**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# YÜKSEK DAYANIM VE ŞEKİLDEĞİŞTİRME ÖZELLİKLİ ÇELİKLERİN BETONARME KESİTTE DONATI OLARAK KULLANIMI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Arcan YANIK**

**Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ**

**HAZİRAN 2008**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# YÜKSEK DAYANIM VE ŞEKİLDEĞİŞTİRME ÖZELLİKLİ ÇELİKLERİN BETONARME KESİTTE DONATI OLARAK KULLANIMI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Arcan YANIK**
**501061013**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 2 Mayıs 2008**
**Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Haziran 2008**

**Tez Danışmanı : Yrd.Doç.Dr. Ercan YÜKSEL**
**Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Engin Orakdöğen (İ.T.Ü.)**
**Yrd.Doç.Dr. Z. Canan Girgin (Y.T.Ü.)**

**HAZİRAN 2008**

# ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada yüksek dayanım ve şekildeğiştirme özellikli çeliklerin betonarme kesitte donatı olarak kullanım durumu incelenmiştir.

Çalışmam boyunca bilgi ve tecrübelerine başvurduğum ve bana destek olan kıymetli hocalarım, danışman hocam Y.Doç.Dr. Ercan Yüksel ve Y.Doç.Dr. Cem Yalçın'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışma esnasında yardımlarını esirgemeyen İnş. Yük. Müh. Hakan Saruhan'a, İnş. Yük. Müh. Kıvanç Taşkın'a, İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı ve Boğaziçi Üniversitesi Yapı Laboratuvarı personeline teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak hayatım boyunca bana destek olan aileme de teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran 2008 Arcan YANIK

**İÇİNDEKİLER**


**KISALTMALAR** **v**
**TABLO LİSTESİ** **vi**
**ŞEKİL LİSTESİ** **vii**
**SEMBOL LİSTESİ** **x**
**ÖZET** **xi**
**SUMMARY** **xii**

**1. GİRİŞ** **1**
1.1. Giriş ve Çalışmanın Amacı 1
1.2. Önceki Çalışmalar 2

**2. YÜKSEK DAYANIM VE ŞEKİLDEĞİŞTİRME YETENEĞİNE SAHİP ÇELİKLER İLE İLGİLİ GENEL BİLGİ** **10**
2.1. Genel Özellikler 10
2.2. Diğer Ülke Yönetmeliklerinde Yer alan "Deprem Çelikleri" 10
**3. DENEYSEL ÇALIŞMA** **17**
3.1. Giriş 17
3.2. Numuneler için Üretim Aşamaları 19
3.2.1. Kiriş Numuneleri 19
3.2.2. 1/1 Ölçekli Kolon Numuneleri 21
3.3. Kiriş Deneyleri 23
3.3.1. BN-1 Deneyi 24
3.3.1.1. BN-1 Deney Düzeneği 24
3.3.1.2. Yükleme ve Hasar Dağılımı 25
3.3.1.3. Deney Sonuçları 26
3.3.2. BS-1 Deneyi 28
3.3.2.1. BS-1 Deney Düzeneği 28
3.3.2.2. Yükleme ve Hasar Dağılımı 29
3.3.2.3. Deney Sonuçları 30
3.3.3. BN-1 ve BS-1 Deneylerinin Karşılaştırılması 32
3.4. 1/1 Ölçekli Kolon Deneyleri 34
3.4.1. 1/1 Ölçekli PCN-1 Deneyi 36
3.4.1.1. Deney Düzeneği 36
3.4.1.2. Yükleme ve Hasar Dağılımı 39
3.4.1.3. Deney Sonuçları 42

3.4.2. 1/1 Ölçekli PCS-1 Deneyi 44
3.4.2.1. Deney Düzeneği 44
3.4.2.2. Yükleme ve Hasar Dağılımı 47
3.4.2.3. Deney Sonuçları 49
3.4.3. PCN-1 ve PCS-1 Deneylerinin Karşılaştırılması 51

**4. KURAMSAL ÇALIŞMALAR 54**
4.1. 1/1 Ölçekli Kolonlarda Kuramsal Çalışmalar 57
4.1.1. Moment Eğrilik İlişkileri 57
4.1.2. İtme Analizi 61
4.1.3. Enerji Tüketme Analizi 64
4.2. 1/3 Ölçekli Betonarme Kolonlarda Kuramsal Çalışmalar 67
4.2.1. Moment Eğrilik İlişkileri 67
4.2.2. İtme Analizi 74
4.2.3. Enerji Tüketme Analizi 79

**5. YORUMLAR VE SONUÇLAR 81**

**KAYNAKLAR 84**

**EK A 87**

**ÖZGEÇMİŞ 90**

**KISALTMALAR**

**YSDOÇ** : Yüksek Dayanım ve Şekildeğiştirme Özellikli Çelik
**AS/NZS** : Australian New Zealand Standart
**500E** : 500 MPa Akma Dayanımlı Deprem Çeliği
**500N** : 500 MPa Akma Dayanımlı Normal Süneklik Özellikli Çelik
**500L** : 500 MPa Akma Dayanımlı Düşük Süneklik Özellikli Çelik
**NZS** : New Zealand Standart
**ASTM** : American Society for Testing and Materials
**BS** : British Standart
**NS** : Norway Standart
**ELOT** : Hellenic Organization for Standardization
**CSA** : Canadian Standards Association
**UNI** : Italian Organization for Standardization
**MIN** : Minimum
**MAKS** : Maksimum
**DAY** : Dayanım
**L** : Kiriş serbest açıklığı
**BN-1** : BÇIII donatı çeliğiyle üretilmiş kiriş numunesi
**BS-1** : YSDOÇ donatı çeliğiyle üretilmiş kiriş numunesi
**LVDT** : Elektronik yerdeğiştirme ölçer
**PCN-1** : BÇIII donatı çeliğiyle üretilmiş kolon numunesi
**PCS-1** : YSDOÇ donatı çeliğiyle üretilmiş kolon numunesi
**P** : Kolona etkiyen yatay yük
**CH 11-27** : 11 – 27 numaralı deney sonuç kayıtları
**CLP-100 CMP** : 100 ton kapasiteli yük hücresi
**SDP-200D** : 200 mm kapasiteli yerdeğiştirme ölçer
**SDP-100** : 100 mm kapasiteli yerdeğiştirme ölçer
**CDP-25** : 25 mm kapasiteli yerdeğiştirme ölçer
**CDP-50** : 50 mm kapasiteli yerdeğiştirme ölçer
**CDP-10** : 10 mm kapasiteli yerdeğiştirme ölçer
**CDP-5** : 5 mm kapasiteli yerdeğiştirme ölçer
**YSDOÇ_N12_1** : 12 mm çaplı 1 nolu YSDOÇ çeliği çekme deneyi numunesi
**BÇIII_N12_1** : 12 mm çaplı 1 nolu BÇIII çeliği çekme deneyi numunesi
**YSDOÇ_N12_2** : 12 mm çaplı 2 nolu YSDOÇ çeliği çekme deneyi numunesi
**BÇIII_N12_2** : 12 mm çaplı 2 nolu BÇIII çeliği çekme deneyi numunesi
**YSDOÇ_N20_1** : 20 mm çaplı 1 nolu YSDOÇ çeliği çekme deneyi numunesi
**BÇIII_N20_1** : 20 mm çaplı 1 nolu BÇIII çeliği çekme deneyi numunesi
**YSDOÇ_N20_2** : 20 mm çaplı 2 nolu YSDOÇ çeliği çekme deneyi numunesi

## TABLO LİSTESİ

**Sayfa No**


| | | |
|---|---|---|
| **Tablo 1.1.** | YSDOÇ Çeliğinin Mekanik ve Kimyasal Özellikleri..... | 3 |
| **Tablo 1.2.** | Yeni Zelanda Yönetmeliği'nde Yer alan Çeliklerin Mekanik Özellikleri..... | 3 |
| **Tablo 2.1.** | Uluslararası Deprem Çeliği Standartları..... | 11 |
| **Tablo 2.2.** | AS/NZS 4671:2001 Yönetmeliği'ne Göre Donatıların Mekanik Özellikleri..... | 12 |
| **Tablo 2.3.** | Amerika Birleşik Devletleri'nde Kullanılan Çelikler İçin Karakteristik Özellikler ……..... | 12 |
| **Tablo 2.4.** | İngiltere'de Kullanılan Çelikler için Karakteristik Özellikler..... | 13 |
| **Tablo 2.5.** | Çekme Özelliklerin Mutlak Minimum ve Maksimum Değerleri…. | 13 |
| **Tablo 2.6.** | Kanada'da Kullanılan Çeliklerin Karakteristik Özellikleri.…..... | 13 |
| **Tablo 2.7.** | Türkiye'de Kullanılan Çeliklerinin Mekanik Özellikleri (TS 708). | 14 |
| **Tablo 2.8.** | İtalya'da Kullanılan B450C Çeliğinin Mekanik Özellikleri……... | 14 |
| **Tablo 2.9.** | Yunanistan'da Kullanılan B500C Çeliğinin Karakteristik Özellikleri..... | 15 |
| **Tablo 2.10.** | Yunanistan'da Kullanılan B500C Çeliğinin Sınır Değerleri……. | 15 |
| **Tablo 2.11.** | İsrail'de Kullanılan Çeliğin Mekanik Özellikleri……..... | 15 |
| **Tablo 2.12.** | Venezüela'da Kullanılan Çeliklerin Akma Dayanımları..... | 16 |
| **Tablo 2.13.** | Kolombiya'da Kullanılan Çeliklerin Mekanik Özellikleri..... | 16 |
| **Tablo 2.14.** | İspanya'da Kullanılan Çeliklerin Mekanik Özellikleri..... | 16 |
| **Tablo 3.1.** | YSDOÇ ve BÇIIIa Çeliğinin Mekanik Özellikleri...……. | 18 |
| **Tablo 3.2.** | BN-1 Numunesi için Düşey Yerdeğiştirme ve Yük Değerleri..... | 25 |
| **Tablo 3.3.** | BS-1 Numunesi İçin Düşey Yerdeğiştirme ve Yük Değerleri..... | 30 |
| **Tablo 3.4.** | PCN-1 Deneyi İtme Yüzünde Oluşan Çatlaklar..... | 39 |
| **Tablo 3.5.** | PCN-1 Deneyi Çekme Yüzünde Oluşan Çatlaklar..... | 40 |
| **Tablo 3.6.** | PCS-1 Deneyi İtme Yüzünde Oluşan Çatlaklar..... | 48 |
| **Tablo 3.7.** | PCS-1 Deneyi Çekme Yüzünde Oluşan Çatlaklar…….. | 48 |
| **Tablo A.1.** | Beton Silindir Numunelere Ait Sonuçlar ……..... | 87 |
| **Tablo A.2.** | Kullanılan Değişik Donatılar İçin Mekanik Özellikler ……..... | 89 |

## ŞEKİL LİSTESİ


| | | | Sayfa No |
|---|---|---|---|
| **Şekil 1.1** | **:** | YSDOÇ Çeliğinin Mekanik Özellikleri Ve $A_{gt}$ Kavramı…... | 2 |
| **Şekil 3.1** | **:** | Kolon Numuneleri Genel Boyutlar……..... | 17 |
| **Şekil 3.2** | **:** | Kiriş Numuneleri Genel Boyutlar ……..... | 18 |
| **Şekil 3.3** | **:** | Tipik Kiriş Kesiti..... | 19 |
| **Şekil 3.4** | **:** | Kiriş Numunelerinin Kalıp Aşamasındaki Görünümü…….. | 20 |
| **Şekil 3.5** | **:** | Kiriş Numunelerinin Genel Görünümü..... | 20 |
| **Şekil 3.6** | **:** | Kolon Numunesi Boyutları ……..... | 21 |
| **Şekil 3.7** | **:** | Kolon Donatılarının Görünümü..... | 22 |
| **Şekil 3.8** | **:** | Soket Temel Kalıplarının Genel Görünümü..... | 22 |
| **Şekil 3.9** | **:** | Kolon Genel Görünüm..... | 22 |
| **Şekil 3.10** | **:** | Kiriş Deney Düzeneği……..... | 23 |
| **Şekil 3.11** | **:** | Kiriş Deneyi Ölçüm Düzeneği Görünümü…….. | 24 |
| **Şekil 3.12** | **:** | BN-1 Numunesinde Oluşan Çatlaklar……..... | 26 |
| **Şekil 3.13** | **:** | BN-1 Numunesi Yük-Düşey Yerdeğiştirme Eğrisi…..... | 27 |
| **Şekil 3.14** | **:** | BN-1 Numunesi Düşey Yerdeğiştirme-Tüketilen Toplam Enerji Grafiği..... | 27 |
| **Şekil 3.15** | **:** | BN-1 Numunesi Orta Kesitte Moment Eğrilik İlişkisi……..... | 28 |
| **Şekil 3.16** | **:** | BS-1 Deneyi Ölçüm Düzeneği……..... | 28 |
| **Şekil 3.17** | **:** | BS-1 Deneyi Basınç Bölgesinde Hasar Görünümü……..... | 29 |
| **Şekil 3.18** | **:** | BS-1 Numunesi Yük-Düşey Yerdeğiştirme Eğrisi..... | 31 |
| **Şekil 3.19** | **:** | BS-1 Numunesi Düşey Yerdeğiştirme-Tüketilen Toplam Enerji Grafiği..... | 31 |
| **Şekil 3.20** | **:** | BS-1 Numunesi Orta Kesit Moment Eğrilik İlişkisi……..... | 32 |
| **Şekil 3.21** | **:** | Kirişlerde Karşılaştırmalı Yük Yerdeğiştirme Eğrileri..... | 33 |
| **Şekil 3.22** | **:** | Kirişlerde Karşılaştırmalı Enerji Yerdeğiştirme Eğrileri..... | 34 |
| **Şekil 3.23** | **:** | 1/1 Ölçekli Kolon Deneyi Yükleme Protokolü……..... | 35 |
| **Şekil 3.24** | **:** | Kolon Deneyi Düzeneği……..... | 35 |
| **Şekil 3.25** | **:** | PCN-1 Kolonunda Boyuna Donatılara Yapıştırılmış Şekildeğiştirme Ölçerlerin Konumları..... | 36 |
| **Şekil 3.26** | **:** | PCN-1 Deneyi Düzeneği..... | 37 |
| **Şekil 3.27** | **:** | PCN-1 Deneyi Genel Görünümü..... | 38 |
| **Şekil 3.28** | **:** | PCN-1 Deney Düzeneği ve Yerdeğiştirme Ölçerler..... | 38 |
| **Şekil 3.29** | **:** | PCN-1 numunesinde Oluşan Çatlaklar..... | 41 |
| **Şekil 3.30** | **:** | Kolon Tabanında Oluşan Ayrılma Başlangıcı..... | 41 |
| **Şekil 3.31** | **:** | Betonda Meydana Gelen Ezilmeler ..... | 42 |
| **Şekil 3.32** | **:** | PCN-1 Numunesi Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirme Eğrisi..... | 42 |
| **Şekil 3.33** | **:** | PCN-1 Numunesi Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirmesi Zarf Eğrisi..... | 43 |
| **Şekil 3.34** | **:** | PCN-1 Numunesi Enerji Tüketimi Eğrisi..... | 44 |
| **Şekil 3.35** | **:** | PCS-1 Numunesi Kolon Boyuna Donatılarına Yapıştırılan Şekildeğiştirme Ölçerler..... | 44 |

**Şekil 3.36 :** Kolon Numunelerinde Şekildeğiştirme Ölçerlerin Yapıştırılması..... 45
**Şekil 3.37 :** PCS-1 Deneyi Düzeneği..... 45
**Şekil 3.38 :** Kolon Tabanındaki Yerdeğiştirme Ölçerlerin Genel Görünümü..... 46
**Şekil 3.39 :** İleri Yerdeğiştirme Düzeyinde PCS-1 Kolonunun Genel Görünümü..... 46
**Şekil 3.40 :** Beton Basınç Bölgesinde Hasar Görünümü..... 47
**Şekil 3.41 :** PCS-1 numunesinde Oluşan Çatlaklar..... 49
**Şekil 3.42 :** PCS-1 Numunesi Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirme Eğrisi..... 50
**Şekil 3.43 :** PCS-1 Numunesi Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirmesi Zarf Eğrisi..... 50
**Şekil 3.44 :** PCS-1 Numunesi Enerji Tüketim Eğrisi..... 51
**Şekil 3.45 :** Kolon Deneyleri Karşılaştırmalı Zarf Eğrileri..... 52
**Şekil 3.46 :** Kolon Deneyleri Karşılaştırmalı Enerji Tüketim İlişkileri..... 52
**Şekil 4.1 :** Cola Programı Genel Akış Diyagramı..... 56
**Şekil 4.2 :** YSDOÇ Çeliği İçin Kullanılan Malzeme Modeli..... 58
**Şekil 4.3 :** BÇIII Çeliği İçin Kullanılan Malzeme Modeli..... 58
**Şekil 4.4 :** Kolonlar İçin Moment-Normal Kuvvet Etkileşim Diyagramları..... 59
**Şekil 4.5 :** Kolon Kesitleri..... 60
**Şekil 4.6 :** %2 Oranında Boyuna Donatı Kullanımı Durumunda Moment Eğrilik İlişkileri..... 60
**Şekil 4.7 :** Farklı Oranda Boyuna Donatı Kullanımı Durumunda Moment Eğrilik İlişkileri..... 61
**Şekil 4.8 :** Kolonlarda Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkisi..... 62
**Şekil 4.9 :** BÇIII Çeliği İle Üretilmiş Kolonda Karşılaştırma..... 63
**Şekil 4.10 :** YSDOÇ Çeliği İle Üretilmiş Kolonda Karşılaştırma..... 63
**Şekil 4.11 :** Farklı Oranda Boyuna Donatı İçeren Kolonlarda Yük-Yerdeğiştirme İlişkileri..... 64
**Şekil 4.12 :** Kuramsal Sonuçlara Göre Tüketilen Enerjinin Karşılaştırılması..... 65
**Şekil 4.13 :** YSDOÇ Çeliği İle Üretilen Kolonda Enerji Tüketimi..... 66
**Şekil 4.14 :** BÇIII Çeliği İle Üretilen Kolonda Enerji Tüketimi..... 66
**Şekil 4.15 :** Beton İçin Kullanılan Malzeme Modeli..... 67
**Şekil 4.16 :** 1/3 Ölçekli Kolon Numuneleri İçin Geometrik Özellikler..... 68
**Şekil 4.17 :** 1/3 Ölçekli Kolonlar İçin Moment Normal Kuvvet Etkileşim Diyagramları..... 69
**Şekil 4.18 :** Yetersiz Sargı Donatısı Durumunda Elde Edilen Moment Eğrilik İlişkileri..... 70
**Şekil 4.19 :** $\rho_v$ =%1 Durumunda Elde Edilen Moment Eğrilik İlişkileri..... 71
**Şekil 4.20 :** $\rho_v$ =%2 Durumunda Elde Edilen Moment Eğrilik İlişkileri..... 72
**Şekil 4.21 :** $N/N_g$=%26.8, $\rho_v$ =%1 için Farklı Boyuna Donatı Kullanım Durumu..... 73
**Şekil 4.22 :** $N/N_g$=%26.8 ve $\rho_v$ =%2 için Farklı Boyuna Donatı Kullanım Durumu..... 73
**Şekil 4.23 :** Hacimsel Enine Donatı Oranı $\rho_v$ =%0 için Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkileri..... 74
**Şekil 4.24 :** Hacimsel Enine Donatı Oranı $\rho_v$ =%1 için Yatay Yük Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkileri..... 75

**Şekil 4.25 :** Hacimsel Enine Donatı Oranı $\rho_v$ =%2 için Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkileri..... 77
**Şekil 4.26 :** 1/3 Ölçekli Kolonlarda Farklı Boyuna Donatı Oranları İçin Yatay Yük Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkisi $\rho_v$ =%1..... 78
**Şekil 4.27 :** 1/3 Ölçekli Kolonlarda Farklı Boyuna Donatı Oranları İçin Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkisi, $\rho_v$ =%2..... 78
**Şekil 4.28 :** 1/3 Ölçekli Kolonda Karşılaştırmalı Enerji-Yerdeğiştirme İlişkileri $\rho_v$ =%1..... 79
**Şekil 4.29 :** 1/3 Ölçekli Kolonda Karşılaştırmalı Enerji-Yedeğiştirme İlişkileri $\rho_v$ =%2..... 80
**Şekil A.1 :** Betonda Gerilme-Birim Şekildeğiştirme Grafikleri..... 88
**Şekil A.2 :** 12 mm Çaplı Donatılar için Gerilme-Birim Şekildeğiştirme İlişkisi..... 88
**Şekil A.3 :** 20 mm Çaplı Donatılar için Gerilme-Birim Şekildeğiştirme İlişkisi..... 89

## SEMBOL LİSTESİ

| | | |
|---|---|---|
| $\mathbf{R_m}$ | : | Çeliğin çekme dayanımı |
| $\mathbf{R_e}$ | : | Çeliğin akma dayanımı |
| $\mathbf{A_{gt}}$ | : | Çelikte boyun bölgesi dışında gerçekleşen toplam şekildeğiştirme |
| $\mathbf{R_{ek,L}}$ | : | Yeni Zelanda da kullanılan çeliklerde en düşük akma dayanımı |
| $\mathbf{R_{ek,U}}$ | : | Yeni Zelanda da kullanılan çeliklerde en yüksek akma dayanımı |
| $\mathbf{f_{yk}}$ | : | Çelikte minimum akma dayanımı |
| $\mathbf{f_{su}}$ | : | Çelikte minimum kopma dayanımı |
| $\mathbf{\Phi}$ | : | Donatı çapı |
| $\boldsymbol{\varepsilon_{su}}$ | : | Çelikte minimum kopma uzaması |
| $\mathbf{R_{e,nom}}$ | : | İtalya'da kullanılan çeliğin akma dayanımının belirlenmiş değeri |
| $\mathbf{R_{e,act}}$ | : | Yunanistan'da kullanılan çeliğin akma dayanımının gerçek değeri |
| $\mathbf{f_{tk}}$ | : | İsrail'de kullanılan çeliğin çekme dayanımı |
| $\mathbf{L_0}$ | : | İsrail'de kullanılan çeliğin donatı uzunluğu |
| **d** | : | Donatı çapı |
| $\boldsymbol{\varepsilon_{sk}}$ | : | Çelikte kopma anındaki uzama |
| $\mathbf{f_y}$ | : | İspanya'da kullanılan çelikler için elastiklik limiti |
| $\mathbf{f_s}$ | : | İspanya'da kullanılan çelikler için kopma dayanımı |
| $\boldsymbol{\varepsilon_{min}}$ | : | İspanya'da kullanılan çelikler için şekildeğiştirme oranı |
| **P** | : | Yanal Yük |
| **N** | : | Normal Kuvvet |
| $\mathbf{N_g}$ | : | Kesitin normal kuvvet taşıma kapasitesi |
| $\boldsymbol{\rho_v}$ | : | Hacimsel enine donatı oranı |

# YÜKSEK DAYANIM VE ŞEKİLDEĞİŞTİRME ÖZELLİKLİ ÇELİKLERİN BETONARME KESİTTE DONATI OLARAK KULLANIMI

## ÖZET

Yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada, yüksek dayanım ve şekildeğiştirme özellikli çeliklerin betonarme kesitte donatı olarak kullanımı deneysel ve kuramsal olarak incelenmiştir.

Çalışma kapsamında deneysel olarak, yüksek dayanım ve süneklik özelliklerine sahip olan, "YSDOÇ" adı verilmiş betonarme çeliği kullanılarak üretilen betonarme elemanların, tek yönlü ve tersinir yükler etkisindeki davranışı, BÇIIIa betonarme çeliği ile üretilmiş elemanlar ile karşılaştırılmıştır. Özellikle, "YSDOÇ" ile üretilen betonarme elemanlarda dayanım ve süneklik özellikleri ile birlikte, deprem performansı açısından önemli olan enerji tüketim kapasitesinin irdelenmesi amaçlanmış, tüm analizler sonucunda YSDOÇ ve BÇIII çelikleri ile üretilmiş betonarme elemanlar, bu parametreler gözönünde bulundurularak karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışma esnasında betonarme kiriş ve kolonlar incelenmiştir. Kirişler tek yönlü düşey yüklemeye tabi tutularak, kolonlar ise tersinir yatay yükler etkisinde denenmiştir, deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

Kuramsal çalışma kapsamında ise deneyleri gerçekleştirilmiş olan 1/1 ölçekli kolonlar ile birlikte, 1/3 ölçekli betonarme kolonlar analiz edilmiştir. 1/1 ölçekli kolonların ve 1/3 ölçekli betonarme kolonların YSDOÇ ve BÇIII çelikleri ile üretilmiş olan kuramsal modelleri, COLA (Reinforced Concrete Column Analysis) programına tanımlanarak, bu program yardımıyla kesitlerin moment-eğrilik, yatay yük yerdeğiştirme ve enerji tüketme davranışları incelenmiş ve 2 farklı tip çeliğin kullanım durumunun, kesit davranışına etkileri karşılaştırılmıştır. 1/3 ölçekli kolonların davranışları incelenirken; kolonlarda hacimsel enine donatı oranı ($\rho_v$) nin %0, %1 ve %2 olduğu durumlar ile kesitin normal kuvvet taşıma kapasitesinin %0, %13.4, %26.8 ve %53.7 si kadar normal kuvvet ekisinde olduğu haller için analizler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın son kısmında ise yüksek şekildeğiştirme ve dayanım özellikli çeliğin betonarme kesitte donatı olarak kullanımı ile ilgili önceki çalışmalarda elde edilen sonuçlarla birlikte, bu tez çalışması kapsamında deneysel ve kuramsal olarak gerçekleştirilen analizlerden elde edilen yorum ve sonuçlar sunulmuştur.

**THE USE OF HIGH-DEFORMATION CAPABILITY AND HIGH-STRENGTH STEELS AS REINFORCEMENT IN REINFORCED CONCRETE SECTION**

## SUMMARY

This study adresses the use of high-deformation capability and high-strength steel as reinforcement in reinforced concrete section, which features high-yield strength (~540 MPa). This postgraduate thesis contains experimental and analytical analyses about reinforced concrete members with high-deformation capability and high strength steels in comparison with members reinforced with normal strength steels.

