Précontraint, Classes états Limites, v.2, etude de la poutre, Ed. Eyrolles, Paris, 1968.
108. Naaman A. E., Partially Prestressed Concrete: Design Methods and Proposed Code Recommendations, Proceedings, International Conference on Partially Prestressed Concrete Structures, T. Javor, Editor, Bratislava, June 1988.
109. Regles de calcul de du béton armé aux états limites (BAEL), Paris, 1979.
110. Hisham, H.H., MacGregor, J.G., Modification of the ACI Rectangular Stress Block for High-Strength Concrete, ACI Structural Journal, 94 (1997) 40-48.
111. Karaca, Z., Bir Sentez Çalışması Işığında Nervürlü Donatılı Hafif ve Geleneksel Betonarme Kiriş davranışlarının Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1995.
112. Ersoy, U., Betonarme Yapılarda Büzülme Etkisi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Teknik Dergi, 2,2, (1991) 293-308.
113. Gürsoy, Y., Doğu Karadeniz Bölgesi Doğal Ağır Agregalarından Biriyle Üretilen Ağır Betonun Geleneksel Bir Betonla Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1997.
114. Lorrain, M., Contribution a l' étude de la Micromécanique des Matériaux Granulaires Cohérents Application aux Betons, Thèse de Doctuer és Sciences, Toulouse, 1974.
115. Pons, G., Contribution a l' étude de la Fissuration des Poutres Partiellement Précontraintes, Thèse de Doctuer Ingénieur, Toulouse, 1974.

116. Raka, G.P., Contribution a l' étude du Comportement des Poutres Armees Precontraintes par Fils Adherents Soumises a des Chargement Cycliques, Thése de Doctuer Ingénieur, Toulouse, 1982.
117. TS3233 Öngerilmeli Beton Yapıların Hesap Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Şubat 1979.
118. TS 3721, Çelik Teller-Öngerilmeli Beton İçin, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1988.
119. Özden, K., Eren, İ., Trupia, A.L. ve Öztürk, T., Öngerilmeli Beton , İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, 1994.
120. Celasun, H., Yeni Yönetmeliğe Göre Çözülmüş Örneklerle Öngerilmeli Beton Hesabı, İ.D.M.M.A Yayınları, İstanbul 1974.
121. Courbon, J., Résistance des Matériaux, Tomes I-II, Ed. Dunod, Paris, 1964.
122. İnan, M., Cisimlerin Mukavemeti, Arı Kitabevi, İstanbul, Mayıs 1967.
123. Freyssinet, E., Revolution dans l' art de batır. Ed. Eyrolles, Paris, 1932.
124. Durmuş, A., Arnaud, M., and Lorrain, M., Mécanique Phisique-sur les Mécanismes de Ruine de Poutre en Béton. INSA, de Toulouse, 1976.
125. CEB/FIP Manuel de Calculi Fissuration Première Rédaction, no. 89.
126. Comission Fissuration du CEB, Théorie Générale de la Fissuration, Etude Expérimentale, Bulletin d' Information, no.12, du CEB.
127. Robinson, J.R., Observations et Propositions sur la Vérification en Classe IV des Etats Limites d' Ouverture des Fissures. Bulletin d' Information du CEB no. 89, Paris, 1971.
128. Mathez, P., Désordres Pathologiques dus à un Excés de Déformations, CEB Bulletin d' Information, no. 81, Mars, 1972.
129. Maldegue, M., Détermination Expérimentale des Lois Moments – Courbures des Poutres en Béton armé, Annales I.T.B.T.P. no. 209, mai 1965 et no.213 Semptembre 1965.
130. Bilge, M.R., Öngerilmeli Beton Ders Notları, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İstanbul, 1975.
131. Durmuş, A., Pul, S., Agrega Petrografik Yapısının Betonun Mekanik Özellikleri Üzerindeki Ekisi, İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler, I. Teknik Kongre, Bildiriler Kitabı, Cilt I/ v. 1, Gazi Mağusa- KKTC, 25-27 Ekim 1993, 673-684.



132. Türkçe Sözlük, Türk Dil Kurumu Yayınları, Sayı: 293, Ankara, 1969, s. 588.
133. Erdoğan, T.Y., Beton, 1. Baskı, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.Yayını, Ankara, Mayıs 2003.



## ÖZGEÇMİŞ

Yasemin AKGÜN, 1972 yılında Ordu' da doğdu. İlköğrenimini 1978-1986 yılları arasında İstanbul, Bingöl ve Ankara'da tamamladıktan sonra Ankara Yenimahalle Mustafa Kemal Lisesi' nden 1989 yılında mezun oldu. 1989-1990 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümüne girerek bu bölümden 1993 yılında mezun oldu. Aynı yıl açılan sınavlar sonucunda KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü' nde Yüksek Lisans öğrenimine ve yine KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsünde Araştırma Görevliliği hizmetine başladı. Daha sonra, 1996 yılında KTÜ Ordu Meslek Yüksek Okulu' na Öğretim Görevlisi olarak atandı. Yüksek Lisans öğrenimini 1997 yılında tamamladıktan sonra aynı yıl yine KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü' nde İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Betonarme kürsüsünde Doktora öğrenimine başladı. Evli ve bir erkek çocuk annesi olan Yasemin AKGÜN, İngilizce bilmekte ve halen KTÜ Ordu Meslek Yüksek Okulu Teknik Programlar İnşaat Bölümü'nde görevine devam etmektedir.