Experimental program of this study covers the experiments of reinforced concrete members tested under monotonical and reversed cyclic loads. Within the context of the experimental program, reinforced concrete members like columns and beams are tested. The beams were tested under monotonical vertical loads and columns were tested with reversed cyclic lateral loads. These members were produced by two types of steels, one of the reinforcement steel used in the production of the members is named "YSDOC" of high-strength and high-deformability capacity, the other is BCIII steel, generally used in building industry of Turkey. The aim of the experimental program was especially to analyze stiffness, ductility and earthquake performance characteristics of the members which were conctructed with "YSDOC" reinforcement steel, and after all the analysis, members which were constructed with "YSDOC" and "BCIII" reinforcement steel, are compared by considering the parameters explained above. The results and comparison of the experiments were also presented.

The analytical studies contains analysis of the full scaled columns and 1/3 scaled reinforced concrete columns. The analytical models of the full scaled columns and 1/3 scaled reinforced concrete columns were defined into the program named COLA(Reinforced Concrete Column Analysis), and by this program, moment curvature, load displacement and energy absorbtion behaviours were analyzed and compared. While analyzing 1/3 scaled reinforced concrete columns the analysis were made for axial load carrying capacity ratios like 0, %13.4, %26.8, %53.7, and volumetric transverse reinforcement ratios ($\rho_v$) as (%0, %1 and %2).

At the last part of the study, the comments and conclusions which were obtained from the literature review and from this thesis, about the use of high-deformability and high-yield steel as reinforcement in reinforced concrete members are presented.

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Giriş ve Çalışmanın Amacı

Ülkemiz bir deprem ülkesi olduğu için yapılarımızı depreme dayanıklı olarak üretmek biz inşaat mühendislerinin en önemli amaçlarından biridir. Yapılarımızda istenilen davranış şekli yapının sünek davranması, yani deprem sırasında ortaya çıkacak olan enerjisinin büyük kısmını dayanım kaybı olmaksızın büyük şekildeğiştirmeler yaparak harcamasıdır. Betonarme yapıları oluşturan tekil elemanların sünek davranması istenilen davranış biçimidir. Yüksek dayanım ve süneklik özelliklerine sahip "YSDOÇ" çeliğinin betonarme elemanlarda kullanılması durumunda, elemanların süneklik, dayanım özellikleri üzerinde yapacağı etkiler önemli bir araştırma konusudur.

Bu çalışmanın amacı, yüksek dayanım, ve süneklik özelliklerine sahip "YSDOÇ" çeliğinin mekanik özelliklerinin, diğer ülke standartlarına girmiş, deprem çelikleri olarak tanımlanan yüksek dayanımlı ve şekildeğiştirme özellikli çelikler ile birlikte ülkemizde yaygın olarak kullanılan BÇIII çeliği ile karşılaştırılması ve YSDOÇ çeliğinin kullanımı durumunda betonarme elemanlarda sağlanacak dayanım, süneklik, enerji tüketme özelliklerinin, deneysel ve kuramsal olarak incelenmesidir. Çalışmanın başında bu konuyla ilgili önceki çalışmalar incelenmiş ardından diğer ülke standartlarına girmiş deprem çelikleri hakkında genel bilgiler verilmiştir.

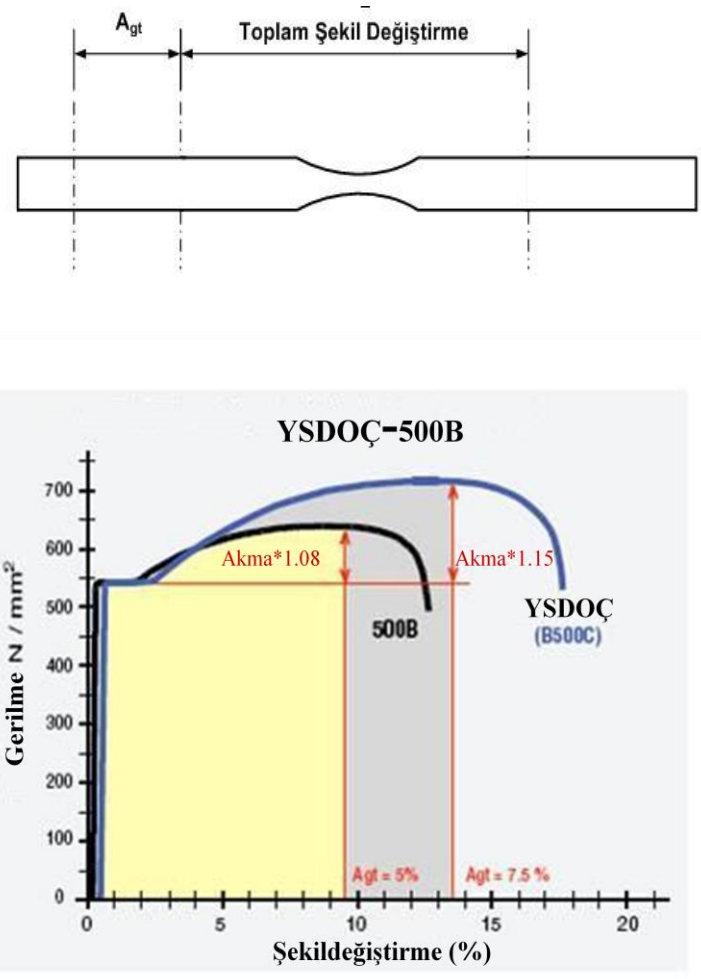
Deneysel çalışma bölümünde ise betonarme kolon ve kiriş numuneleri üzerinde gerçekleştirilen çalışma anlatılmıştır. Her tip betonarme eleman iki adet numuneyi kapsamaktadır. Deneysel olarak incelenen iki numuneden biri YSDOÇ çeliği ile diğeri ise BÇIII çeliği ile üretilmiş, elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

Kuramsal olarak incelenmiş numuneler ise 1/3 ölçekli betonarme kolonlar ve deneysel olarak analizi gerçekleştirilen 1/1 ölçekli kolonlardır. Bu analizlerde YSDOÇ ve BÇIII çeliği kullanılarak üretilen numunelerin davranışı

karşılaştırılmıştır. Ayrıca 1/1 ölçekli kolonlar için deneysel ve kuramsal analizlerin karşılaştırılması da gerçekleştirilmiştir.

## 1.2 Önceki Çalışmalar

YSDOÇ çeliğininin en belirgin özelliği dayanımdaki pekleşme oranının %15 den büyük olması yani çekme dayanınımın akma dayanımına oranının 1.15 den büyük olmasıdır. Bir diğer özelliği ise $A_{gt}$ olarak bilinen, çekme deneyinde boyun bölgesi dışında gerçekleşen, ortalama şekildeğiştirme oranına karşı gelen değerin %6 dan büyük olmasıdır. Şekil 1.1 de YSDOÇ çeliği ve YSDOÇ çeliğine yakın mekanik özelliklere sahip, İngiltere yönetmeliğinde yer alan orta derecede sünek 500B çeliğinin gerilme şekildeğiştirme diyagramları ile birlikte $A_{gt}$ kavramının açıklaması verilmiştir. Tablo 1.1 de ise YSDOÇ çeliğinin mekanik özellikleri ile birlikte içerdiği karbon ve karbon eşdeğeri miktarları verilmiştir.




**Şekil 1.1:** YSDOÇ Çeliğinin Mekanik Özellikleri Ve $A_{gt}$ Kavramı.

**Tablo 1.1** YSDOÇ Çeliğinin Mekanik ve Kimyasal Özellikleri

| | **Akma. Day.** | **Çekme Day.** | **$A_{gt}$** | **Karbon** | **Karbon Eşdeğeri** |
|---|---|---|---|---|---|
| **Birimler** | **(MPa)** | **(MPa)** | **(%)** | **(%)** | **(%)** |
| **YSDOÇ** | 500-650 | 600 | 8 | 0.22 | 0.50 |

Guralnick (1960), yüksek akma dayanımlı (520 MPa) çelikler ile üretilmiş elemanlarla ilgili yaptığı çalışmada yüksek dayanımlı çelik üretmek için iki metod olduğundan bahsetmiştir. Birinci metodun malzeme özelliklerini değiştirerek gerçekleştirilebileceği, ikinci metodun ise soğukta şekillendirme olduğu ifade edilmiştir. Malzeme özellikleri değiştirilerek oluşturulan yüksek dayanımlı çeliğin belirli bir akma noktası olduğunu, soğukta şekillendirilmiş çeliğin ise iyi tanımlanmış bir akma noktasına sahip olmadığını belirtmiştir.

Sinha ve Ferguson (1964), 690 MPa akma dayanımına sahip çelikler ile üretilmiş kolon ve kiriş elemanların yapısal davranışlarını incelemiştir. Yüksek dayanımlı çelikler ile üretilmiş elemanların tokluğunun, geleneksel çelikler ile üretilmiş elemanlara göre yük-deplasman eğrisinin altında kalan alan değerlendirilerek daha yüksek olduğunu belirtmiştir. Yüksek dayanımlı çelikler ile üretilmiş kolonların etkileşim diyagramlarında dengeli kesit durumunda keskin kırılma noktalarının olmadığı belirtmiştir.

Allington ve Bull (2002) tarafından yapılan çalışmada, Yeni Zelanda standartlarına girmiş 500E sınıfı 'deprem çeliği' ile ilgili araştırmalar yer almaktadır. AS/NZS 4671:2001, "Steel Reinforcing Materials" yönetmeliğinde yer alan 500 MPa akma dayanımına sahip üç adet çelik sınıfı için mekanik özellikler Tablo 1.2 de gösterilmiştir.

**Tablo 1.2** Yeni Zelanda Yönetmeliği'nde Yer alan Çeliklerin Mekanik Özellikleri

| **Özellikler** | **500L** | **500N** | **500E** |
|---|---|---|---|
| $R_{ek,L}$ | >500 | >500 | >500 |
| $R_{ek,U}$ | <750 | <650 | <600 |
| $R_m/R_e$ (L) | >1.03 | >1.08 | >1.18 |
| $R_m/R_e$ (U) | - | - | <1.40 |
| $A_{gt}$(%) | >1.5 | >5.0 | >10.0 |

Tablo 1.2 de L düşük süneklik özelliğini, N normal süneklik özelliğini, E ise yüksek süneklik özelliğine sahip deprem çeliklerini temsil etmektedir, $R_{ek,L}$:en düşük akma gerilmesi, $R_{ek,U}$:en yüksek akma gerilmesi, $R_m$:çekme dayanımı, $R_e$:akma dayanımı, $A_{gt}$(%):çelikteki maksimum yüke karşı gelen şekildeğiştirme miktarını tanımlamaktadır. 500N normal sınıf çeliğin 500E deprem çeliğinin yarısı düzeyinde $A_{gt}$ değerine sahip olduğu dikkat çekmektedir.

Allington ve Bull (2002), Yeni Zelanda'da bulunan betonarme yapıların aşırı yüklemelerde inelastik şekildeğiştirmeler yapacak şekilde tasarlandıklarını belirtmiştir. Düşük süneklik düzeyi esas alınarak tasarlanan yapıların bile aşırı yükleme durumunda, kirişlerin ve kolonların alt uçlarında plastik mafsal oluşacak biçimde tasarlanmaları ve tüm plastik mafsal bölgelerinin, büyük dayanım kaybı yaşamadan büyük inelastik şekildeğiştirmelere maruz kalabilecek şekilde olmaları gerektiğini anlatmıştır. Özdeş bir betonarme elemanın 500N standartında donatı çeliği ile üretilmesi durumunda, 500E deprem çeliğiyle üretilmiş duruma göre yapabileceği en büyük yerdeğiştirmenin yaklaşık %50 daha az olabileceği belirtilmiştir. Yapılan testlerde, tekrarlı yüklemeler etkisinde donatının akma dayanımının artması ile, kolon kiriş birleşim bölgesinden geçen kiriş donatılarının aderans performansının azaldığı belirtilmiştir. Bu çalışma sonucunda 500L ve 500N çeliklerinin düşük süneklik özellikleri nedeniyle, hangi biçimde inelastik dayanım ve süneklik gerektirirse gerektirsin, sismik harekete maruz kalsın veya kalmasın elemanların 500E deprem çelikleriyle üretilmesi gerektiğini belirtmiştir. Döşemelerde, kolonlarda ve duvarlarda belirli bölgelerde, donatının plastik uzama kapasitesi istenilen bir olay olduğundan, böyle durumlarda da maruz kalınan deplasmanlara göçmeden karşı konulması için $R_m/R_e$ oranı kontrol altında tutularak E sınıfı deprem çeliklerinin kullanılmasının gerekliliğini açıklamıştır. Son olarak da inşaat şantiyesinde karışıklığı gidermek için sadece E sınıfı donatı çeliği kullanımı önermiştir.

Bull ve Allington (2002), tarafından yapılan bir diğer çalışmada, yönetmeliklerde 430 MPa akma dayanımına sahip donatı çeliği yerine 500 MPa akma dayanımlı donatı çeliği kullanılmasının, betonarme yapılar üzerinde birçok etkileri olduğu, özellikle donatı çeliklerinin sünekliğinin değiştiğini ve dayanım fazlası durumları etkilediğini açıklamıştır. Betonarme bir kirişte aynı eğilme kapasitesine 500 MPa akma dayanımlı çeliklerle üretim durumunda, 430 MPa akma dayanımlı çeliğe göre

daha küçük donatı alanı kullanılarak ulaşılacağı için; düşük donatı alanlı, 500 MPa akma dayanımlı çelikle üretilmiş kirişin daha düşük eğilme rijitliğine sahip olacağı belirtilmiştir. Dolayısıyla özdeş boyutlara ve kesite sahip, 430 ve 500 MPa akma dayanımlı donatı çelikleriyle üretilmiş iki betonarme elemandan, 430 MPa akma dayanımlı çelikle üretilenin, daha yüksek rijitliğe sahip olacağı açıklanmıştır. Isıl hareketler ve trafik yükleri gibi tekrarlı yüklemelere maruz kalan elemanların da 300E (300 MPa akma dayanımına sahip deprem çeliği) veya 500E (500 MPa akma dayanımına sahip deprem çeliği) ile üretilmeleri önerilmiştir. Betonarme bir elemanda 500E deprem çeliğinin yerine 500N çeliğinin kullanılması durumunda elemanın dayanımının değişmeyeceği ancak sünekliğinin azalacağı açıklanmıştır.

Helgason ve diğ (1975), sıcakta haddelenmiş yüksek akma dayanımlı çelikler üzerine yaptıkları deneysel çalışmalarda 520 MPa akma dayanımlı donatı çeliğinin 450 MPa akma dayanımlı özdeş bir donatı çeliğine göre daha yüksek yorulma dayanımına sahip olduğunu ifade etmiştir. Çalışmada kullandıkları çeliklerin yüksek şekildeğiştirme yeteneğine sahip olduğu belirtilmiştir.

MacGregor ve diğ (1971), 600 MPa ın üzerinde akma dayanımına sahip, yüksek şekildeğiştirme kapasiteli çelikler ile ilgili yaptıkları çalışmada, bu tür çeliklerin yorulma dayanımının, 300 MPa akma dayanımına sahip çelikler ile aynı olduğunu belirtmiştir.

Fenwick (2003) çalışmasında, 500 MPa akma dayanımlı donatı çeliğinin yaratabileceği potansiyel problemlerden bahsetmiş, en önemli problem olarak düşük miktarda boyuna donatı kullanılacağı için 300 ve 430 MPa akma dayanımlı donatı kullanılarak üretilmiş özdeş elemanlara göre daha düşük eğilme rijitliğine sahip betonarme elemanlar üretileceğini vurgulamıştır, boyuna donatı oranının kesit rijitliğine etkisini göstermek üzere, dikdörtgen kolon ve kirişlerde çeşitli kuramsal çalışmalar gerçekleştirmiştir. Bu analizlerin sonucunda da 500 MPa akma dayanımlı çelik kullanılarak üretilen tüm betonarme elemanların, normal kuvvet etkisinin olduğu veya olmadığı tüm durumlar için, 300 MPa akma dayanımlı çeliğe göre belirgin olarak daha düşük eğilme rijitliğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Kirişler için yüksek akma dayanımına sahip donatı çelikleri yerine 300 MPa akma dayanımına sahip olan donatı kullanılmasının rijitlik kaybını önlemek açısından daha uygun olacağını önermiştir. Fakat kolonlar için 500 MPa akma dayanımına sahip çeliğin birçok durumda daha uygun olacağını belirtmiştir.

Lin ve diğ. (2000) tarafından yapılan deneysel çalışmada, (NZS 3101-1995) yönetmeliğine uygun kiriş ve birleşim bölgesi donatı detaylandırılması ile 500 Mpa akma dayanımlı boyuna donatı kullanımı halinde kolon-kiriş birleşimlerinde yeterli sünekliğin sağlandığı görülmüştür. Ayrıca bu deneylerde aderans göçmesi gözlendiği belirtilmiş, ancak bu göçmenin dayanım ve süneklikte belirgin bir azalmaya sebep olmadığı da ifade edilmiştir.

Young (1998), kolon-kiriş birleşim bölgesi deneylerinde kiriş boyuna donatısı olarak akma dayanımı 519 MPa olan çelik kullanmış, deney sırasında gözlenen aderans bozulması sonucu genel dayanım kaybı oluştuğunu belirtmiştir.

Brooke, Megget ve Ingham (2005), moment etkisindeki çerçevelerin 500 MPa akma dayanımına sahip donatı çeliği kullanılarak üretildiği durumla ilgili yaptıkları çalışmada, NZS 3101:1995 yönetmeliğine göre, kolon-kiriş birleşim bölgelerinden geçen 500 MPa akma dayanımlı, kiriş boyuna donatısı olarak kullanılan çeliklerin çapının küçültüldüğünü belirtmiştir. Analizlerinin sadece moment etkisindeki çerçevelerde geçerli olduğunu, 500 MPa akma dayanımına sahip çeliğin başka kullanım alanlarında, örneğin kolon enine donatısı olarak kullanıldığı durumlarda belirli avantajlar sağlayabileceğini ifade etmiştir. Moment etkisi altındaki çerçevelerde 500 MPa akma dayanımlı donatı çeliği kullanımı halinde, aynı yük etkileri altında 300 MPa akma dayanımlı donatı çeliği kullanılan duruma göre donatı çubuğu sayısının fazla olacağını belirtmiştir. Ayrıca eşdeğer moment kapasitesi ve eşdeğer göreli kat ötelemesi değerleri açısından yapılacak değerlendirmelerde 500 ve 300 MPa çeliğin kullanım durumları karşılaştırıldığında, 500 MPa akma dayanımına sahip çeliğin kullanım durumunun, daha düşük ağırlıkta donatı çeliği gerektirmesine rağmen, eşdeğer akma deplasmanı vermek için büyütülecek kesit boyutlarından ötürü, 300 MPa akma dayanımlı donatı çeliğinin kullanım durumuna göre daha masraflı olacağını ifade etmiştir. Çoğu durumda moment etkisi altındaki sünek çerçevelerin kirişlerinde 300 MPa akma dayanımına sahip boyuna donatı çeliğinin kullanılmasının daha avantajlı olacağını belirtmiştir.

Megget (2005), dört adet kolon kiriş birleşim bölgesi numunesini benzeşik dinamik deney tekniğini kullanarak incelemiştir. Kiriş donatısı olarak 500 MPa akma dayanımlı deprem çeliğini kullanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, numunelerin rijitliğinin 300 MPa veya 430 MPa akma dayanımına sahip çeliklerin kullanıldığı durumlara göre daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca 500 MPa akma

dayanımlı çelikle üretilen numunelerde tekrarlı yükleme etkisinde %6 göreli kat ötelemesi değerine kadar, ankraj kaybı oluşmadığı ve göçmenin %6 lık göreli kat ötelemesi değerinde kiriş boyuna donatısının burkulmasından kaynaklandığını belirtmiştir. Aynı yatay göreli kat ötelemesi seviyeleri için kirişte meydana gelen en büyük boy değişiminin, 500 MPa akma dayanımına sahip donatı çeliği ile üretilmiş elemanlarda, 430 MPa akma dayanımlı çelik ile üretilmiş elemana göre, yaklaşık %35 daha büyük olduğunu belirtmiştir.

Allington ve Bull (2003), 500 MPa akma dayanımına sahip donatı çeliklerinin boyuna donatı olarak kullanıldığı betonarme elemanların, en büyük dayanımının akma dayanımına oranı olarak tanımladığı dayanım fazlasını kuramsal olarak incelemiş, elde ettiği sonuçları çalışmada sunmuştur. Bu çalışmada dikdörtgen ve kare kesitli kolon elemanları ile, dikdörtgen kesitli kiriş elemanları kuramsal olarak incelemiştir. Kullanılan boyuna donatı oranı, NZS3101:1995 yönetmeliğine uygun olarak seçilmiş, kirişlerde basınç donatısının çekme donatısına oranını, 0.5 ve 1 değerleri arasında alınmıştır. Kolonlarda ise simetrik donatı yerleşimi esas alınmıştır. Kolonlara etkiyen eksenel yük oranı ($N/N_g$) 0.1 ve 0.3 olarak alınmış, beton dayanımı ise 25 ve 40 MPa arasında değişmiştir. Çalışma sonunda kirişler için kesit boyutlarının, boyuna donatı oranının, enine donatı tipinin ve beton basınç dayanımının, dayanım fazlası "faktöre" belirgin bir etkisinin olmadığı belirlenmiş, bu faktöre en belirgin etkinin kiriş elemanlarında kullanılan boyuna donatının malzeme özellikleri olduğu tespit edilmiştir. Kolonlar için de kesit boyutlarının, beton dayanımının, boyuna donatı miktarının ve enine donatı tipinin dayanım fazlası faktörü belirgin bir şekilde etkilemediğini, en belirgin etkilerin eksenel yük oranı, moment eğrilik ilişkisinden elde edilen kesit sünekliği ve boyuna donatının malzeme özellikleri olduğu belirtilmiştir. 500 MPa akma dayanımına sahip donatı çeliği ile üretilmiş kirişlerde dayanım fazlası faktör 1.40, kolonlarda ise 1.30 olarak elde edilmiştir.

Okada ve diğ.(1984), akma dayanımı 500 ve 700 MPa arasında değişen donatı çubuklarının çekme donatısı olarak kullanıldığı, betonarme ve öngerme verilmiş kirişleri, statik, tek yönlü ve tersinir tekrarlı yükleme etkilerinde deneysel olarak incelemiş, elde edilen yapısal davranışları 300 MPa akma dayanımlı çeliğin kullanıldığı numunelerinki ile karşılaştırmıştır. Denenen kirişler dikdörtgen kesitli olup, aynı eğilme dayanımını sağlayacak şekilde üretilmiştir. Çalışmaların

sonucunda, betonarme kirişlerde yüksek dayanımlı donatı kullanıldığı halde, çatlamadan sonraki eğilme rijitlikleri ile kayma dayanımlarının düştüğü görülmüştür. Öngerilmeli kiriş elemanlarında ise, uygun öngerme kuvveti verilmesi durumunda, yüksek akma dayanımına sahip donatı kullanıldığında (~700MPa), çatlak genişliklerinin istenilen seviyelerde tutulabileceği, ayrıca rijitliklerin ve kayma dayanımlarının arttırılabileceği belirtilmiştir.

Ansely (2002), 420 MPa akma dayanımına sahip çelikler ile, 700 MPa'ın üzerinde akma dayanımına sahip çelikler ile üretilmiş tekil kiriş elemanların davranışını karşılaştırmıştır. Yüksek akma dayanımına sahip çelikler ile üretilmiş kiriş elemanların en büyük dayanımının çok daha yüksek olduğu ve daha sünek bir eğilme göçmesi moduna sahip olduklarını belirtmiştir. Ayrıca yüksek dayanımlı çelikler ile üretilmiş kirişlerin tokluğunun, diğer elemanlara göre daha yüksek olduğu, yük deplasman eğrilerinin altında kalan alanların karşılaştırılması ile belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında enine donatı davranışını incelemek için, 2 adet dikdörtgen kirişte eğilme-kayma deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu kirişlerin üretiminde çekme ve basınç donatısı olarak akma dayanımı 420 MPa olan çelik kullanılmış, parametre olarak seçilen etriyeler ise, birinci kirişte 420 MPa akma dayanımlı çelik ile, ikinci kirişte ise yüksek akma dayanımlı çelik ile üretilmiştir. Deneyler neticesinde, boyuna donatıların göçme modlarını belirlediği, kayma dayanımındaki değişimin önemsiz olduğu ifade edilmiştir.

Seliem (2007), betonarme köprülerin yüksek performanslı çelik donatılar ile üretildiği durumları incelediği çalışmasında, yürürlükte olan standartların akma noktası belirli çelikler için geçerli olduğunu belirtmiş, betonarme elemanlarda yüksek dayanımlı çelik kullanımı için tereddütler olduğunu, akma noktası belirli olmayan yüksek dayanımlı çelikler için standartların yeniden düzenlenmesi gerektiğini ifade etmiştir. Akma platosu olmayan çeliklerin kullanılmasıyla çekme ve basınç kontrollü göçmelerin arasındaki farkın ayırt edilemeyeceğini belirtmiş, çeliğin gerilme şekildeğiştirme diyagramında keskin kırılma noktaları olmadığından dengeli göçme tanımı yapmanın genellikle zor olduğunu belirtmiştir. Aynı eğilme kapasitesini vermek için yüksek dayanımlı çelik kullanımının gerekli çelik alanını azalttığını bu yüzden de donatı sıkışıklığını azaltacağını ifade etmiştir. Betonarme kolonlarda yüksek dayanımlı çelik kullanımının eksenel yük taşıma kapasitesini artırmasının beklendiğini belirtmiştir.

Yotakhong (2003), deneysel olarak incelediği gerçek ölçekli kirişlerde, farklı donatı oranları için yüksek dayanımlı çelik kullanımında, tüm hallerde sünek eğilme göçme modu tespit etmiştir. Çatlaklardan sonra kirişlerin eğilme rijitliğinin düştüğünü ve bu düşüşün düşük donatı oranına sahip kirişler için daha belirgin olduğunu açıklamıştır.

El-Hacha ve Rizkalla (2002), yüksek akma dayanımlı (827 MPa) ve 420 MPa akma dayanımlı çelikler ile üretilmiş betonarme kısa kolonları deneysel olarak incelemiştir. Kolonlarda %2 lik boyuna donatı oranı kullanılmıştır. 420 MPa akma dayanımına sahip çelikler ile üretilmiş kolonlarda, göçme boyuna donatının akmasından dolayı gerçekleşirken, yüksek dayanımlı çelikler ile üretilmiş kolonlarda göçme, boyuna donatı akmaya erişmeden, betonun ezilmesi ile gerçekleşmiştir. En büyük yük düzeyinde betonda oluşan şekildeğiştirmeler 420 MPa akma dayanımına sahip çelik ile üretilmiş olanda 0.002 iken, yüksek dayanımlı çelik ile üretilen kolonda 0.003 dür. Ayrıca yüksek dayanımlı çelik ile üretilmiş kolonların, 420 MPa akma dayanımlı çelikler ile üretilmiş kolonlara göre daha sünek davranış sergilediklerini belirtilmiştir.

# 2. YÜKSEK DAYANIM VE ŞEKİLDEĞİŞTİRME YETENEĞİNE SAHİP ÇELİKLER İLE İLGİLİ GENEL BİLGİ

## 2.1 Genel Özellikler

Başta Yeni Zelanda, İngiltere, Amerika ve bir çok Avrupa ülkesindeki yürürlükteki yönetmeliklere göre bir çeliğin "deprem çeliği" olarak tanımlanabilmesi için aşağıdaki özellikleri sağlaması gerekmektedir:

- Kopma dayanımının akma dayanımına oranı ($R_m$ / $R_e$) > 1.15 olmalıdır.
- Kopma aşamasındaki en büyük uzama yerine kopma dayanımına karşı gelen şekildeğiştirme oranı esas alınmalıdır.
- En büyük gerilmeye karşı gelen uzama şekildeğiştirmesi $A_{gt}$>%6 olmalıdır.

Aşağıda bu tanıma uyan donatı çelikleriyle ilgili diğer ülke yönetmeliklerinden yapılan alıntılar yer almaktadır.

## 2.2 Diğer Ülke Yönetmeliklerinde Yer Alan "Deprem Çelikleri"

Deprem çelikleri bir çok ülkenin ilgili yönetmeliğinde yer bulmuştur. Tablo 2.1 de bu çalışmada kullanılmış olan, YSDOÇ adlı donatı çeliği ile birlikte diğer ülkelerin deprem çelikleriyle ilgili mekaniksel özellikler topluca verilmiştir. Aşağıdaki bölümlerde Tablo 2.1 de yer alan donatı çelikleriyle ilgili ayrıntılı bilgiler verilmektedir. Deprem çeliği özelliklerinin ifade edildiği Tablo 2.1'de, pek çok ülkeye ait yönetmelikler ve donatı çeliği özellikleri görülmektedir.

Tabloda yer alan ülkeler arasında bu konuda en ayrıntılı bilgileri Yeni Zelanda'nın AS/NZS 4671:2001 Yönetmeliği içermektedir. Bu yönetmelik kapsamında akma dayanımı 500 MPa olan, 500L, 500N ve 500E olmak üzere üç farklı süneklik düzeyine sahip çelik tanımlaması yapılmıştır. Tablo 2.2 deki L, N ve E indisleri ise L:düşük süneklik, N:normal süneklik, E:deprem çeliklerini temsil etmektedir. Akma dayanımı yaklaşık 430 MPa olan ve ülkemizde üretilen betonarme çeliklerinden BCIII'e karşı gelen bir başka donatı çeşiti de aynı tabloda yer almaktadır.

Özellikle deprem bölgelerinde E sınıfı donatı çeliği kullanımı bu yönetmelik tarafından zorunlu kılınmıştır.

**Tablo 2.1** Uluslararası Deprem Çeliği Standartları

| **Ülke** | **Standart** | **Kalite** | **Akma Day.** | **Çekme Day.** | **Uzama** | **Agt** | **Re/Rm** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | **($N/mm^2$)** | **($N/mm^2$)** | **(%)** | **(%)** | |
| Amerika | ASTM A 706 | Gr 60 | 420-540 | 550 | 14 | | >1.25 |
| Avustralya | AS 4671 | GR 500 E | 500-600 | | | 10 | >1.15-1.40 |
| İngiltere | BS 4449 | B 500 C | 500-650 | | | 7.5 | >1.15-<1.35 |
| Norveç | NS 3576-3 | B 500 C | 500-650 | | | 7.5 | >1.15-<1.35 |
| Yunanistan | Elot 1421-3 | B 500 C | 500-625 | | | 7.5 | >1.15-<1.35 |
| İtalya | UNİ 6407 | FeB 44 K | 450-560 | | | 7 | >1.13-<1.35 |
| İspanya | UNE 36065 | B 400 SD | 400-480 | 480 | 20 | 9 | >1.15-<1.35 |
| | | B 500 SD | 500-625 | 575 | 16 | 8 | >1.15-<1.35 |
| Portekiz | E 455 | A 400 NR SD | 400-480 | | | 8 | >1.15-<1.35 |
| | E 460 | A 500 NR SD | 500-600 | | | 8 | >1.15-<1.35 |
| Yeni Zelanda | NZS 4671 | GR 500 E | 500-600 | | | 10 | >1.15-<1.40 |
| Kanada | CSA.G.30.18-M92 | Gr 400 | 400-525 | 560 | 13 | | >1.15 |
| | | Gr 500 | 500-625 | 625 | 12 | | >1.15 |
| Kolombiya | NTC 2289 | Diaco 60 | 420-540 | 550 | 14 | | >1.25 |
| İsrail | SI 4466-3 | 400 W | 400-520 | 500 | 12 | | >1.25 |
| Venezüela | Covenin 316 | W60 | 415-540 | 620 | 14 | | >1.25 |
| | | W70 | 490-637 | 620 | 14 | | >1.25 |
| YSDOÇ | | | 500-550 | 600 | | 8 | >1.15-<1.35 |

Betonarme elemanların aşırı yüklemelerde yüksek yerdeğiştirme yapabilmeleri beklenmektedir. Yeni Zelanda da kullanılan Tablo 2.2 de gösterilmiş olan 500E sınıfı donatı çeliğinin en büyük gerilmeye karşılık gelen şekildeğiştirme oranının ($A_{gt}$), yüksekliği sayesinde bu kritere uygun olduğu görülmektedir.

Ayrıca NZS 3101 Yönetmeliği Yeni Zelanda da 500N çeliğinin kullanımında önemli kısıtlamalara getirmiştir.

Yeni Zelanda'nın yanısıra Amerika Birleşik Devletleri de düşük alaşımlı çelik ve düz (nervürsüz) betonarme donatı çeliklerinin sınıflandırıldığı ASTM A 706 Yönetmeliği'nde yüksek dayanımlı sünek donatı çeliğine yer vermiştir. Bu yönetmelikte minimum akma dayanımı 420 MPa, çekme dayanımı 550 MPa ve maksimum akma dayanımı 540 MPa olan tek tip donatı çeliği tanımlanmıştır. Ayrıca

çekme dayanımının, akma dayanımından en az 1.25 kat daha büyük olması şartı koşulmuştur. Tablo 2.3 de Amerika Birleşik Devletleri'nde kullanılan çelikler için çekme özellikleri tanımlanmıştır.

**Tablo 2.2** AS/NZS 4671:2001 Yönetmeliği'ne Göre Donatıların Mekanik Özellikleri

| **Özellikler** | **500L** | **500N** | **500E** | **430** |
|---|---|---|---|---|
| **$R_{ek,L}$ (düşük akma gerilmesi)** | >500 | >500 | >500 | >410 |
| **$R_{ek,U}$ (yüksek akma gerilmesi)** | <750 | <650 | <600 | <520 |
| **$R_m/R_e$ (L) (çekme ger. / akma ger.)** | >1.03 | >1.08 | >1.18 | >1.15 |
| **$R_m/R_e$ (U)** | - | - | <1.40 | <1.50 |
| **$A_{gt}$(%) (şekildeğiştirme oranı)** | >1.5 | >5.0 | >10.0 | >10.0 |

**Tablo 2.3** Amerika Birleşik Devletleri'nde Kullanılan Çelikler İçin Karakteristik Özellikler

| | **Birimler** | **Psi** | **Mpa** |
|---|---|---|---|
| **Çekme dayanımı** | **Min.** | 80000 | 550 |
| **Akma dayanımı** | **Min.** | 60000 | 420 |
| **Akma dayanımı** | **Max.** | 78000 | 540 |

Portekiz'de ise E 455 ve E 460 Yönetmeliği'ne girmiş A 400 NR SD A 500 NR SD çelikleri de sırasıyla 400 ve 500 MPa akma dayanımına ve %8 lik $A_{gt}$ değerine sahiptir.

Deprem çeliğine yönetmeliklerinde yer veren bir diğer ülke ise İngiltere'dir. İngiltere'nin BS 4449:2005 Yönetmeliğinde önceki çelik yönetmeliği BS:4449:1997' e göre çeliklerin karakteristik akma dayanımı 500 MPa'a yükseltilmiştir ayrıca BS:4449:1997 ile karşılaştırıldığında yeni bir 3. sınıf süneklik düzeyi eklendiği gözlenmiştir.

İngiltere yönetmeliğinde her üçü de 500 MPa karakteristik akma dayanımına sahip ancak farklı süneklik kapasiteli üç sınıf çelik tanımlanmıştır. Bu çelikler B500A, B500B ve B500C olarak isimlendirilmiştir. Tablo 2.4 de bu üç çelik sınıfının karakteristik çekme özellikleri verilmiştir. İlaveten Tablo 2.5 de ise bu üç tip donatı çeliği için çekme özelliklerinin mutlak minimum ve maksimum değerleri yer almaktadır.

**Tablo 2.4** İngiltere'de Kullanılan Çelikler için Karakteristik Özellikler

| | **Akma dayanımı ( $R_e$)** | **Çekme/Akma gerilmesi oranı** | **$A_{gt}$** |
|---|---|---|---|
| **Birimler** | **MPa** | **(-)** | **(%)** |
| **B500A** | 500 | 1.05 | 2.5 |
| **B500B** | 500 | 1.08 | 5.0 |
| **B500C** | 500 | ≥1.15,≤1.35 | 7.5 |

**Tablo 2.5** Çekme Özelliklerinin Mutlak Minimum ve Maksimum Değerleri

| **Performans karakteristikleri** | **Minimum değer** | | | **Maksimum değer** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **B500A** | **B500B** | **B500C** | **B500A** | **B500B** | **B500C** |
| $R_e$**,MPa** | 485 | 485 | 485 | 650 | 650 | 650 |
| $R_m/R_e$ | 1.03 | 1.06 | 1.13 | - | - | 1.38 |
| $A_{gt,\%}$ | 2.0 | 4.0 | 6.0 | - | - | - |

Avustralya deprem çeliğine, AS4671-2001 Yönetmeliği'nde yer vermiş diğer bir ülkedir. Bu yönetmelikte 2 farklı süneklik sınıfı tanımlanmıştır. Düşük düktilite kapasitesi için L sınıfı ve normal ve yüksek düktilite kapasitesi için N sınıfı çelik tanımlanmıştır.

Kanada CSA G30.18-M92-CAN/CSA Yönetmeliği'nde çelikleri minimum akma dayanımı seviyeleri 300 MPa, 400 MPa ve 500 MPa olan ve sırasıyla 300R, 400R, 400W, 500R ve 500W isimleri ile sınıflandırmıştır. Bu sınıflandırma ve çeliklerin çekme özellikleri ile ilgili bilgiler Tablo 2.6 da yer almaktadır.

**Tablo 2.6** Kanada'da Kullanılan Çeliklerin Karakteristik Özellikleri

| **Çelik İsimleri** | | **300R** | **400R** | **500R** | **400W** | **500W** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Çekme dayanımı MPa** | **min** | 405 | 540 | 675 | 540 | 625 |
| | | Ve ayrıca akma dayanımının 1.15 katından daha küçük olamaz | | | | |
| **Akma dayanımı MPa** | **min** | 300 | 400 | 500 | 400 | 500 |
| | **maks** | - | - | - | 525 | 625 |

Ülkemizde ise TS 500 (Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları) ve ilgili olan TS708 nolu standartında çeliklerin mekanik özellikleri şöyle sınıflandırılmıştır, bkz. Tablo 2.7.

**Tablo 2.7** Türkiye'de Kullanılan Çeliklerin Mekanik Özellikleri (TS 708)

| **Mekanik Özellikler** | **Donatı çubukları** | | | | | **Hasır donatı** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Doğal sertlikte** | | | **Soğukta işlem görmüş** | | |
| | **S220a** | **S420a** | **S500a** | **S420b** | **S500bs** | **S500bk** |
| **Minimum akma day. $f_{yk}$ (MPa)** | 220 | 420 | 500 | 420 | 500 | 500 |
| **Minimum kopma day. $f_{su}$ (MPa)** | 340 | 500 | 550 | 550 | 550 | 550 |
| **Φ ≤ 32 Minimum kopma uzaması $\varepsilon_{su}$(%)** | 18 | 12 | 12 | 10 | 8 | 5 |
| **Minimum kopma uzaması $\varepsilon_{su}$(%)** | 18 | 10 | 10 | 10 | 8 | 5 |

Bu çalışma kapsamında kullanılan YSDOÇ çeliği de Tablo 2.7 de yer alan S500a çeliğine yakın mekanik özelliklere sahip doğal sertlikte, malzeme özellikleri değiştirilerek dayanımı arttırılmış bir çeliktir.

Yeni İtalyan Yönetmeliği'nde B450C olarak tanımlanmış donatı çeliğinin mekanik özellikleri Tablo 2.8 de verilmiştir.

**Tablo 2.8** İtalya'da Kullanılan B450C Çeliğinin Mekanik Özellikleri

| **Özellik** | **Birimler** | **Karakteristik değer** |
|---|---|---|
| **$R_e$** | **MPa** | ≥450 |
| **$R_m/R_e$** | **(-)** | ≥1.13 ≤1.35 |
| **$A_{gt}$** | **%** | ≥7.0 |
| **$(R_e)/(R_{e,nom})$** | **(-)** | ≤1.25 |

Tabloda yer alan (Re)/(Re,nom) ifadesi akma dayanımının şartnamede belirtilen değerinin akma dayanımının deneysel olarak elde edilen değerine oranını belirtmektedir.

Yunanistan'da yayınlanan Elot 1421-3 Yönetmeliğinin 2. kısmında B500C olarak tanımlanmış sismik özelliklere sahip çeliğin çekme özellikleri ve limit değerleri Tablo 2.9 ve Tablo 2.10 da verilmiştir.

**Tablo 2.9** Yunanistan'da Kullanılan B500C Çeliğinin Karakteristik Özellikleri

| **Özellik** | **Birimler** | **Değer** |
|---|---|---|
| **Akma dayanımı $R_e$,** | **MPa** | ≥500 |
| **Oran $R_m/R_e$** | **(-)** | ≥1.15 ≤1.35 |
| **Maksimum yüke karşılık gelen toplam uzama oranı($A_{gt}$)** | **(%)** | ≥7.5 |
| **$R_{e,act}/R_{e,nom}$** | **(-)** | ≤1.25 |

**Tablo 2.10** Yunanistan'da Kullanılan B500C Çeliğinin Sınır Değerleri

| **Özellikler** | **Birimler** | **Mutlak minimum** | **Mutlak maksimum** |
|---|---|---|---|
| **$R_e$** | **MPa** | 485 | 640 |
| **$R_m/R_e$** | **(-)** | 1.12 | 1.37 |
| **$A_{gt}$** | **(%)** | 6 | - |

SI 4466 nolu İsrail yönetmeliğinin 3. bölümünde verilen özellikler Tablo 2.11 de yer almaktadır.

**Tablo 2.11** İsrail'de Kullanılan Çeliğin Mekanik Özellikleri

| **Akma day. $f_{yk}$** | | **Çekme dayanımı $f_{tk}$** | **Kopmadaki uzama $\varepsilon_{sk}$ $L_0$=10d(*)** | **Oran ($f_{tk}/f_{yk}$)** |
|---|---|---|---|---|
| **(MPa)** | | **(MPa)** | **(%)** | **(-)** |
| **Alt limit** | **Üst limit** | **Alt limit** | **Alt limit** | **Alt limit** |
| 400 | 520 | 500 | 12 | 1.25 |

Norveç sünekliği artırılmış çeliklere, NS3576-3 Yönetmeliği'nde yer vermiştir. Bu yönetmeliğe yeni olarak 3 tip nervürlü çelik eklenmiştir. Bu çelikler B500A, B500B ve B500C olarak tanımlanmıştır. Yönetmelikte mevcut olan çelikler ile son olarak eklenen bu üç tip çelik arasındaki temel fark sünekliktir. B500C çeliği için tanımlanan akma dayanımı alt sınırı 500 MPa'a eşit veya daha büyük olmalıdır. Test sonuçları 475 MPa dan küçük veya 650 MPa dan büyük olmamalıdır. Bu çelik için $A_{gt}$ karakteristik değeri %8, $R_m/R_e$ oranının karakteristik değeri ise 1.15 olarak tanımlanmıştır.

Venezüela'da kullanılan Covenin 316 Yönetmeliği'ne girmiş donatı çeliklerinin isimleri ve akma dayanımları da Tablo 2.12 de verilmiştir.

**Tablo 2.12** Venezüela'da Kullanılan Çeliklerin Akma Dayanımları

| **Çelik İsimleri** | | **S-40** | **S-60** | **S-70** | **W-40** | **W-60** | **W-70** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Akma Day. (MPa)** | **Min** | 275 | 415 | 490 | 275 | 415 | 490 |
| | **Maks** | 275 | 540 | 637 | 353 | 540 | 637 |

Kolombiya'nın NTC 2289 isimli yönetmeliğine girmiş Diaco 60 isimli deprem çeliğinin ise karakteristik mekanik özellikleri Tablo 2.13 de verilmiştir.

**Tablo 2.13** Kolombiya'da Kullanılan Çeliklerin Mekanik Özellikleri

| **Özellik** | **Birimler** | |
|---|---|---|
| **Minimum Çekme Dayanımı** | **(MPa)** | 550 |
| **Minimum Akma Dayanımı** | **(MPa)** | 420 |
| **Maksimum Akma Dayanımı** | **(MPa)** | 540 |
| **Çekme Day./Akma Day.(min)** | | 1.25 |

Tablo 2.14 de ise İspanya'da kullanılan, UNE 36065/2000 Yönetmeliği'nde yer alan, donatı çeliklerinin mekanik özellikleri verilmiştir. Bu tabloda B400S ve B500S çelikleri normal çeliğe, B400SD ve B500SD çelikleri ise deprem çeliklerine karşı gelmektedir.

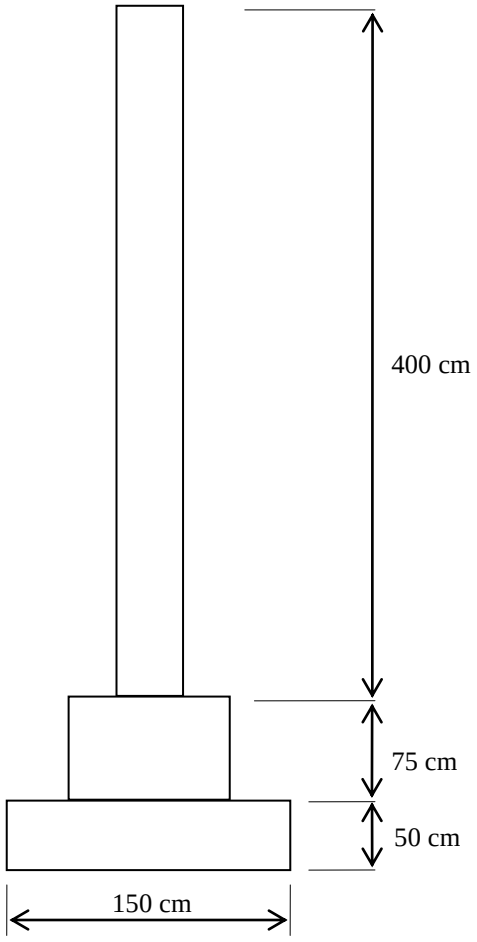
**Tablo 2.14** İspanya'da Kullanılan Çeliklerin Mekanik Özellikleri

| **İsim** | **Çelik Sınıfı** | **Elastiklik limiti** | **Kopma dayanımı** | **Kopma uzaması** | **Uzama** $\varepsilon_{min}$ | $f_s/f_y$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **MPa** | **MPa** | **(%)** | **(%)** | |
| **B 400 S** | Kaynaklanabilir | ≥400 | ≥440 | ≥14 | - | ≥1.05 |
| **B 500 S** | | ≥500 | ≥550 | ≥12 | - | ≥1.05 |
| **B 400 SD** | Özel karakteristikte süneklik verilerek kaynaklanabilir | ≥400 | ≥480 | ≥20 | ≥9 | ≥1.20 ≤1.35 |
| **B 500 SD** | | ≥500 | ≥575 | ≥16 | ≥8 | ≥1.15 ≤1.35 |

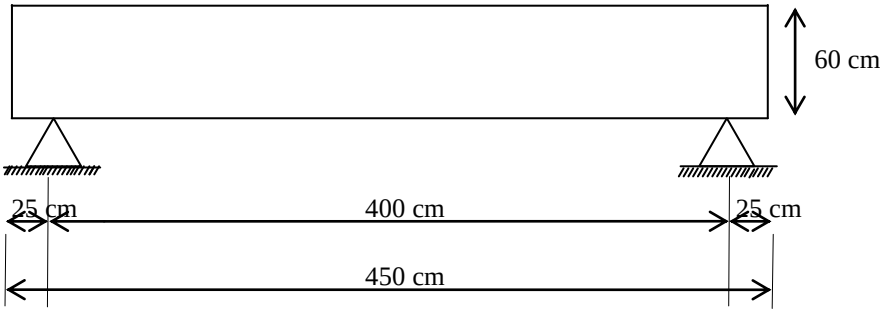
# 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

## 3.1 Giriş

Bu çalışma kapsamında kolon ve kiriş elemanları deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında 2 adet kolon ve 2 adet kiriş denenmiştir. Kiriş ve kolon deneylerinde kullanılan numuneler 1/1 ölçeklidir. Hazırlanan numunelerin 1/1 ölçekli olarak seçilmesi, deneysel çalışma sonucunda dayanım, süneklik kapasiteleri ve enerji tüketme kapasiteleri gibi büyüklüklerin gerçekçi olarak belirlenmesini sağlamıştır. Kullanılan kolon ve kiriş numunelerine ait genel boyutlar sırası ile Şekil 3.1 ve Şekil 3.2 de verilmiştir.




**Şekil 3.1:** Kolon Numuneleri Genel Boyutlar




**Şekil 3.2:** Kiriş Numuneleri Genel Boyutlar

Kolon deneyleri İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında, kiriş deneyleri ise Boğaziçi Üniversitesi Yapı Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Üretilen her tip numunenin birinde BÇIIIa birinde ise YSDOÇ çeliği kullanılmıştır. Bu iki adet numune boyutları ve beton kalitesi bakımından eşdeğer olup değişken tek parametre kullanılan çeliğin cinsidir. İkişer numune deneysel bir karşılaştırma olması açısından kendi içlerinde aynı deney düzeneğinde ve aynı ölçüm noktalarından ölçüm alınmak suretiyle denenmiştir. Kolon ve kiriş numune çiftlerinin her ikisi kendi içerisinde aynı yükleme protokolleriyle yüklenmişlerdir. Tüm elemanlarda kullanılan beton C25 kalitesindedir. YSDOÇ ve BÇIIIa çeliği ile ilgili malzeme özellikleri Tablo 3.1 de verilmiştir.

**Tablo 3.1** YSDOÇ ve BÇIIIa Çeliğinin Mekanik Özellikleri

| | **Akma. Day.** | **Çekme Day.** | **$A_{gt}$** | **$R_e/R_m$** |
|---|---|---|---|---|
| **Birimler** | **(MPa)** | **(MPa)** | **(%)** | |
| **YSDOÇ** | 500-650 | 600 | 8 | >1.15-<1.35 |
| **BÇIIIa** | 420 | 500 | 6 | |

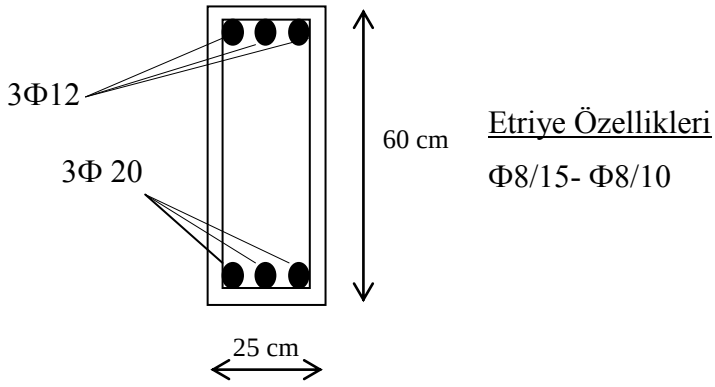
Betonarme numunelerin üretiminde kullanılan beton ve çelikler için yapılan malzeme deneyleri ve deneylerin ayrıntısı EK A da yer almaktadır.

Aşağıdaki bölümlerde her tür eleman için üretim aşaması, numune donatı detayları, deney düzenekleri, ilerleyişi ve deney sonuçlarıyla ilgili bilgi verilmiştir.

## 3.2 NUMUNELER İÇİN ÜRETİM AŞAMALARI

### 3.2.1 Kiriş Numuneleri

Kesit boyutları 25x60 cm ve toplam boyu 450 cm olan ve YSDOÇ ve BÇIII çelikleri ile üretilmiş 2 adet betonarme kiriş Boğaziçi Üniversitesi Yapı Laboratuvarında denenmiştir. Kiriş numuneleri 4.0 m açıklık oluşturacak şekilde basit mesnetli olarak denenmiştir. Bilindiği üzere betonarme çerçevelerde kirişler kolon aksları boyunca ve kolonlara entegre biçimde üretilmektedir. Genelde kirişler üzerinde oluşan sıfır moment bölgeleri kolon yüzlerinden yaklaşık 0.10-0.15L mesafededir. Burada L kirişin serbest açıklığını göstermektedir. Bu deneyin amacı pozitif moment bölgesindeki davranışı incelemektir. Buna göre yaklaşık 0.8L= 4.0 m olduğuna göre, incelenen kiriş gerçek yapıda 5.0 m açıklıklı kirişe karşı gelmektedir. Kiriş numunelerinde C25 betonu kullanılmıştır. 25x60 cm kesitli betonarme kirişe ait tipik kesit Şekil 3.3'de verilmiştir. Eğilme göçme modunu esas alan ve dolayısı ile çekme bölgesine yerleştirilen donatının maksimum performansını yakalamayı hedefleyen bir tasarım yapılmıştır. Kesme kuvveti etkisine karşı gereken önlemler alınmıştır.




**Şekil 3.3:** Tipik Kiriş Kesiti

Şekil 3.4 ve Şekil 3.5 de kiriş numunelerinin üretim aşamasında çekilmiş fotoğrafları yer almaktadır.



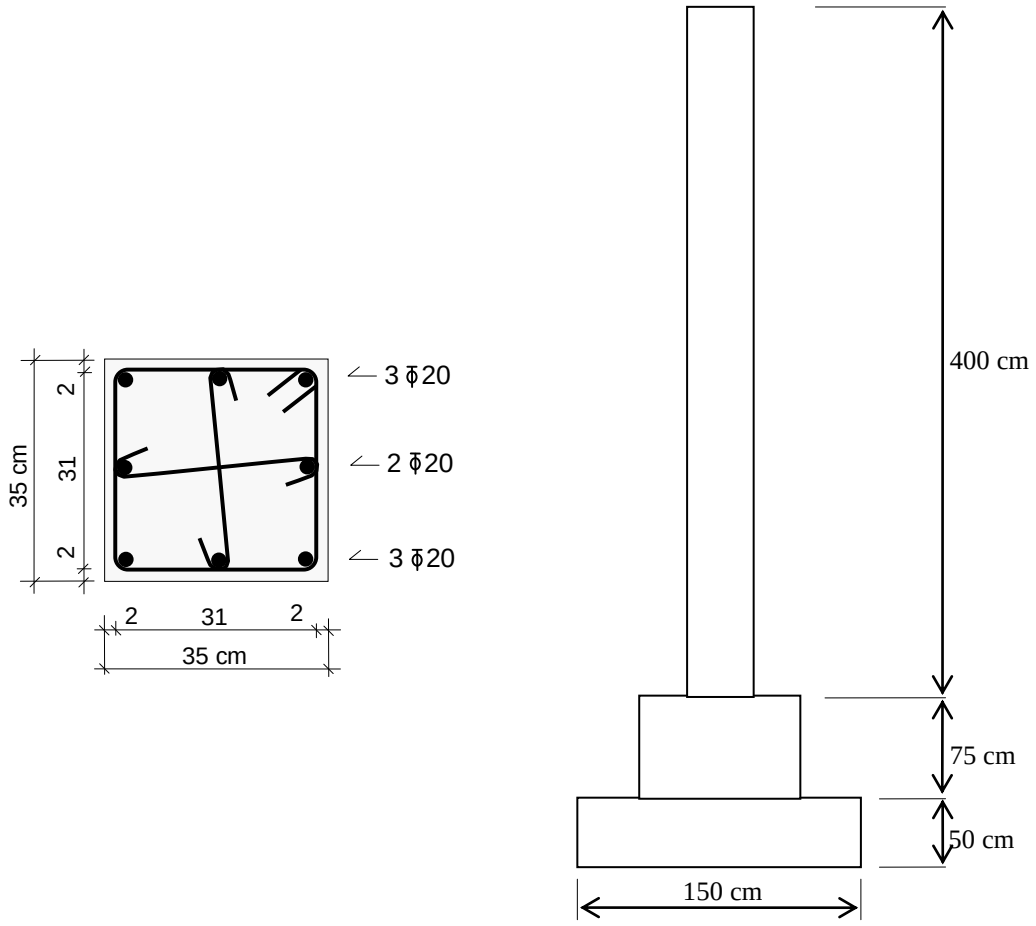
**Şekil 3.4:** Kiriş Numunelerinin Kalıp Aşamasındaki Görünümü



**Şekil 3.5:** Kiriş Numunelerinin Genel Görünümü

### 3.2.2 1/1 Ölçekli Kolon Numuneleri

İki adet 1/1 ölçekli kolon numunesi Boğaziçi Üniversitesi Yapı Laboratuvarında soket temel ve kolon olarak iki parça halinde üretilmiştir. İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında ise soket temel içine kolon yerleştirilmiştir. Şekil 3.6 dan görüldüğü üzere kolonlar kare kesit olup, kenar boyutları 35x35 cm dir. Serbest kolon yüksekliği 400 cm dir.

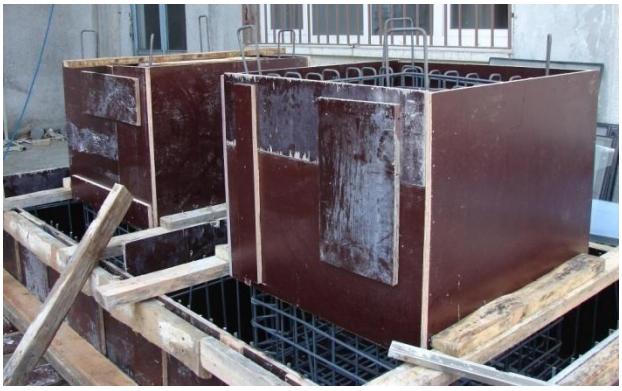



**Şekil 3.6:** Kolon Numunesi Boyutları

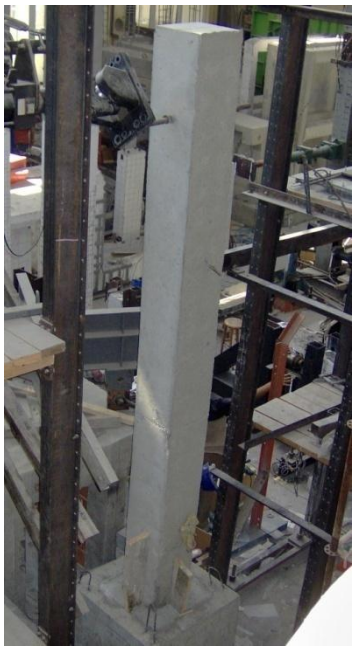
Kolon numunelerinin üretiminde C25 kalitesinde beton kullanılmıştır. Eğilme göçme modunun baskın olmasından dolayı muhtemel plastik mafsal bölgesinde etriye sıklaştırması ve sargılama yapılmıştır. Kolon sarılma bölgesinde Φ8/10, uç bölgesinde ise Φ8/20 etriye ve çiroz kullanılmıştır. Enine ve boyuna donatı olarak kolonlardan bir tanesinde YSDOÇ diğerinde ise BÇIII türü çelik kullanılmıştır. Kolon numunelerinin üretiminin değişik aşamasında çekilmiş fotoğraflar Şekil 3.7 Şekil 3.8 ve Şekil 3.9 da verilmiştir.



**Şekil 3.7:** Kolon Donatılarının Görünümü



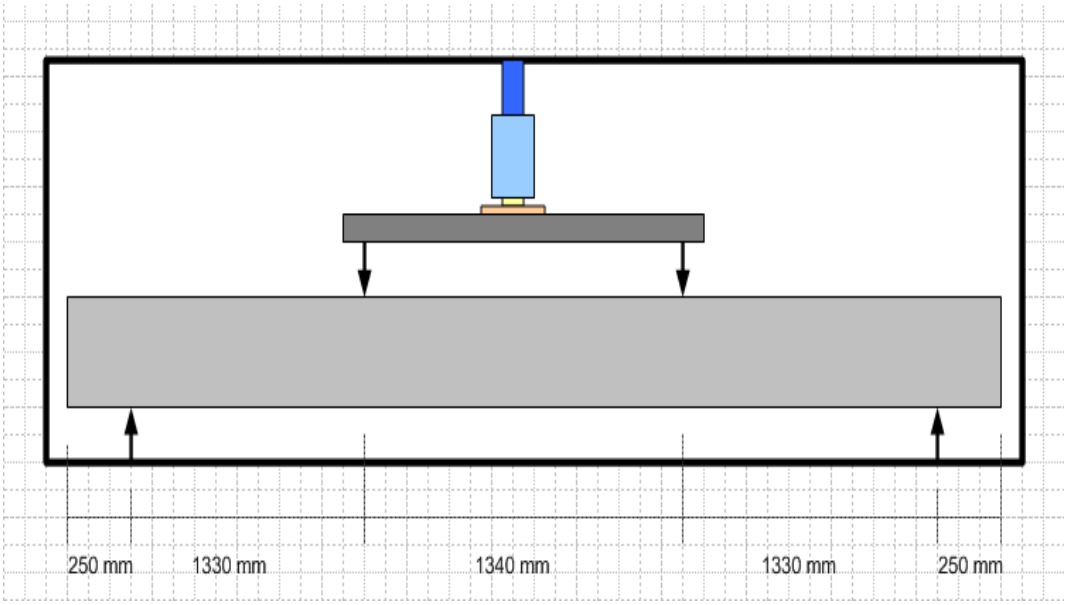
**Şekil 3.8:** Soket Temel Kalıplarının Genel Görünümü



**Şekil 3.9:** Kolon Genel Görünüm

### 3.3 KİRİŞ DENEYLERİ

Kiriş deneyleri 2 numuneyi kapsamakta olup bu deneylerden ilkinde BÇIII donatı çeliğiyle üretilmiş BN-1 isimli kiriş numunesi denenmiştir. İkinci deneyde ise YSDOÇ donatı çeliği ile üretilmiş BS-1 numunesinin deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 3.10 da gösterildiği gibi, dört nokta deneyi biçiminde kirişe üstten 1/3L mesafesinde etkiyen eşit şiddetli iki tekil yük ile bunları karşılayan mesnet reaksiyonlarından oluşmaktadır. Tekil yükler rijit kirişin mesnet reaksiyonları olarak etkitilmiştir. Bu yükleme biçimi yayılı yük etkisinde oluşan moment diyagramına yakındır.




**Şekil 3.10:** Kiriş Deney Düzeneği

Hidrolik kriko ile uygulanan yüklemeyi ölçen yük ölçerden başka, deney numunesinin değişik kesitlerinde oluşan düşey yerdeğiştirmeleri ve kesit dönmelerini ölçmek üzere elektronik yerdeğiştirme ölçerler (LVDT) ile boyuna donatılarda gerçekleşen şekildeğiştirmeleri ölçmek üzere şekildeğiştirme ölçerler kullanılmıştır.

Aşağıdaki bölümde sırası ile BN-1 ve BS-1 numunelerinin deneylerine ait ayrıntılı bilgiler verilmiştir.

### 3.3.1 BN-1 Deneyi

#### 3.3.1.1 BN-1 Deney Düzeneği

Şekil 3.11 de deney düzeneği genel görünümü, yükleme kirişi ve ölçüm düzeneği görülmektedir.



**Şekil 3.11:** Kiriş Deneyi Ölçüm Düzeneği Görünümü

### 3.3.1.2 Yükleme ve Hasar Dağılımı

Deney esnasında kirişe yalnız düşey yük etkitilmiştir. Numunede çatlakların oluşmaya başlamasıyla beraber çatlaklar işaretlenmiş ve çatlak kalınlığı ölçümleri yapılmıştır. Kirişin göçtüğü aşamaya kadar düşey yük arttırılmaya devam etmiştir. Bu deney esnasında kirişin orta noktası 67 mm ye kadar düşey yerdeğiştirme yapmıştır. Yük düşey yerdeğiştirme ilişkisinde gerçekleşen en büyük yük 380 kN civarındadır. Tablo 3.2 de kirişin çeşitli düşey yerdeğiştirme adımları ve bu yerdeğiştirme değerlerine karşılık gelen yük değerleri gösterilmiştir.

**Tablo 3.2** BN-1 Numunesi için Düşey Yerdeğiştirme ve Yük Değerleri

| **Düşey Yerdeğiştirme** | **Yük** |
|---|---|
| **(mm)** | **(kN)** |
| 10 | 256.9 |
| 20 | 332.7 |
| 30 | 343.8 |
| 40 | 347.0 |
| 50 | 358.3 |
| 60 | 377.0 |
| 67 | 361.5 |

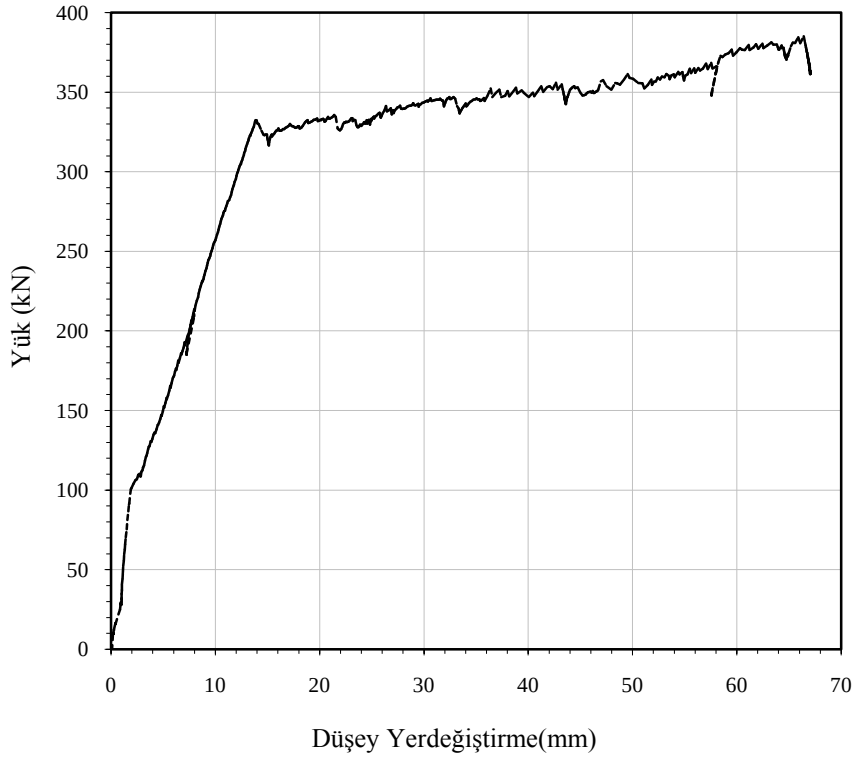
Mevcut yapı yönetmeliklerinin öngördüğü sehim sınırları dikkate alındığında, kiriş için örneğin L/200 = 400/200 = 2 cm sehim seviyesinde BN-1 numunesinde boyuna donatılar akmış ve numunenin bu seviyede taşıdığı yük 332.7 kN olmuştur. Şekil 3.12 de kirişte oluşan çatlaklar gösterilmiştir. Çatlakların sabit moment bölgesinde düşey, kenar bölgelerde ise diyagonal olduğu görülmektedir. BN-1 numunesinde gerçekleşen en büyük çatlak genişliği 3.5 mm düzeyinde olmuştur.



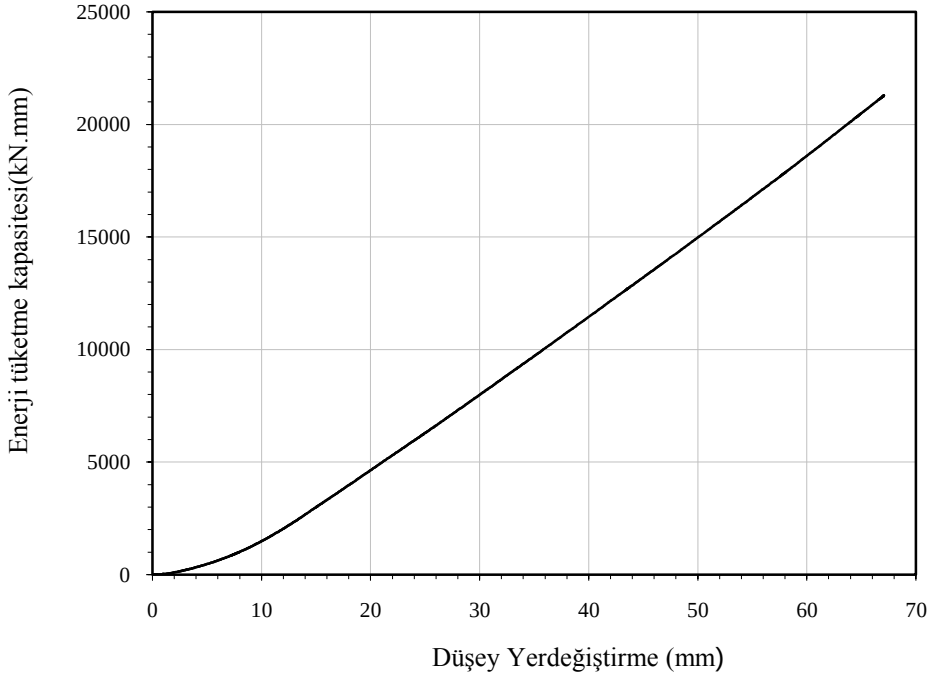

**Şekil 3.12:** BN-1 Numunesinde Oluşan Çatlaklar

### 3.3.1.3 Deney Sonuçları

Deney sırasında elde edilen veriler işlendikten, gerekli düzeltmeler yapıldıktan ve kullanılabilir data dosyalarına dönüştürüldükten sonra, kirişe ait yük düşey yerdeğiştirme eğrisi çizilmiştir ve Şekil 3.13 de verilmiştir. Kirişe ait düşey yerdeğiştirme-tüketilen enerji ilişkisi ise Şekil 3.14 de gösterilmiştir. Şekil 3.14'den izlendiği gibi, L/200 (2 cm) sehim sınırı düzeyinde tüketilen toplam enerji 4650 kN.mm iken, göçmeye yakın durumda tüketilen toplam enerji miktarı 20600 kN.mm olmuştur.

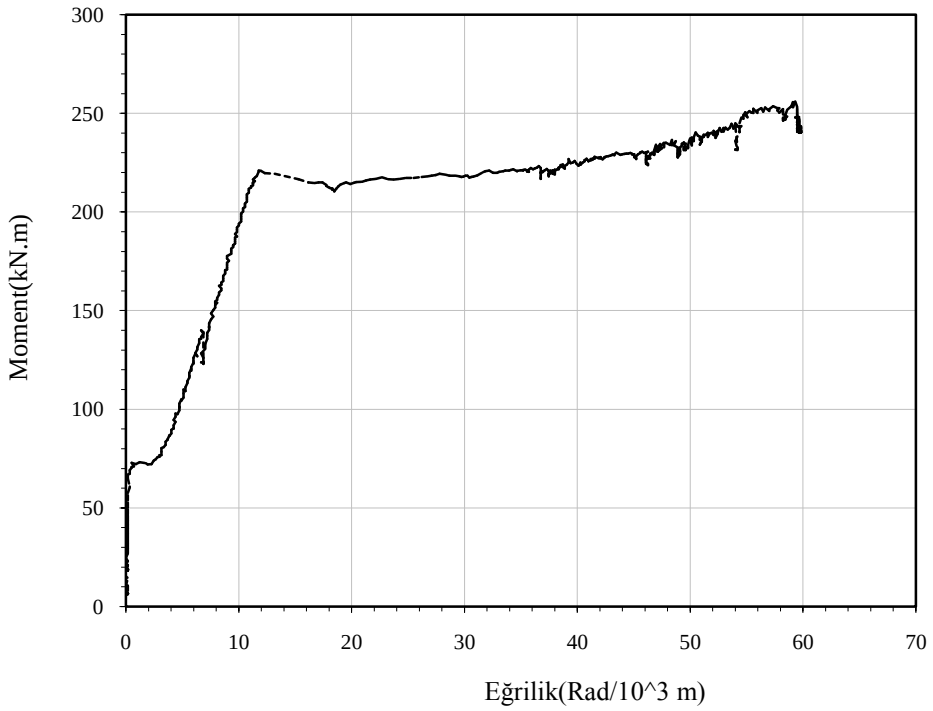



**Şekil 3.13:** BN-1 Numunesi Yük-Düşey Yerdeğiştirme Eğrisi




**Şekil 3.14:** BN-1 Numunesi Düşey Yerdeğiştirme-Tüketilen Toplam Enerji Grafiği

Kirişin simetri ekseni üzerine yerleştirilen yerdeğiştirme ölçerlerden hareketle çizilen deneysel moment-eğrilik ilişkisi Şekil 3.15 de verilmiştir.




**Şekil 3.15:** BN-1 Numunesi Orta Kesitte Moment Eğrilik İlişkisi

### 3.3.2 BS-1 Deneyi

#### 3.3.2.1 BS-1 Deney Düzeneği

BN-1 numunesi deney düzeneğinin aynısıdır. Şekil 3.16 da kullanılan ölçüm düzeneğinin ayrıntıları görülmektedir.



**Şekil 3.16:** BS-1 Deneyi Ölçüm Düzeneği

### 3.3.2.2 Yükleme ve Hasar Dağılımı

BS-1 deneyinde de kirişe sadece düşey yük tatbik edilmiştir. Düşey yük kirişin göçtüğü aşamaya kadar arttırılmıştır. BS-1 deneyinde gerçekleşen en büyük sehim 85 mm olmuştur. Yüklemenin son aşamalarında basınç bölgesinde betonda ezilme ve ayrılmalar meydana gelmiştir. Betonda meydana gelen ezilmeler Şekil 3.17 de görülmektedir. Bu deney esnasında kirişte meydana gelen en büyük çatlak genişliği yaklaşık 6 mm olmuştur. BN-1 numunesinde ulaşılan en büyük yerdeğiştirme 67 mm iken, BS-1 numunesinde 85 mm olmuştur. Çatlaklar incelendiğinde ise BN-1 deneyinde olduğu gibi çatlakların sabit moment bölgesinde düşey ve mesnetlere yakın kısımlarda diyagonal çatlak şeklinde oluştuğu gözlemlenmektedir.



**Şekil 3.17:** BS-1 Deneyi Basınç Bölgesinde Hasar Görünümü

Yük-düşey yerdeğiştirme ilişkisinde en büyük dayanım yaklaşık 443 kN olmuştur. Tablo 3.3 de kirişin çeşitli düşey yerdeğiştirme aşamalarında taşıyabildiği yük değerleri verilmiştir.

Mevcut yapı yönetmeliklerinin öngördüğü sehim sınırlarından hareketle, kiriş için L/200 = 400/200 = 2 cm sehim seviyesinde BS-1 numunesinde de BN-1 numunesinde olduğu gibi boyuna donatıların aktığı tespit edilmiş ve numunenin bu yerdeğiştirme seviyesinde taşıdığı yük 424 kN olmuştur.

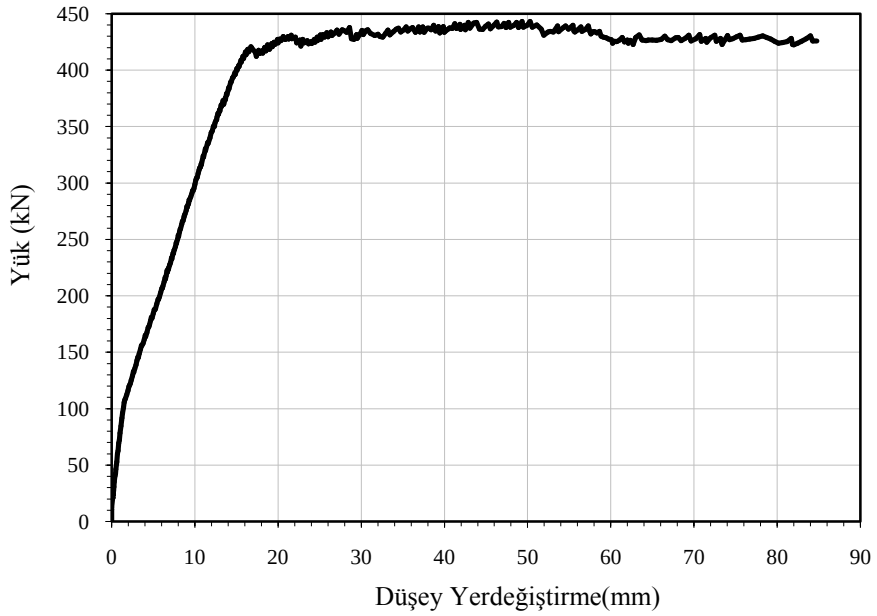
**Tablo 3.3** BS-1 Numunesi İçin Düşey Yerdeğiştirme ve Yük Değerleri

| **Düşey Yerdeğiştirme** | **Yük** |
|---|---|
| **(mm)** | **(kN)** |
| 10 | 298.8 |
| 20 | 424.1 |
| 30 | 435.1 |
| 40 | 434.8 |
| 50 | 443.2 |
| 60 | 427.0 |
| 70 | 427.8 |
| 80 | 423.9 |
| 84.8 | 425.9 |

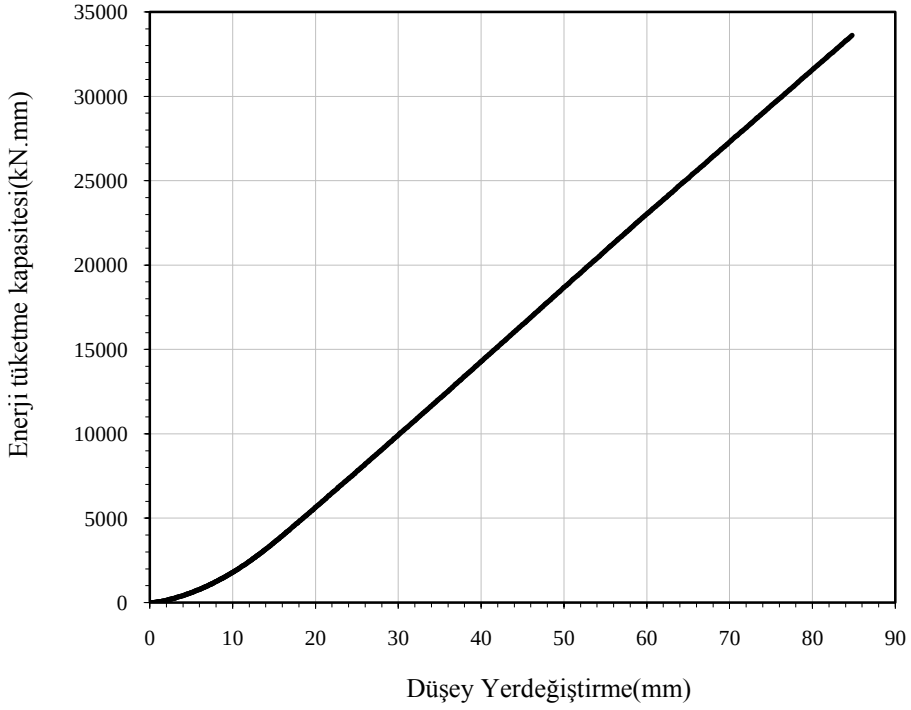
### 3.3.2.3 Deney Sonuçları

Deney sırasında toplanan veriler işlenip gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra kiriş için yük ve orta noktadaki düşey yerdeğiştirme eğrisi çizilmiştir ve Şekil 3.18 de gösterilmiştir. Grafikten de izlendiği gibi kiriş yaklaşık 443 kN luk en büyük yük seviyesine ulaşmıştır. Yük değerindeki artış yaklaşık 17 mm lik yerdeğiştirme seviyesine kadar doğrusal olmuş bu aşamadan sonra kirişin sabit yük altında düşey yerdeğiştirmesi artmış ve 84.7 mmlik yerdeğiştirme de deneye son verilmiştir.

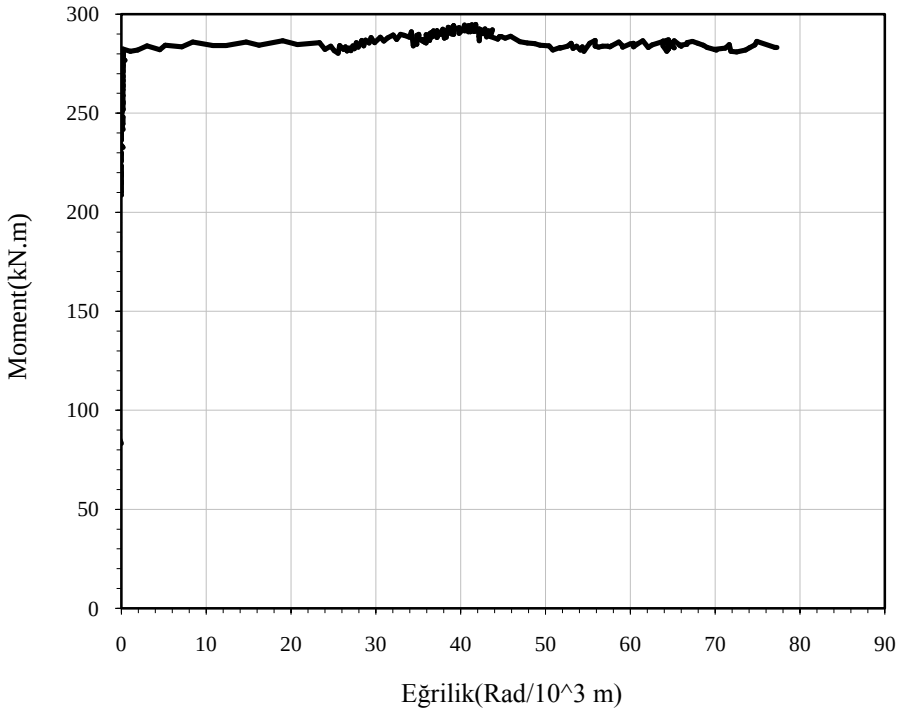
Şekil 3.19 da, BS-1 numunesi için düşey yerdeğiştirme tüketilen toplam enerji grafiği verilmiştir. BS-1 numunesi 84.7 mm lik düşey yerdeğiştirme değerine ulaştığında 33600 kN.mm lik enerji tüketmiştir. Şekil 3.20 de BS-1 numunesinde deneysel olarak elde edilen orta kesit moment eğrilik ilişkisi verilmiştir.




**Şekil 3.18:** BS-1 Numunesi Yük-Düşey Yerdeğiştirme Eğrisi




**Şekil 3.19:** BS-1 Numunesi Düşey Yerdeğiştirme-Tüketilen Toplam Enerji Grafiği




**Şekil 3.20:** BS-1 Numunesi Orta Kesit Moment Eğrilik İlişkisi

### 3.3.3 BN-1 ve BS-1 Deneylerinin Karşılaştırılması

Bu iki deneyde numuneler dayanım, enerji tüketim kapasitesi, rijitlik, boyuna donatıların davranışları bakımından karşılaştırılmıştır ve ulaşılan sonuçlar aşağıda verilmiştir. BN-1 ve BS-1 numunelerinin yük-yerdeğiştirme ve enerji-yerdeğiştirme eğrileri karşılaştırmalı olarak sırasıyla Şekil 3.21 ve Şekil 3.22 de verilmiştir.

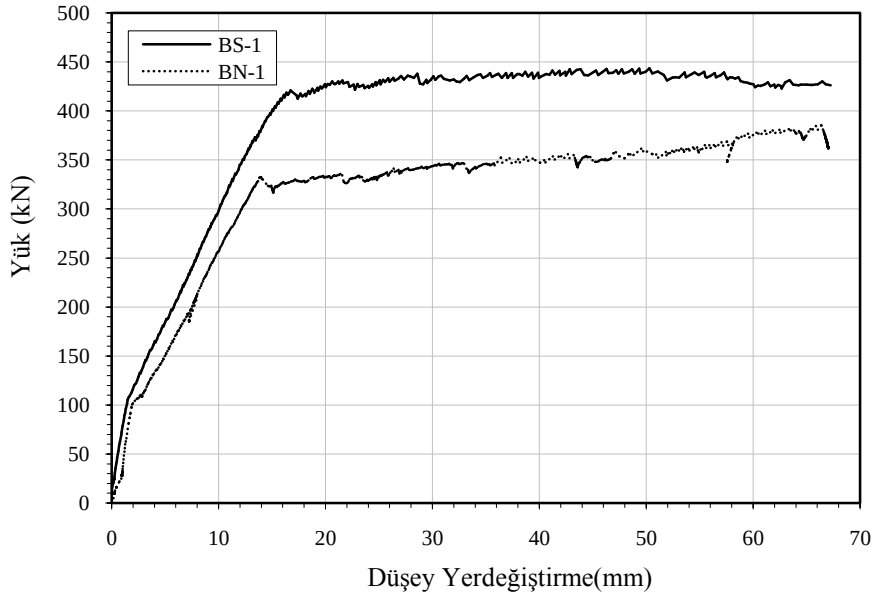
L/200=2 cm sehim sınırı esas alındığında, BN-1 numunesinin bu seviyedeki dayanımı 332.7 kN iken, YSDOÇ çeliği ile üretilmiş BS-1 numunesinin dayanımı 424.1 kN dur, bu sehim seviyesinde BS-1 numunesinde BN-1 numunesine göre yaklaşık %25 lik dayanım farkı ve aynı sehim seviyesinde 82 kN luk bir yük farkı oluştuğu görülmüştür. Yük yerdeğiştirme ilişkilerindeki ulaşılan en büyük yük seviyeleri ise, BN-1 ve BS-1 numuneleri için sırasıyla 380 kN ve 440 kN civarındadır. Bu farklılık akmadan sonra aynı şekildeğiştirme durumu için, YSDOÇ donatısının dayanımının daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

Numunelerin enerji tüketim kapasiteleri karşılaştırıldığında, 2 cm lik sehim sınırında BN-1 numunesinin enerji tüketimi 4622 kN.mm iken, bu değer BS-1 numunesinde 5622 kN.mm dir numunelerin enerji tüketim kapasiteleri arasında yaklaşık %21 lik

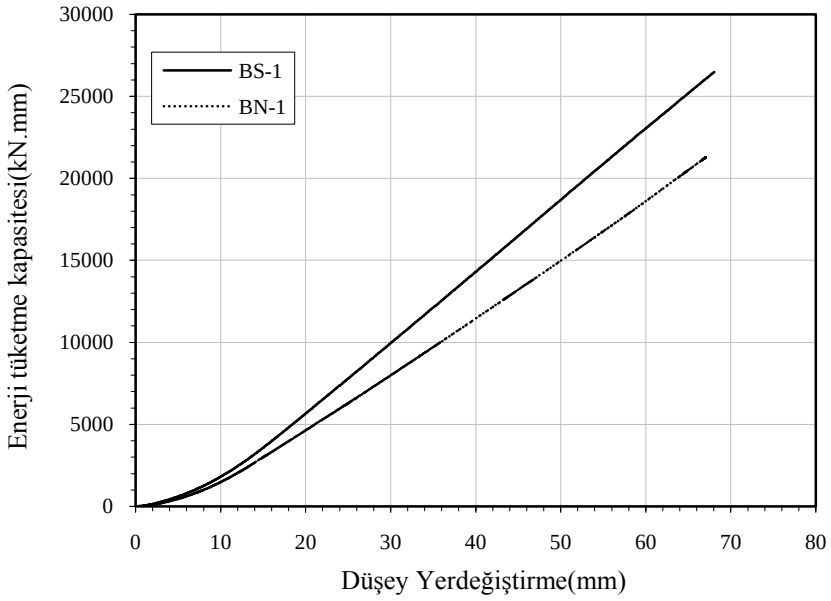
fark oluştuğu görülmektedir. BN-1 numunesinde göçmeye yakın durumda, 65 mm lik sehim düzeyinde enerji tüketimi 20600 kN.mm iken, BS-1 numunesinde 65 mm lik sehimde enerji tüketimi yaklaşık 25164 kN.mm olmuştur. Bu da YSDOÇ donatı çeliğinin enerji tüketme yeteneği bakımından BÇIII donatı çeliğine göre daha iyi performans sergilediğini göstermektedir.

Göçmeye yakın aşamalarda YSDOÇ çeliği ile üretilmiş BS-1 numunesi ulaşılan en büyük kiriş taşıma yükünü koruyarak sünek davranmıştır. BÇIII çeliği ile üretilmiş BN-1 numunesi ise kısa bir akma bölgesinin ardından pekleşme bölgesine girmiştir.

Kiriş deneylerinde ulaşılan en büyük yerdeğiştirme düzeyinde donatılarda ölçülen şekildeğiştirme değerlerinin ortalama 35000 mμ civarında olduğu tesbit edilmiştir. Ek A da sunulan, donatı çeliği çekme deneylerinde elde edilen sonuçlara göre, 30000 mμ şekildeğiştirme düzeyinde YSDOÇ donatısı dayanım ve enerji yutma kapasitesi açısından BÇIII çeliğine göre daha iyi bir performans sergilemiştir. BN-1 ve BS-1 numunelerinin yük-yerdeğiştirme ve enerji tüketme kapasiteleri arasındaki farkın temel sebebinin bu olduğu düşünülmektedir.



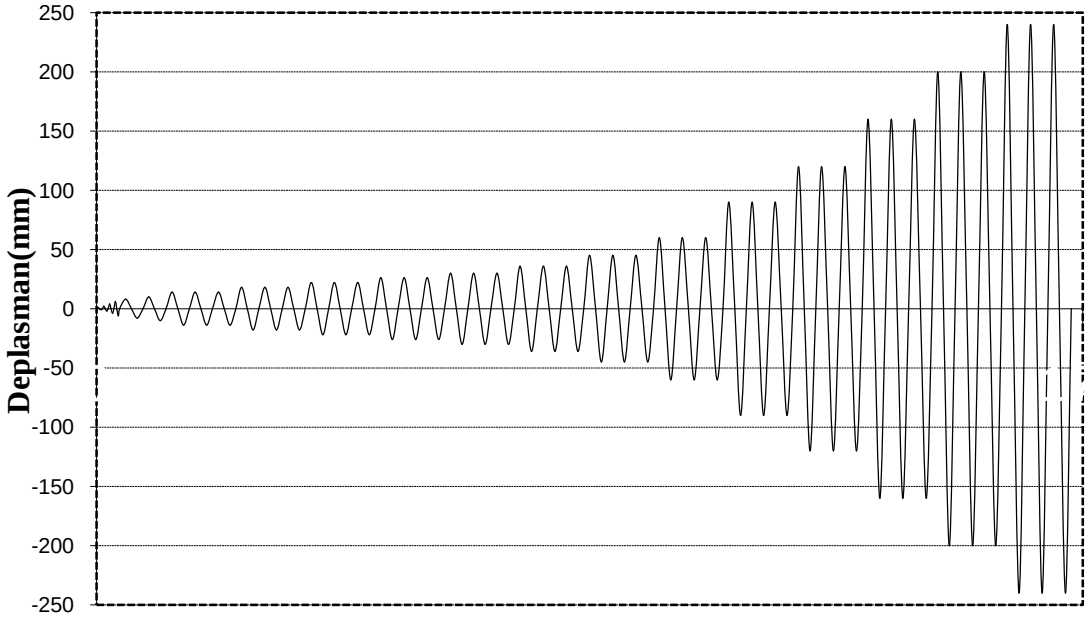

**Şekil 3.21:** Kirişlerde Karşılaştırmalı Yük-Yerdeğiştirme Eğrileri



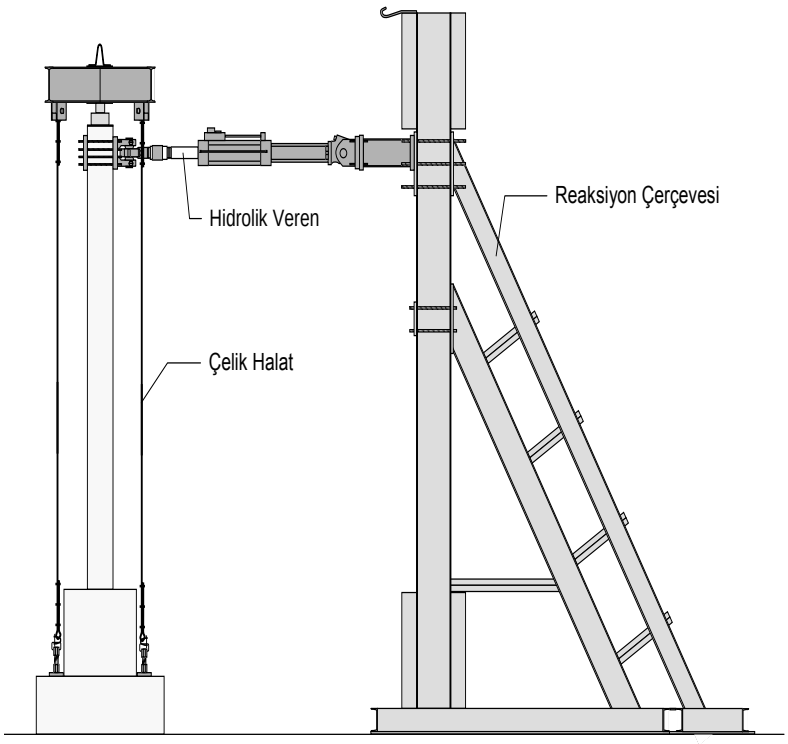

**Şekil 3.22:** Kirişlerde Karşılaştırmalı Enerji Yerdeğiştirme Eğrileri

## 3.4 1/1 ÖLÇEKLİ KOLON DENEYLERİ

1/1 ölçekli kolon deneyleri 2 numuneyi kapsamaktadır, bu numunelerden birincisi BÇIIIa donatı çeliğiyle üretilmiş PCN-1 isimli numune ikinci ise yüksek dayanım ve süneklik özelliklerine sahip YSDOÇ donatı çeliği ile üretilmiş PCS-1 numunesidir. Her iki numunede 280 kN luk, yani kesit taşıma kapasitesinin yaklaşık %10.5 ine karşı gelen ($N/N_g$=%10.5) eksenel yük ve tersinir tekrarlı yatay yükler etkisinde denenmiştir. Yükleme protokolü Şekil 3.23 de görülmektedir. Şekil 3.23 den görüldüğü üzere numune 1 mm den başlayarak sırasıyla 2, 4, 6, 8, 10, 14, 18, 22, 26, 30, 36, 45, 60, 90, 120, 160, 200 ve 240 mm lik yerdeğiştirme düzeylerinde üçer kez itme ve çekme suretiyle bu yükleme protokolüne tabi tutulmuştur. Eksenel yük, numune tepesinden temele ardgerme halatlarıyla gerdirilerek bağlanan, çelik kiriş ile kolon tepe kesiti arasına sıkıştırılmış olan hidrolik kriko yardımıyla verilmiştir, yatay yük ise reaksiyon çerçevesine bağlanmış yatay konumlu hidrolik veren ile etkitilmiştir. Kullanılan deney düzeneği Şekil 3.24 de şematik olarak verilmiştir.




**Şekil 3.23:** 1/1 Ölçekli Kolon Deneyi Yükleme Protokolü

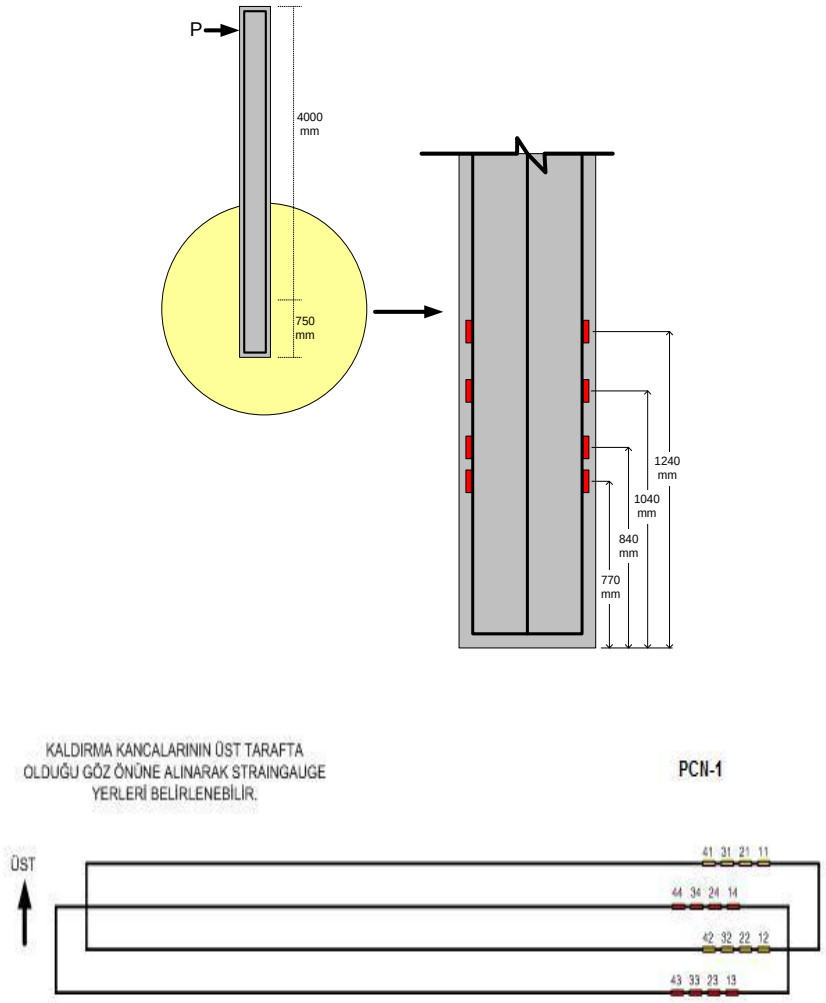



**Şekil 3.24:** Kolon Deneyi Düzeneği

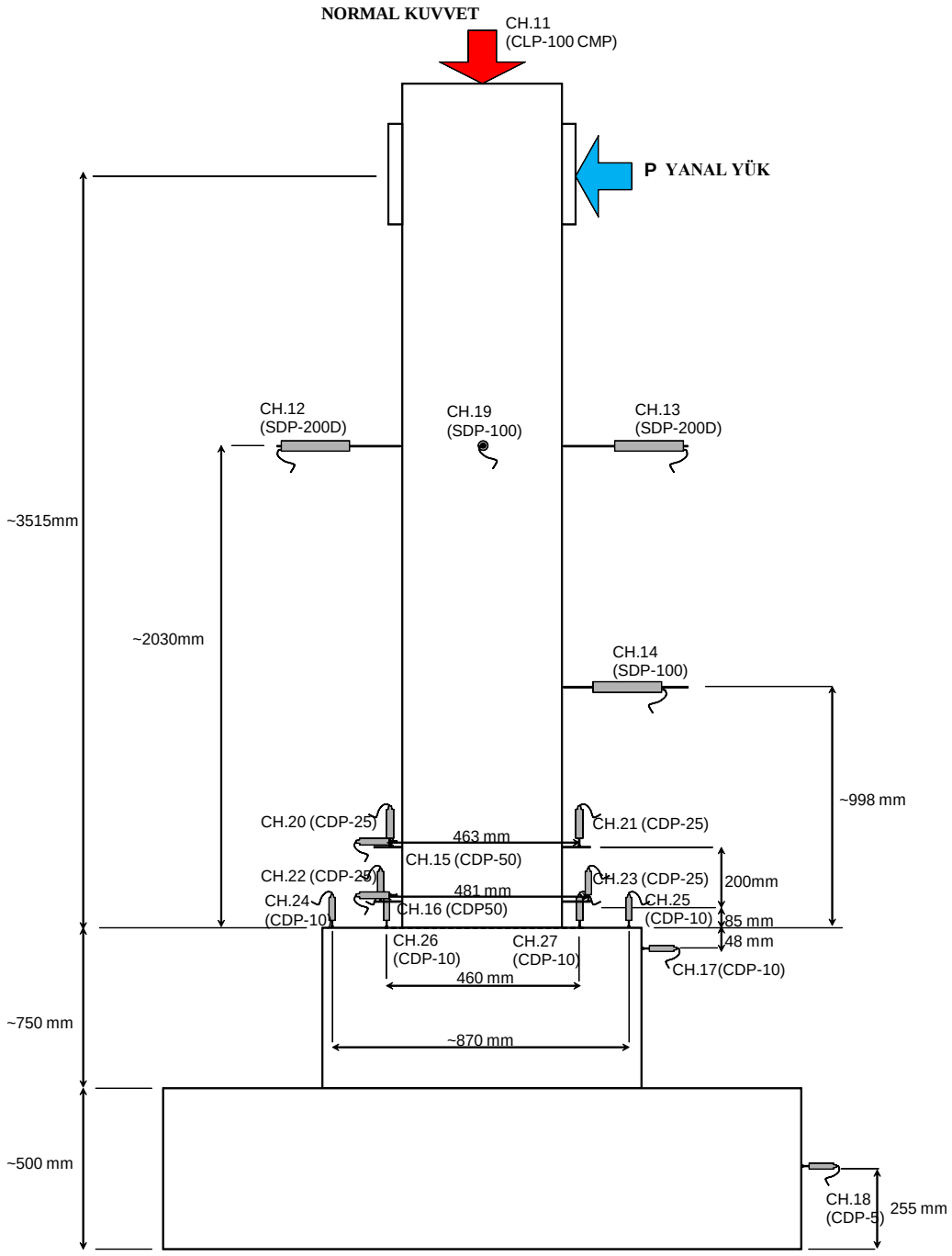
### 3.4.1 1/1 Ölçekli PCN-1 Deneyi

#### 3.4.1.1 Deney Düzeneği

Şekil 3.25 de PCN-1 numunesine ait boyuna donatılara yapıştırılmış şekildeğiştirme ölçerlerin konumları verilmiştir. Boyuna donatıların herbirine 4 er adet şekildeğiştirme ölçer yapıştırılmıştır. Şekil 3.25 de P ile gösterilen kuvvet numunelere deney esnasında etkittirilen yatay yükü ifade etmektedir. Şekil 3.26 da ise bu deney düzeneğine ait yerdeğiştirme ölçerlerin konumları, türleri ve kayıt kanalları yer almaktadır. Şekil 3.26 dan görüldüğü üzere yerdeğiştirme ölçerlerin bir kısmı yatay bir kısmı ise düşey konumludur.




**Şekil 3.25:** PCN-1 Kolonunda Boyuna Donatılara Yapıştırılmış Şekildeğiştirme Ölçerlerin Konumları




**Şekil 3.26:** PCN-1 Deneyi Düzeneği

Şekil 3.27 de deney düzeneğinin genel görünümünü görülmektedir. Şekil 3.28 de ise yerdeğiştirme ölçerler görülmektedir.



**Şekil 3.27:** PCN-1 Deneyi Genel Görünümü



**Şekil 3.28:** PCN-1 Deney Düzeneği ve Yerdeğiştirme Ölçerler

### 3.4.1.2 Yükleme ve Hasar Dağılımı

Deney boyunca numuneye 280kN sabit eksenel yük uygulanmıştır, bu değer yaklaşık kolon eksenel yük taşıma kapasitesinin %10.5i dir. Normal kuvvet ile beraber numuneye itme ve çekme yönünde tersinir tekrarlı bir yerdeğiştirme protokolü uygulanmıştır. Her yerdeğiştirme eşiği üçer kez tekrarlanmıştır. Her yerdeğiştirme eşiğinin son çevriminde deneye ara verilerek oluşan yeni çatlaklar gözlemlenmiş, genişlikleri ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Çatlaklara isim verilirken, itme yüzündeki çatlaklar için a, b, c, d...karakterleri, çekme yüzündeki çatlaklar için de a', b', c',d'... gibi karakterler kullanılmıştır. Bu şekilde oluşturulan, çatlakların isimlerinin ve kalınlıklarının yer aldığı tablolar itme ve çekme yüzü için sırasıyla Tablo 3.4 ve Tablo 3.5 de verilmiştir. Bu tablolarda ilk satır hedef yerdeğiştirmeleri, ikinci satır karşı gelen dayanımı göstermektedir. Yerdeğiştirme değeri (mm) yatay yük değeri (kN)dur,çekme yüzünde oluşan çatlaklarda yerdeğiştirmeler (-) işaretli gösterilmiştir.

**Tablo 3.4** PCN-1 Deneyi İtme Yüzünde Oluşan Çatlaklar

| **Depl.** | **6** | **8** | **10** | **14** | **18** | **22** | **26** | **30** | **36** | **45** | **60** | **90** | **120** | **160** | **200** | **240** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Yük** | **4.9** | **6** | **7.2** | **9.5** | **12** | **14.4** | **16.6** | **18.6** | **21.9** | **26.0** | **31.9** | **43.5** | **48.7** | **52.5** | **53** | **53.9** |
| **a** | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 1.2 | 2.9 | 3.5 | 3.5 |
| **b** | | | | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 1.0 | 2.0 | 2.0 | 2.0 |
| **c** | | | | | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 1.0 | 1.4 | 1.8 |
| **d** | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.3 |
| **e** | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| **f** | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 |
| **g** | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| **h** | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 |
| **i** | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| **j** | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 |
| **k** | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 |
| **l** | | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| **m** | | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 |
| **n** | | | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| **o** | | | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| **p** | | | | | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| **r** | | | | | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 1.4 | 1.4 | 6.0 | 8.0 |
| **s** | | | | | | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 |
| **t** | | | | | | | | | | | | 0.5 | 0.8 | 1.8 | 1.8 | 2.0 |
| **u** | | | | | | | | | | | | | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 |
| **v** | | | | | | | | | | | | | | | 0.4 | 1.2 |
| **y** | | | | | | | | | | | | | | | | <0.1 |

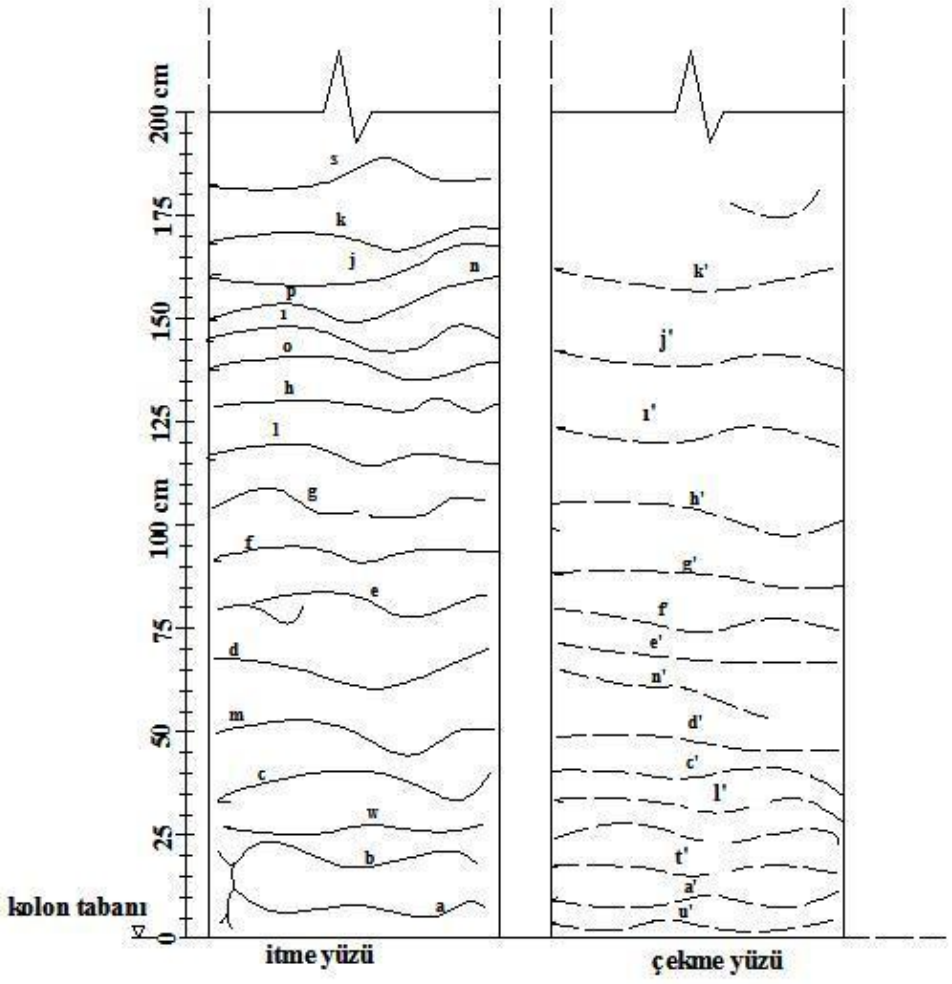
**Tablo 3.5** PCN-1 Deneyi Çekme Yüzünde Oluşan Çatlaklar

| **Depl.** | **8** | **10** | **14** | **18** | **22** | **26** | **30** | **36** | **45** | **60** | **90** | **120** | **160** | **200** | **240** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Yük** | **5.6** | **6.8** | **8.9** | **11** | **13.1** | **15.3** | **17.4** | **20.1** | **24.5** | **30.7** | **42.6** | **49.1** | **51.2** | **53.6** | **55.2** |
| **a'** | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 1.2 | 2.0 | 3.0 | 3.6 |
| **b'** | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.5 | 0.7 | 1.4 | 1.4 |
| **c'** | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.5 | 0.7 | 0.8 |
| **d'** | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.5 | 0.5 |
| **e'** | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| **f'** | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.3 |
| **g'** | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| **h'** | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.4 |
| **i'** | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.3 |
| **j'** | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 |
| **k'** | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 |
| **l'** | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.7 | 0.9 |
| **m'** | | | | | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.2 |
| **n'** | | | | | | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 |
| **o'** | | | | | | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 |
| **p'** | | | | | | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 |
| **r'** | | | | | | | | | | | 0.5 | 1.4 | 1.8 | 2.2 | 2.2 |
| **s'** | | | | | | | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 |
| **t'** | | | | | | | | | | | | 0.1 | 0.7 | 1.2 | 1.4 |
| **u'** | | | | | | | | | | | | | | 0.4 | 1.2 |
| **v'** | | | | | | | | | | | | | | <0.1 | <0.1 |

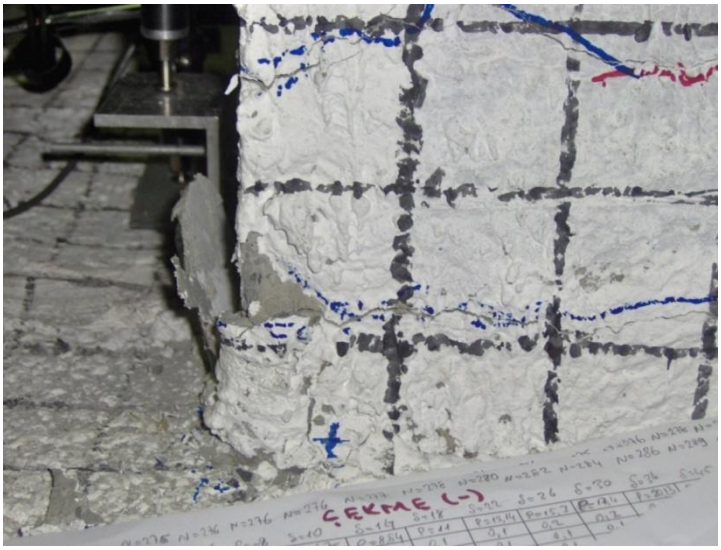
Tablo 3.4 ve Tablo 3.5 te ifade edilen çatlakların konumları da Şekil 3.29 da verilmiştir.

İlk çatlak +6 mm tepe yerdeğiştirmesi seviyesinde oluşmuş ve genişliği 0.1 mm düzeyinde olmuştur. -8 mm çevriminde ise ilk çekme çatlağı oluşmuştur. -18 mm çevriminde boyuna donatılardan birine bağlı olan 14 nolu şekildeğiştirme ölçerden gelen datalara göre boyuna donatılardaki ilk akmaya yaklaşma durumu gözlenmiştir. +30 mm tepe yerdeğiştirmesinde aynı boyuna donatıya yapıştırılmış #23, #33 ve #43 nolu şekildeğiştirme ölçerler akmaya çok yaklaşmıştır. +36 mm çevriminde ise aynı donatılara yapıştırılmış olan #11, #21 ve #22, #32 nolu şekildeğiştirme ölçer çiftlerinin akmaya çok yakın duruma geldiği tespit edilmiştir. +90 mm çevriminde ise kolon tabanında ayrılma olduğu gözlemlenmiştir. Kolon tabanında oluşan ayrılma başlangıcı Şekil 3.30 da gösterilmiştir. +220 mm çevriminde basınç bölgesinde betonda ezilme gözlenmiştir. Betonda gözlenen ezilmeler Şekil 3.31 de

gösterilmiştir. Bu çevrimde boyuna donatıların da ortaya çıktığı görülmüştür. Ancak boyuna donatılarda burkulma ve kopma tüm deney boyunca gözlemlenmemiştir.




**Şekil 3.29:** PCN-1 numunesinde Oluşan Çatlaklar



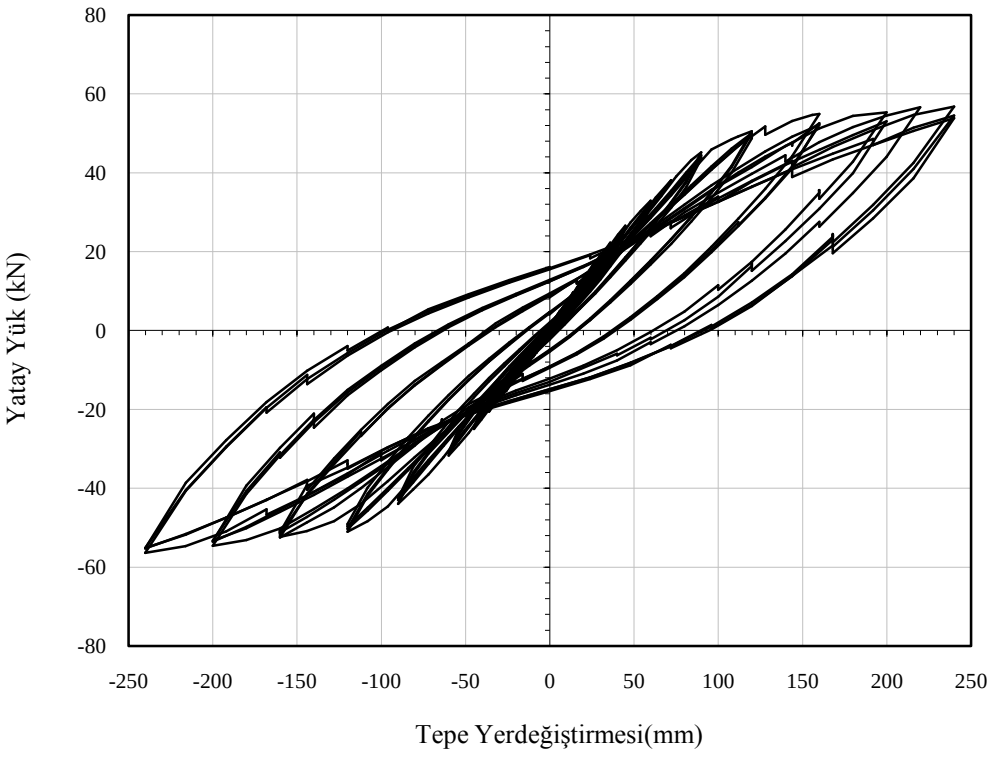

**Şekil 3.30:** Kolon Tabanında Oluşan Ayrılma Başlangıcı



**Şekil 3.31:** Betonda Meydana Gelen Ezilmeler

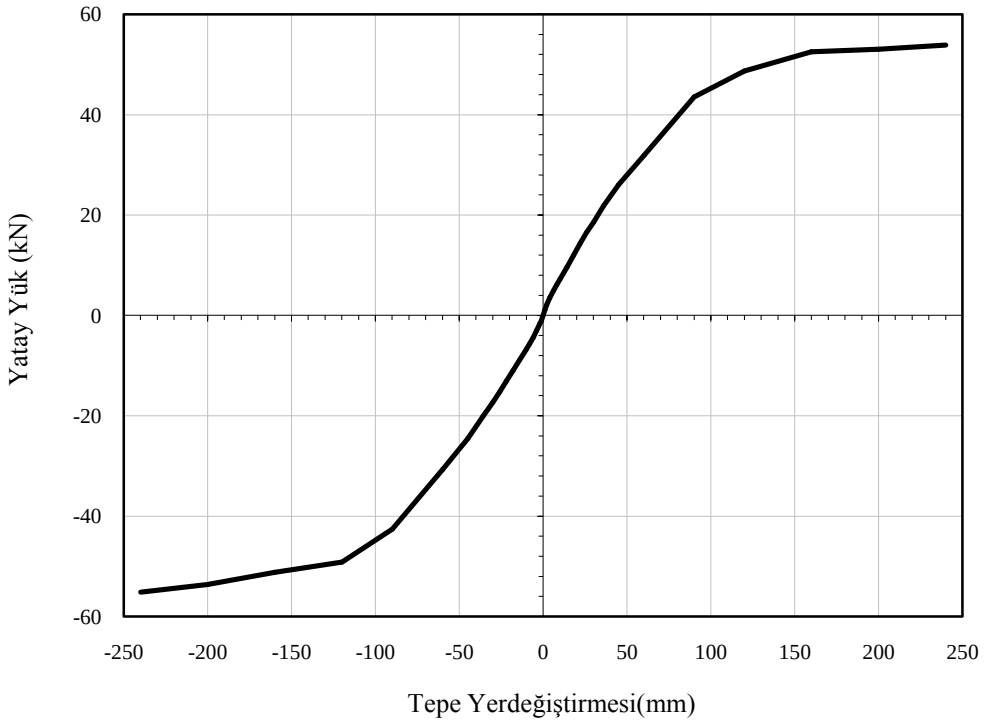
### 3.4.1.3 Deney Sonuçları

PCN-1 kolonuna ait yatay yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi Şekil 3.32 de verilmiştir.



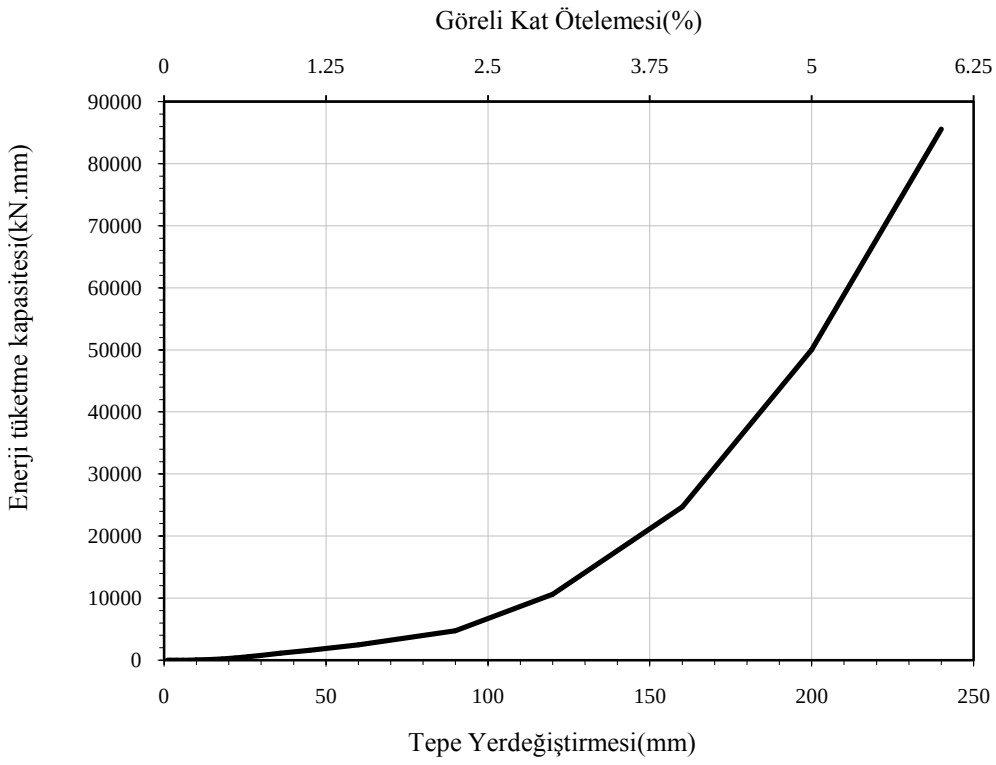

**Şekil 3.32:** PCN-1 Numunesi Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirme Eğrisi

Yatay eksende deney sırasında numuneye etkitilen tepe yerdeğiştirmesi, düşey eksende ise ölçülen numune dayanımı yer almaktadır. Yatay yük-tepe yerdeğiştirme eğrisinin zarfı da Şekil 3.33 de verilmiştir. Şekil 3.32 deki eğriler incelendiğinde, itme ve çekme çevrimlerinin yaklaşık olarak simetrik dayanım verdiği gözlenmektedir. İleri deplasman düzeylerinde eğrilerin kapadığı alanların büyüdüğü, dolayısı ile daha fazla enerji tüketildiği gözlenmektedir. Eğrilerin kapadıkları alanların toplamına karşılık gelen yığışımlı enerji tüketim eğrisi de Şekil 3.34 de verilmiştir. Enerjinin birimi kN.mm olarak alınmıştır. Enerji eğrisi mutlak tepe yerdeğiştirmesi ve göreli kat ötelemesi için hazırlanmıştır.




**Şekil 3.33:** PCN-1 Numunesi Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirmesi Zarf Eğrisi

Elde edilen sonuçlara göre, kolon numunesinin en büyük yatay yük dayanımı 57 kN olmuştur. Bu yüke yaklaşık %6 lık bir göreli kat ötelemesi seviyesinde erişmiştir. Bu seviyede kolonun tükettiği toplam enerji miktarı yaklaşık 85600 kN.mm olmuştur.

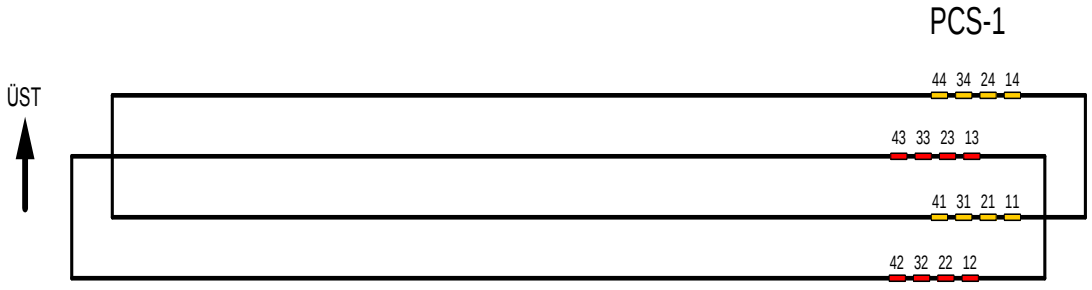



**Şekil 3.34:** PCN-1 Numunesi Enerji Tüketim Eğrisi

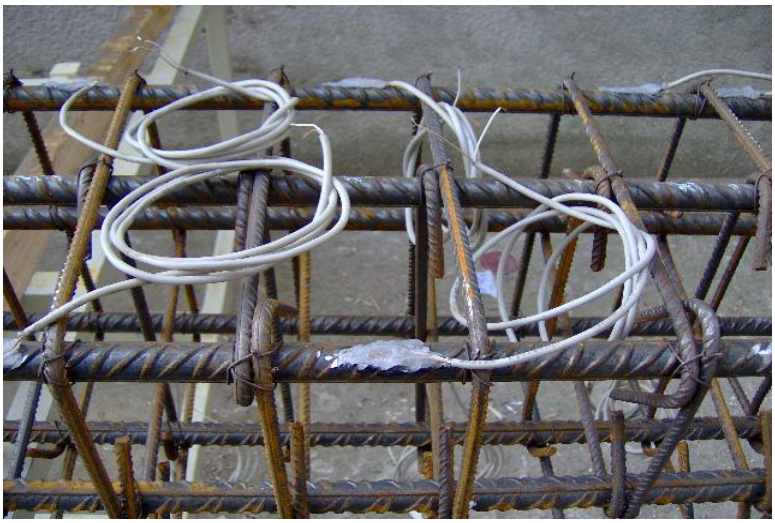
### 3.4.2 1/1 Ölçekli PCS-1 Deneyi

#### 3.4.2.1 Deney Düzeneği

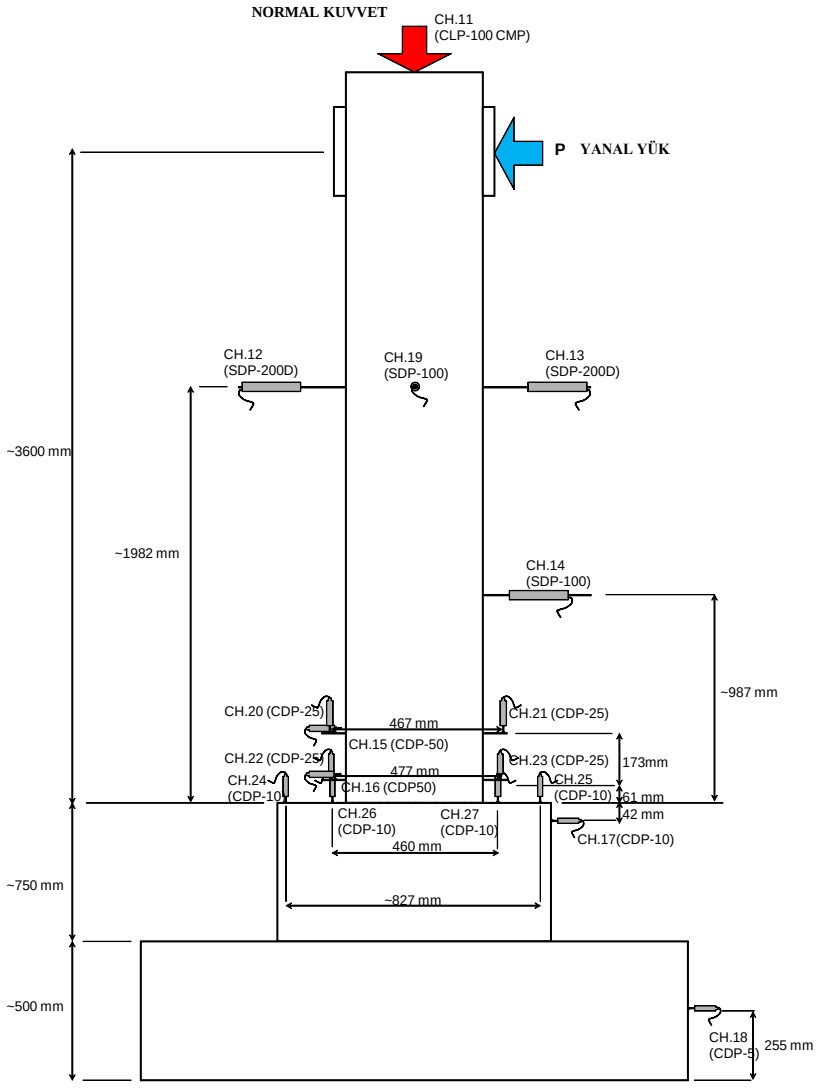
Şekil 3.35 de PCS-1 numunesine ait boyuna donatılara yapıştırılmış şekildeğiştirme ölçerlerin konumları verilmiştir. Şekil 3.36 da ise şekildeğiştirme ölçerlerin boyuna donatılara yapıştırılmaları esnasında çekilmiş bir fotoğraf yeralmaktadır. Şekil 3.37 de ise bu deney düzeneğine ait yerdeğiştirme ölçerlerin konumları, türleri ve kayıt kanalları gösterilmektedir.




**Şekil 3.35:** PCS-1 Numunesi Kolon Boyuna Donatıların Yapıştırılan Şekildeğiştirme Ölçerler

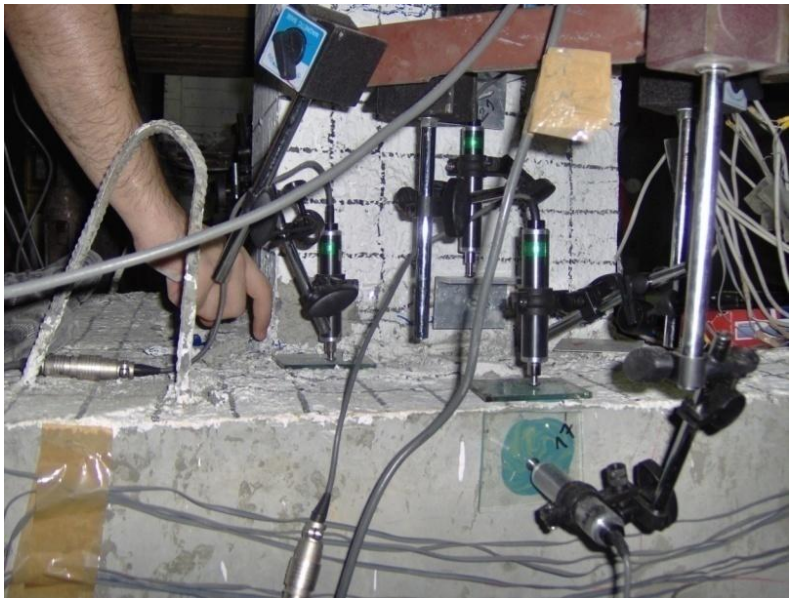


**Şekil 3.36:** Kolon Numunelerinde Şekildeğiştirme Ölçerlerin Yapıştırılması




**Şekil 3.37:** PCS-1 Deneyi Düzeneği

Bu deneyde PCN-1 deneyinde kullanılan deney düzeneği ve yükleme protokolü kullanılmıştır. İki deneye ait sonuçların karşılaştırılması açısından bu yol izlenmiştir. Şekil 3.38 de kolon taban bölgesindeki ölçüm düzeneği görülmektedir. Şekil 3.39 da ise ileri yerdeğiştirme düzeyinde kolonun genel görünümü yer almaktadır



**Şekil 3.38:** Kolon Tabanındaki Yerdeğiştirme Ölçerlerin Genel Görünümü



**Şekil 3.39:** İleri Yerdeğiştirme Düzeyinde PCS-1 Kolonunun Genel Görünümü

### 3.4.2.2 Yükleme ve Hasar Dağılımı

PCN-1 deneyine benzer şekilde numuneye deney boyunca sabit 280 kN luk eksenel yük etkitilmiştir. İlk çatlak -6 mm lik çevrimde meydana gelmiş ve boyutu yaklaşık 0.1 mm den küçük olmuştur. Boyuna donatılardaki ilk akma ise +45 mm tepe yerdeğiştirmesi durumunda oluşmuştur. Tepe yerdeğiştirmesi -45 mm olduğunda ise aynı donatıya yapıştırılmış #11 ve #41 nolu şekildeğiştirme ölçerler ile bir diğer boyuna donatıya yapıştırılmış #12 nolu şekildeğiştirme ölçer akmıştır. +60 mm çevriminde şekildeğiştirme ölçerlerin çoğunun aktığı gözlemlendi. -60 mm çevriminde ise farklı boyuna donatılara yapıştırılmış #21 ve #32 nolu şekildeğiştirme ölçerler akmadan çok uzak durumdadırlar. +220 mm çevriminde de beton basınç bölgesinde ezilme gözlemlenmiştir. Beton basınç bölgesinde gözlenen ezilme Şekil 3.40 da gösterilmektedir. Tüm deney boyunca donatılarda kopma veya burkulma gözlemlenmemiştir.



**Şekil 3.40:** Beton Basınç Bölgesinde Hasar Görünümü

PCS-1 deneyinde de her yerdeğiştirme eşiğinin son adımında deneye ara verilmiş bu aşamada oluşan yeni çatlaklar gözlemlenerek genişlikleri kaydedilmiştir. Oluşan çatlakların isimlerinin ve kalınlıklarının bulunduğu tablolar itme ve çekme yüzü için sırasıyla Tablo 3.6 ve Tablo 3.7 de verilmiştir. Tabloların son satırlarında, farklı yerdeğiştirme çevrimlerinde oluşan ilk çatlaklara genişlik verilmemesinin nedeni ileri yerdeğiştirme seviyelerinde betonun ezilip parçalanarak dökülmesi sonucu o çatlakların bulunduğu kısımların ortadan kalkmasıdır.

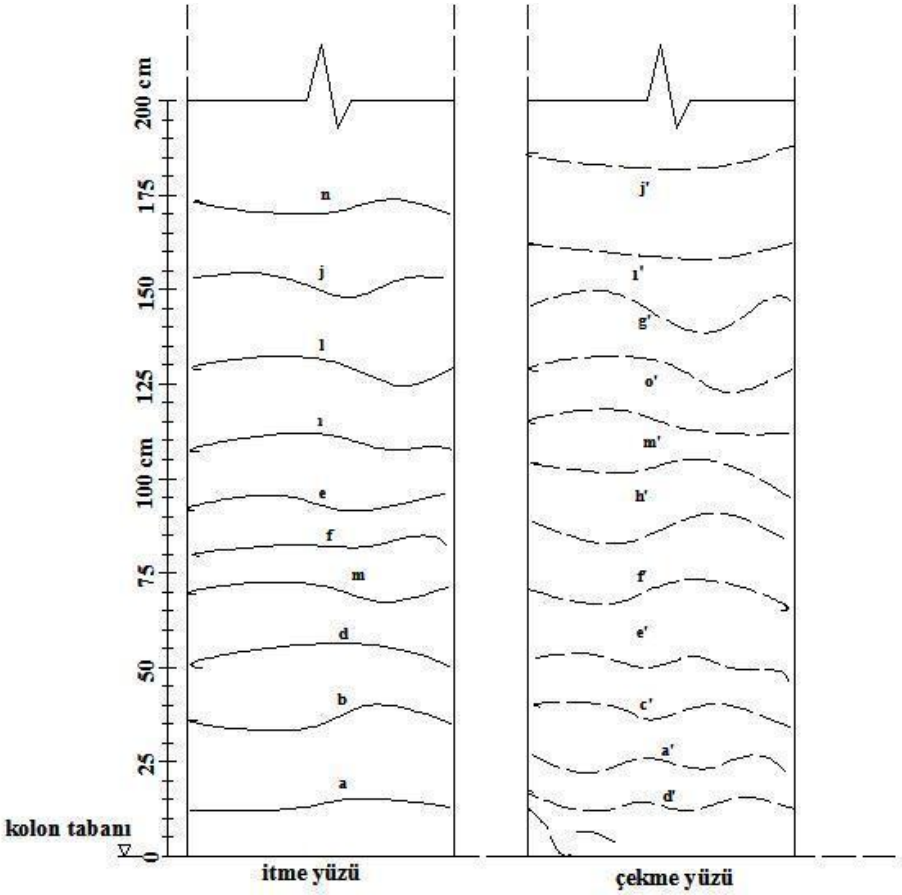
**Tablo 3.6** PCS-1 Deneyi İtme Yüzünde Oluşan Çatlaklar

| **Depl.** | **10** | **14** | **18** | **22** | **26** | **30** | **36** | **45** | **60** | **90** | **120** | **160** | **200** | **240** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Yük** | **9.5** | **12.4** | **15** | **17.2** | **19.4** | **21.1** | **23** | **27.7** | **33.7** | **44.5** | **51.1** | **56.7** | **57.4** | **56.5** |
| **a** | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.9 |
| **b** | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.5 | 0.6 | 1.2 | 2.0 | 3.0 |
| **c** | | <0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.8 | 1.6 | 3.5 | - |
| **d** | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 |
| **e** | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| **f** | | | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 |
| **g** | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.4 |
| **h** | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| **i** | | | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| **j** | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| **k** | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.4 |
| **l** | | | | | | | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| **m** | | | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| **n** | | | | | | | | <0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.3 |
| **o** | | | | | | | | | | | 0.8 | 1.2 | 1.4 | - |
| **p** | | | | | | | | | | | | 0.1 | 0.3 | 0.3 |
| **r** | | | | | | | | | | | | | 0.2 | 0.3 |

**Tablo 3.7** PCS-1 Deneyi Çekme Yüzünde Oluşan Çatlaklar

| **Depl.** | **6** | **8** | **10** | **14** | **18** | **22** | **26** | **30** | **36** | **45** | **60** | **90** | **160** | **200** | **240** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Yük** | **6** | **7.8** | **9.3** | **12** | **14** | **16.4** | **18.4** | **20.8** | **24** | **28.5** | **36** | **49.5** | **66.2** | **66.3** | **61.7** |
| **a'** | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 1.2 | 1.2 | 1.4 |
| **b'** | | | <0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 1.8 | 2.0 | - |
| **c'** | | | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| **d'** | | | | <0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.8 | 1.0 | 1.2 |
| **e'** | | | | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| **f'** | | | | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.4 |
| **g'** | | | | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.4 |
| **h'** | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 0.4 |
| **i'** | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.3 |
| **j'** | | | | | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| **k'** | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.4 |
| **l'** | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.2 | 0.4 | 0.4 |
| **m'** | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 0.4 |
| **n'** | | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 0.3 |
| **o'** | | | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| **p'** | | | | | | | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| **r'** | | | | | | | | | | | | | <0.1 | 0.2 | 0.2 |
| **s'** | | | | | | | | | | | | | | 0.2 | 0.2 |
| **t'** | | | | | | | | | | | | | | 0.2 | 0.2 |

Bu deneyde oluşan çatlaklar itme ve çekme yüzü için, kolon tabanından 2 metre yüksekliğe kadar olmak üzere Şekil 3.41 de verilmiştir.

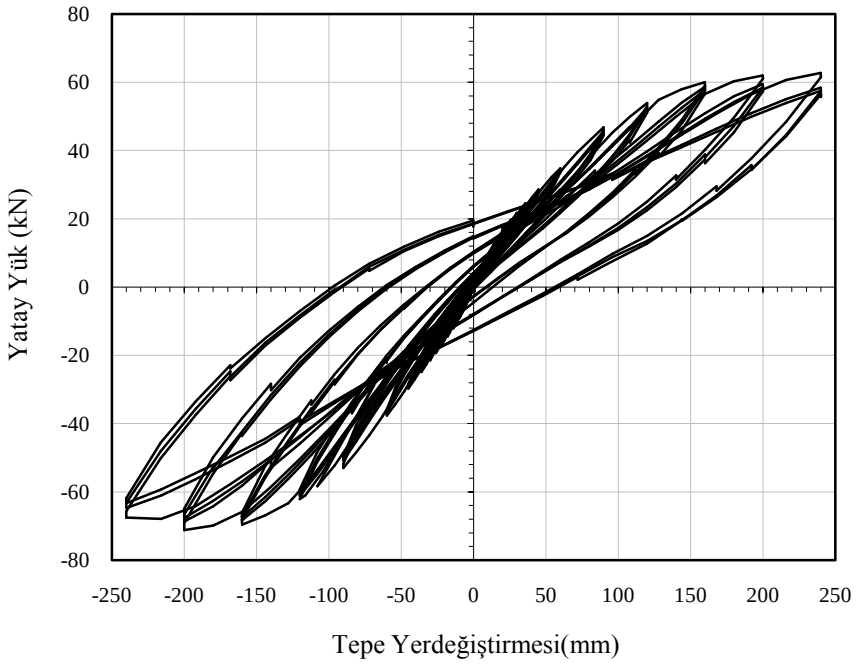



**Şekil 3.41:** PCS-1 numunesinde Oluşan Çatlaklar

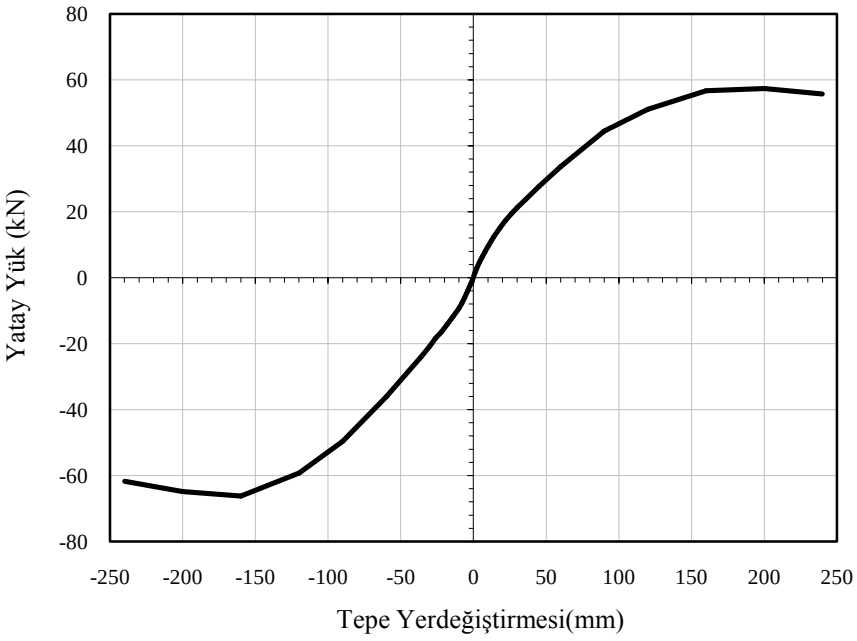
### 3.4.2.3 Deney Sonuçları

PCS-1 numunesine ait yatay yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi Şekil 3.42 de verilmiştir.

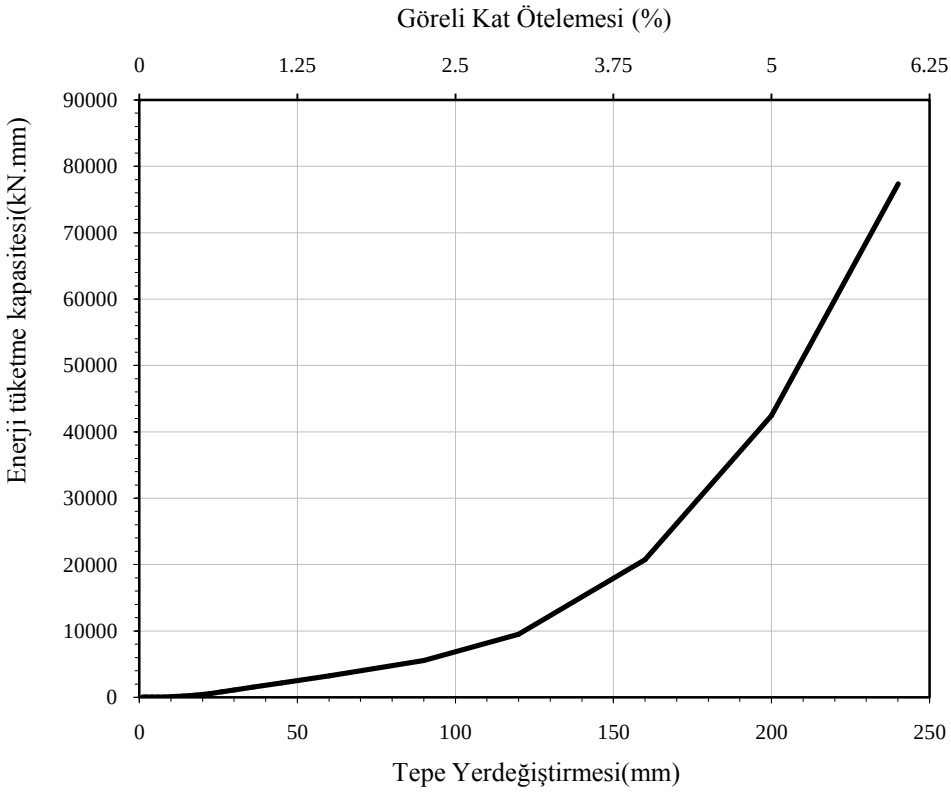
Şekil 3.42 incelendiğinde, PCS-1 numunesinin itmede yaklaşık 62 kN luk en büyük yatay yük seviyesine, çekmede ise yaklaşık -70 kN luk en büyük yatay yük seviyesine eriştiği görülmektedir. Şekil 3.43 de ise PCS-1 numunesi yatay yük-tepe yerdeğiştirme eğrisinin zarfı yer almaktadır. Şekil 3.44 de ise PCS-1 numunesi yatay yük-tepe yerdeğiştirme eğrisinin kapadığı alanlar ile hesaplanan yığışımlı enerji grafiği verilmiştir.




**Şekil 3.42:** PCS-1 Numunesi Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirme Eğrisi




**Şekil 3.43:** PCS-1 Numunesi Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirmesi Zarf Eğrisi

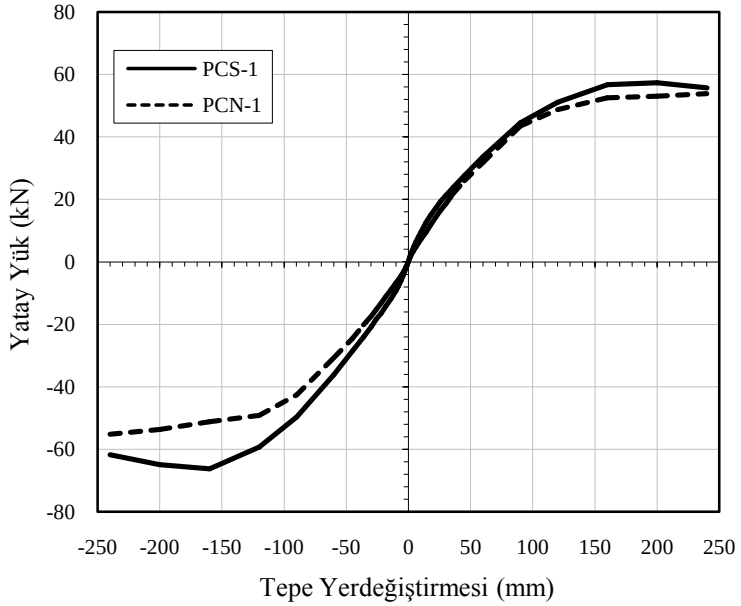



**Şekil 3.44:** PCS-1 Numunesi Enerji Tüketim Eğrisi

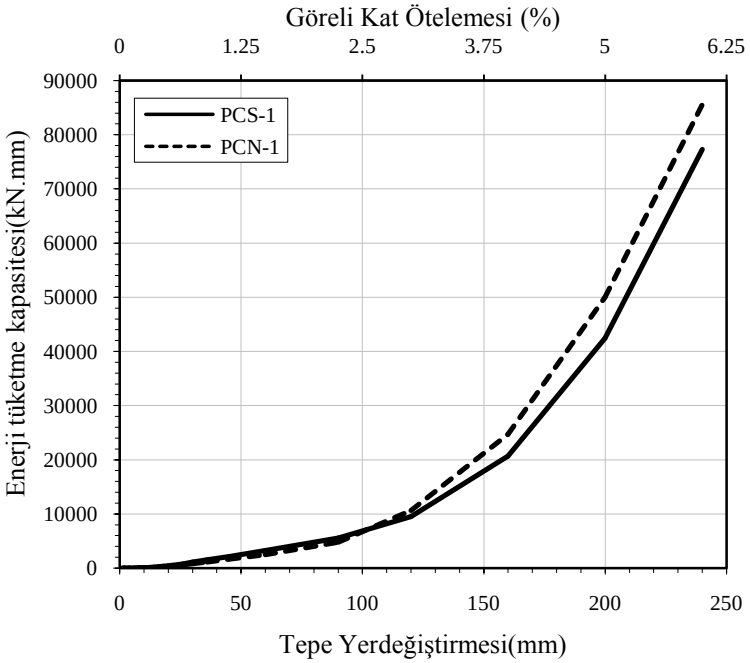
Yaklaşık %6 lık göreli kat ötelemesi değerine ulaşıldığında tüketilen enerji 77341 kN.mm olmuştur.

### 3.4.3 PCN-1 ve PCS-1 Deneylerinin Karşılaştırılması

PCN-1 ve PCS-1 deneyleri sonucunda elde edilen zarf eğrileri ile enerji yerdeğiştirme eğrileri karşılaştırmalı olarak sırasıyla Şekil 3.45 ve Şekil 3.46 da verilmektedir. Benzer yükleme protokolü ve ölçüm düzeneği kullanılarak gerçekleştirilen bu iki deney sonrasında numuneler yatay yük taşıma kapasitesi, rijitlik, süneklik, donatıların davranışları gibi parametreler göz önünde bulundurularak karşılaştırılmıştır.




**Şekil 3.45:** Kolon Deneyleri Karşılaştırmalı Zarf Eğrileri




**Şekil 3.46:** Kolon Deneyleri Karşılaştırmalı Enerji Tüketim İlişkileri

Yüksek dayanım, şekildeğiştirme ve süneklik özelliklerine sahip olan YSDOÇ çeliği ile üretilmiş PCS-1 numunesinin BÇIII çeliğiyle üretilmiş PCN-1 numunesine göre daha büyük yatay yük taşıma kapasitesine ulaştığı görülmüştür.

YSDOÇ çeliği ile BÇIII çeliğinin akma dayanımları arasındaki fark deney sonuçlarına yansımıştır. PCN-1 numunesinde ilk boyuna donatı akması -36 mm lik çekme çevrimi aşamasında görülürken PCS-1 numunesinde ilk boyuna donatı akması -45 mm lik çekme çevrimi aşamasında meydana gelmiştir.

Numunelerin hidrolik verene göre konumları en fazla ±240 mm tepe yerdeğiştirmesi etkitilmesini mümkün kılmaktadır. Bu yerdeğiştirme sınırında boyuna donatılarda oluşan en büyük şekildeğiştirme ise 5000 mμ düzeyindedir. Bu değer boyuna donatıdaki akma şekildeğiştirmesinin yaklaşık iki katına karşı gelmektedir. Ayrıca, bu şekildeğiştirme düzeyinde YSDOÇ ve BÇIII donatılarının dayanımları arasındaki farklılığın belirgin olmamasından dolayı, her iki numune için deneylerde elde edilen yük yerdeğiştirme eğrileri oldukça benzerdir. Eğer erişilen şekildeğiştirme düzeyi 30000 mμ düzeyinde olsa idi, her iki donatı türü için deneylerde elde edilen eğriler karşılaştırıldığında YSDOÇ donatısının daha yüksek bir performans düzeyine sahip olması beklenirdi. Eleman boyutları (kesit boyutları ve açıklık), boyuna donatı oranı ve kesit sargılama oranı elde edilecek boyuna donatı şekildeğiştirmeleri üzerinde etkin parametrelerdir.

İki numunenin enerji tüketim eğrileri karşılaştırıldığında aralarında belirgin bir fark görülmemiştir.

# 4.KURAMSAL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, deneysel olarak incelenen 1/1 ölçekli betonarme kolonların moment eğrilik, itme ve enerji tüketme analizleri ile birlikte 1/3 ölçekli betonarme kolonlar üzerinde gerçekleştirilen kuramsal çalışmalar sunulmuştur.

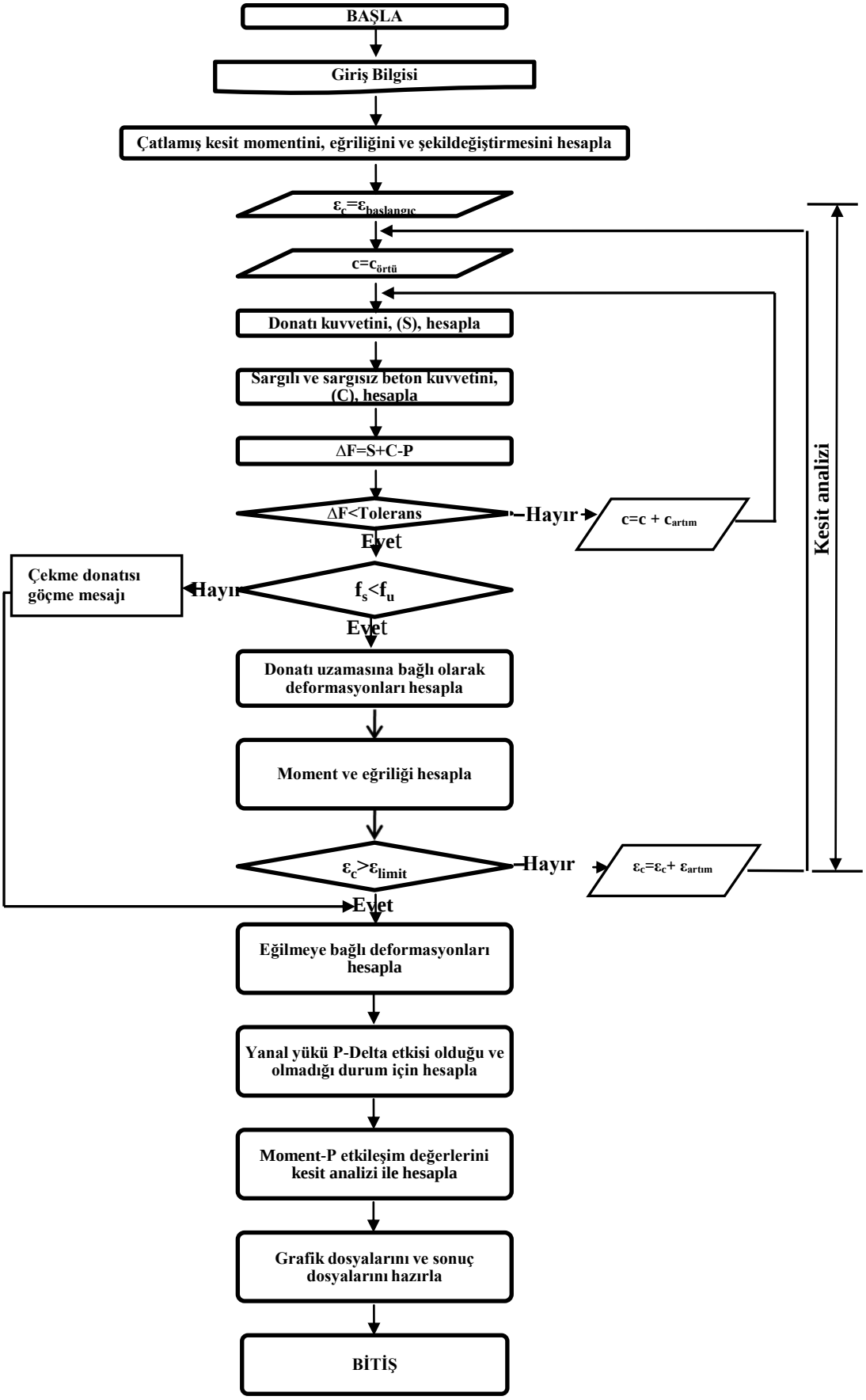
Tüm analizler Yalçın ve Saatçioğlu (2000) tarafından geliştirilmiş COLA(Reinforced Concrete Column Analysis) isimli program yardımıyla gerçekleştirilmiştir. COLA programı betonarme kolonların eksenel basınçla birlikte tek yönlü artan yatay yükler etkisindeki, inelastik analizlerini gerçekleştirmektedir. Program betonda sargı etkisi, çelik pekleşmesi, donatı burkulması ve P-delta etkisi dikkate alınmaktadır. Kolon geometrisi, malzeme özellikleri ve yükleme kombinasyonları programın giriş bilgilerini oluşturmaktadır. Normal kuvvet moment etkileşim diyagramları, moment-eğrilik ilişkisi, yük-yerdeğiştirme ilişkileri programın çıktıları arasındadır. COLA programının sonuçları, pek çok deneysel veriyle karşılaştırılmış, doğruluğu kanıtlanmıştır.

Cola programında hesaplar kare, dikdörtgen ve daire kesitli kolonlar için yapılabilmektedir. Giriş bilgisi olarak programa kolon geometrisi ile birlikte boyuna donatıların miktarları ve konumları, enine donatı düzenlemesi, çelik ve beton malzeme modelleri, eksenel yük düzeyi ve çıkış dosyalarının isimleri girilmektedir. Sargılı beton modeli ve basınç donatısının burkulmasını temsil eden model giriş dosyalarına uygun olarak program tarafından oluşturulur.

Program öncelikle ilk çatlak oluşumu aşamasındaki moment ve eğrilik değerlerini hesaplamaktadır. Çatlamanın ötesinde analiz uç basınç lifindeki farklı deformasyon değerleri için yürütülmektedir. Beton ve çelikteki gerilmeler programa girilen malzeme özelliklerine göre tanımlanır. Donatı çeliğindeki, sargılı ve sargısız betondaki iç kuvvetler hesaplanır. Betonda oluşan basınç kuvvetlerini hesaplamak için kesit dikdörtgen bölgelere ayrılır, daire kesitler için radyal koordinatlar kullanılır. Dikdörtgen ve kare kesitler için ise kesit eşit alanlı bölgelere ayrılır. İç kuvvetler hesaplandıktan sonra denge durumu kontrol edilir, eğer denge sağlanırsa

tarafsız eksen derinliği için yapılan tahminin doğru olduğu saptanmış olur ve hesaplar devam eder. Denge durumu sağlanmaz ise tarafsız eksen derinliği güncellenir ve aynı hesaplar denge sağlanana kadar yinelenir. Kesit analizi çekme donatısı yada beton sınır şekildeğiştirme seviyesine ulaşana dek sürdürülür. Eğer boyuna donatılardan biri burkulursa, program burkulmadan sonra o donatının dayanıma etkisini ihmal eder.

Programın genel akış diyagramı Şekil 4.1 de verilmiştir.




**Şekil 4.1:** Cola Programı Genel Akış Diyagramı

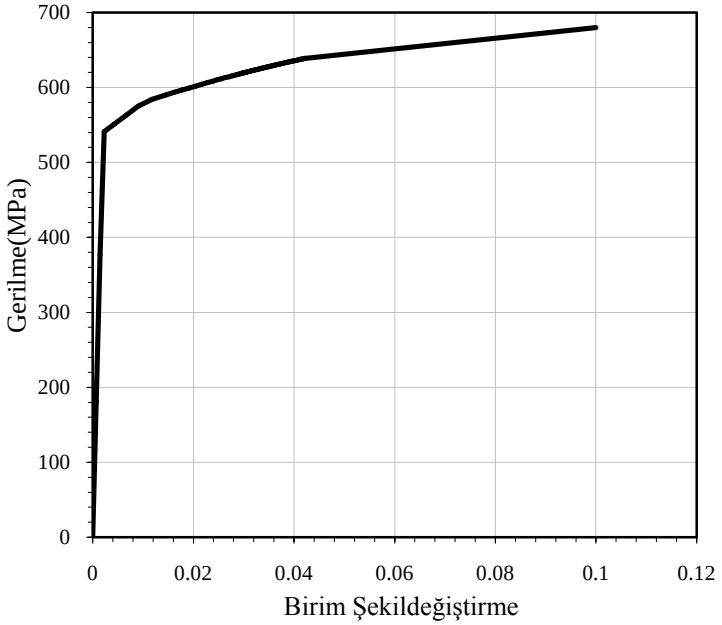
## 4.1 1/1 Ölçekli Kolonlarda Kuramsal Çalışmalar

### 4.1.1 Moment Eğrilik İlişkileri

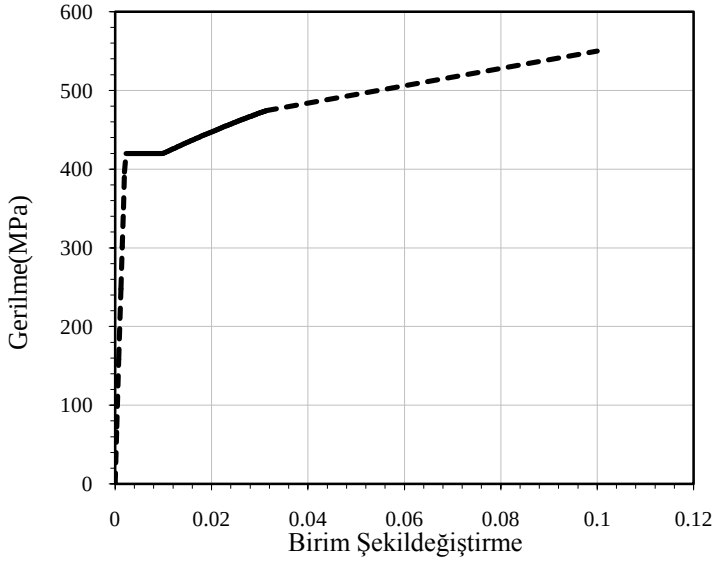
1/1 ölçekli kolonların "YSDOÇ" adı verilmiş yüksek şekildeğiştirme özelliği olan betonarme çeliği ile BÇIIIa donatı çeliği kullanılması durumundaki davranış biçimleri COLA (Reinforced Concrete Column Analysis) adlı program yardımıyla incelenmiştir. Program yardımıyla kolonların moment eğrilik analizleri gerçekleştirilmiştir. Kolonların üretiminde kullanılan beton ve çelik malzeme modelleri ve gerekli olan diğer büyüklükler girilerek, kesitin moment ve eğrilik ilişkileri alınmıştır. Hesaplamalarda kolonun rijit bir temele ankastre biçimde bağlı olduğu varsayılmaktadır ve P-Delta etkisi de dikkate alınmaktadır. Programa girilen çelik malzeme modelleri YSDOÇ ve BÇIII çelikleri için sırasıyla Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 de verilmiştir. Yüksek şekildeğiştirme özellikli çelik "YSDOÇ" için, yapılan çekme deneylerinden elde edilen değerlerin sonucunda yaklaşık bir malzeme modeli oluşturulmuştur. BÇIII çeliği için de yaygın olarak kullanılan malzeme modeli kullanılmıştır.

Bu veriler ışığında moment eğrilik ilişkisi grafikleri çizilmiştir. Kuramsal analizi gerçekleştirilmiş olan 1/1 ölçekli kolonların kesit özellikleri ve boyutları Bölüm 3 de sunulan deneylerde incelenen numuneler ile aynıdır Şekil 3.6 dan izlendiği gibi, kolon kesiti 35*35 cm olup serbest kolon yüksekliği 400 cm dir.

Kesitte üç sıra boyuna donatı kullanılmış olup, boyuna donatı çapları 20 mm dir. Etriye aralığı ise 100 mm, çapı ise 8 mm dir.

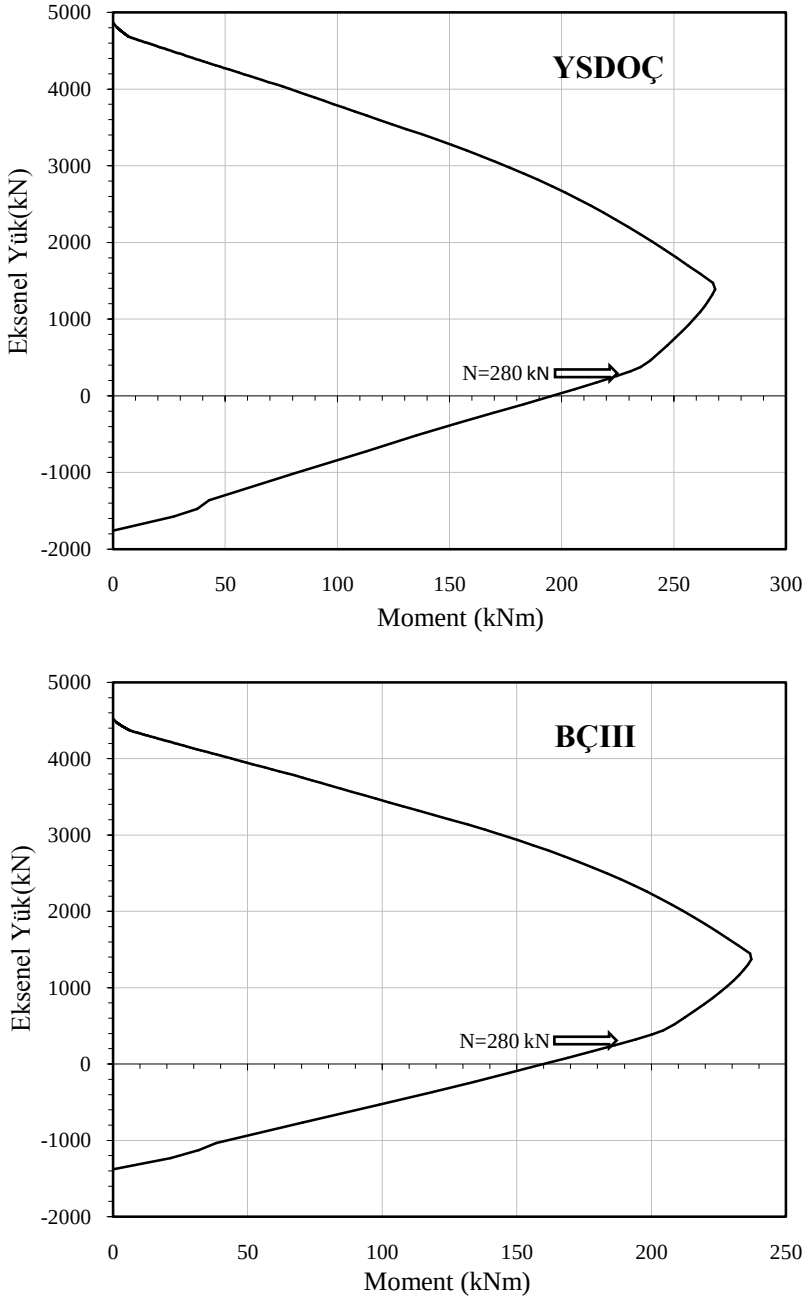



**Şekil 4.2:** YSDOÇ Çeliği İçin Kullanılan Malzeme Modeli




**Şekil 4.3:** BÇIII Çeliği İçin Kullanılan Malzeme Modeli

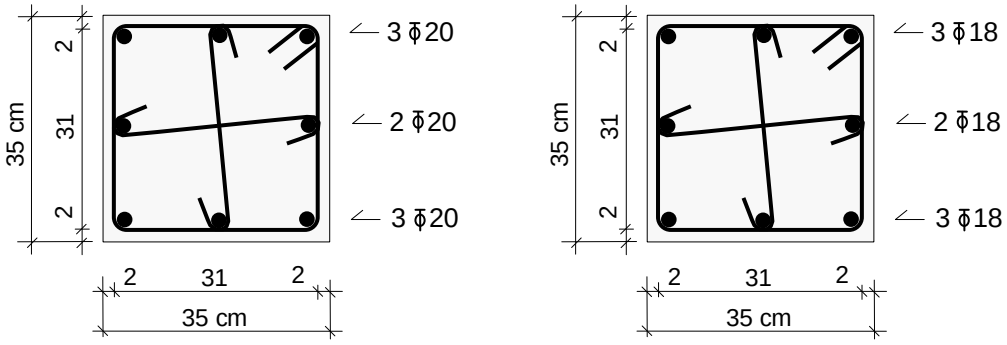
Kuramsal hesaplarda beton basınç dayanımı yapılan malzeme deneylerine dayalı olarak 25 MPa olarak alınmıştır. Kolonlar 280 kN luk sabit normal kuvvet etkisi altında analiz edilmiştir, bu normal kuvvet kesit eksenel yük taşıma kapasitesinin yaklaşık %10.5 ine karşı gelmektedir. Kolonlara etki ettirilen normal kuvvetin moment-normal kuvvet karşılıklı etkileşim diyagramındaki yeri YSDOÇ ve BÇIII çeliği için ayrı ayrı Şekil 4.4 de verilmiştir.



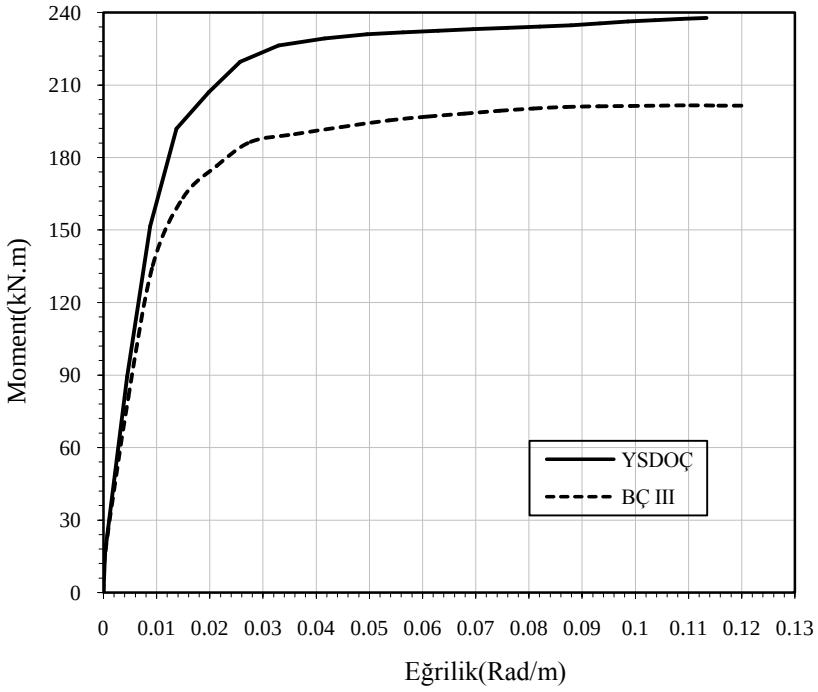

**Şekil 4.4:** Kolonlar İçin Moment-Normal Kuvvet Etkileşim Diyagramları

Tipik kesit için, moment eğrilik ilişkileri 2 durum için oluşturulmuştur, 1. durumda %2 oranında YSDOÇ ve BÇIII kalitesinde boyuna donatı içeren özdeş iki kolonun moment eğrilik ilişkileri hesaplanmıştır bkz. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6. 2. durumda ise kesit boyutları bakımından özdeş fakat boyuna donatı oranı bakımından birbirinden farklı, %2 BÇIII ve %1.66 oranında YSDOÇ boyuna donatısı içeren iki kolon için moment eğrilik ilişkileri hesaplanmış ve karşılaştırmalı olarak Şekil 4.7 de verilmiştir.

BÇIII Donatısı Kullanım Durumu YSDOÇ Donatısı Kullanım Durumu



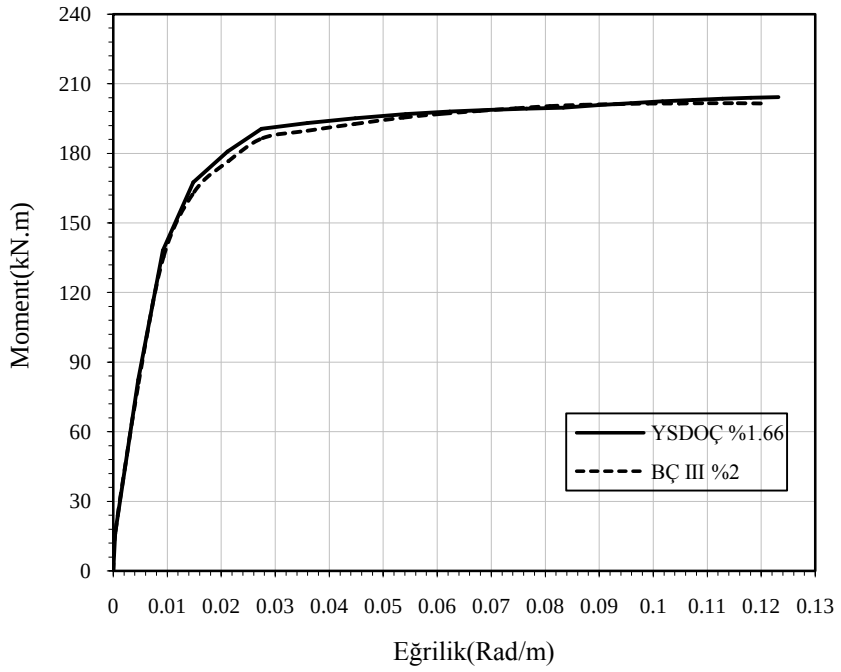

**Şekil 4.5:** Kolon Kesitleri




**Şekil 4.6:** %2 Oranında Boyuna Donatı Kullanımı Durumunda Moment Eğrilik İlişkileri

Şekil 4.6 incelendiğinde, aynı oranda ve farklı tipte boyuna donatı içeren kolonlarda YSDOÇ donatısı kullanım durumunda moment kapasitesinde yaklaşık %18 lik artış olmuştur.

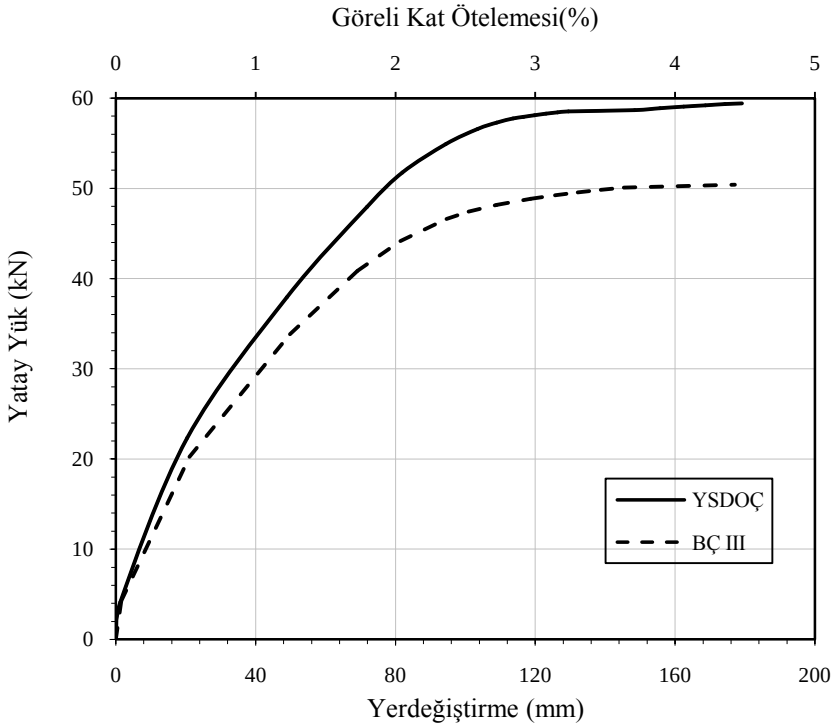
İkinci durumda ise, yani farklı oranda boyuna donatı kullanımı halinde, moment eğrilik ilişkileri neredeyse aynı çıkmıştır. Bu durumda aynı davranış yaklaşık %17 daha az YSDOÇ boyuna donatısı kullanımı ile sağlanmış olmaktadır.




**Şekil 4.7:** Farklı Oranda Boyuna Donatı Kullanımı Durumunda Moment Eğrilik İlişkileri

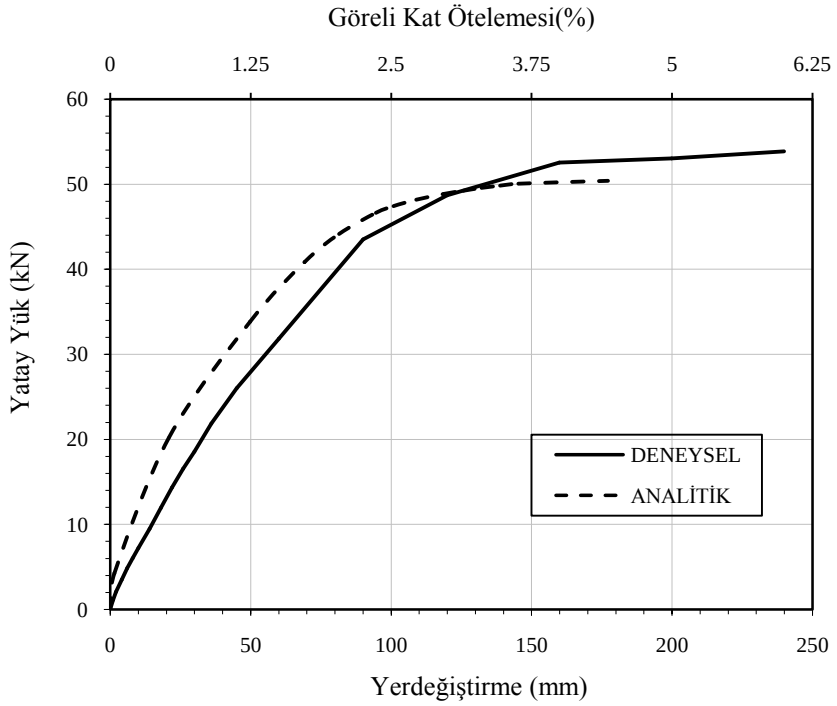
### 4.1.2 İtme Analizi

Kolonlarda yük-yerdeğiştirme ilişkileri de COLA programı yardımıyla oluşturulmuştur. Bu analizler de YSDOÇ ve BÇIII boyuna donatı kullanım durumları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Programa yukarıda tanımlanan veriler girildikten sonra, çıkış bilgisi olarak kolona etkiyen yatay yük ve tepe yerdeğiştirmesi değerleri alınmıştır. Bu veriler ışığında yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi grafikleri oluşturulmuştur. %2 boyuna donatı kullanımı durumunda elde edilen yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi grafikleri Şekil 4.8 de verilmiştir.

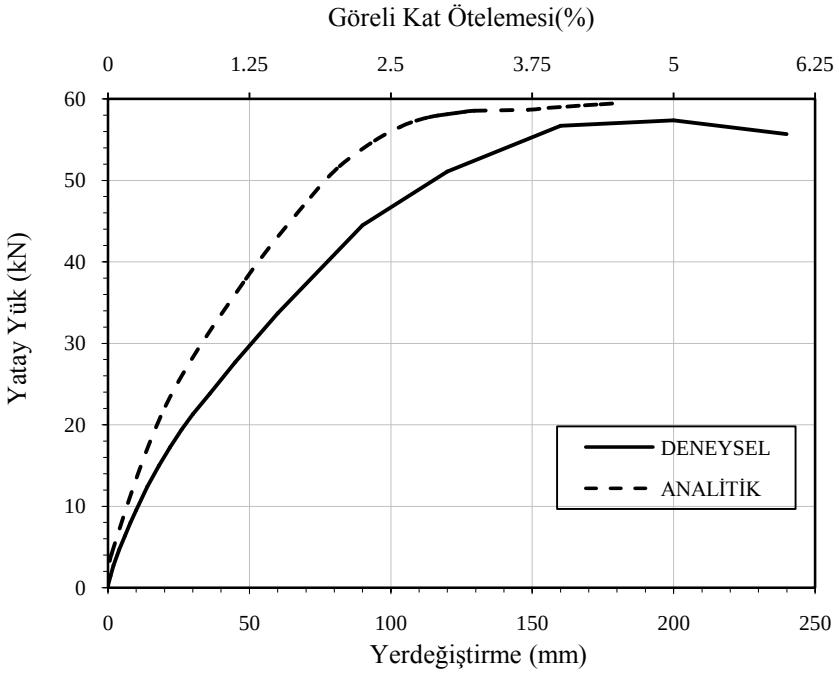



**Şekil 4.8:** Kolonlarda Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkisi

Kuramsal çalışma sonuçları ile deneysel çalışma sonuclarının karşılaştırılması için, YSDOÇ ve BÇIII çeliği ile üretilmiş kolonlarda ayrı ayrı grafikler oluşturulmuştur Şekil 4.9 da BÇIII, Şekil 4.10 da ise YSDOÇ boyuna donatı durumları için kuramsal ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel ve kuramsal sonuçlar arasındaki farkın muhtemel sebeplerinin, kullanılan beton ve çelik davranış modellerinin başarısı ile deneyin artan genlikli tersinir tekrarlı yükler etkisinde yapılmasının olduğu düşünülmektedir.

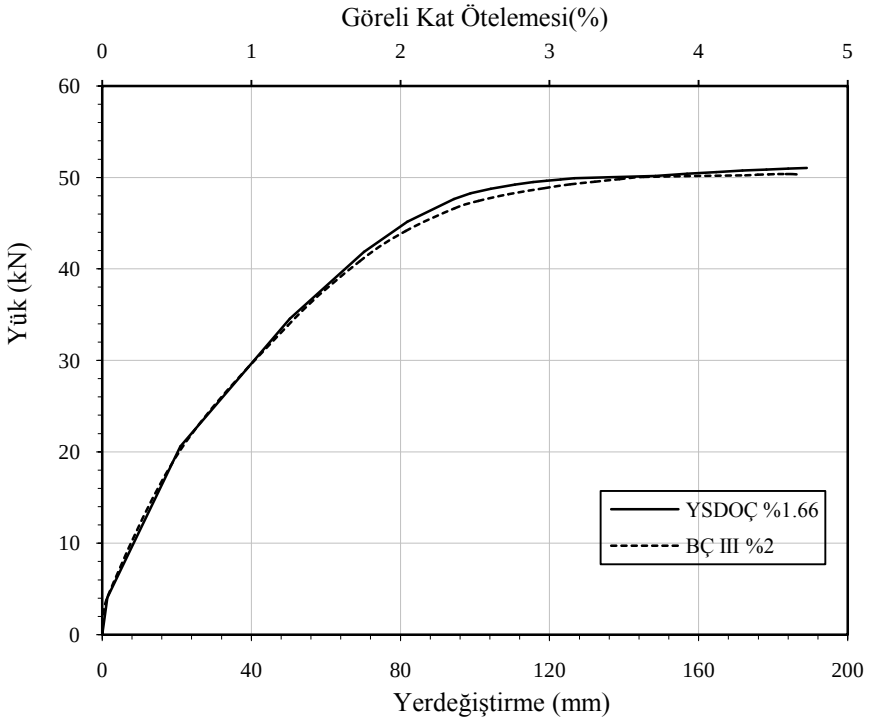



**Şekil 4.9:** BÇIII Çeliği İle Üretilmiş Kolonda Karşılaştırma




**Şekil 4.10:** YSDOÇ Çeliği İle Üretilmiş Kolonda Karşılaştırma

%2 oranında BÇ III boyuna donatısı kullanılarak üretilen kolon ve %1.66 oranında YSDOÇ boyuna donatısı kullanılarak üretilen iki kolona ait yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi grafikleri de Şekil 4.11 de verilmiştir.

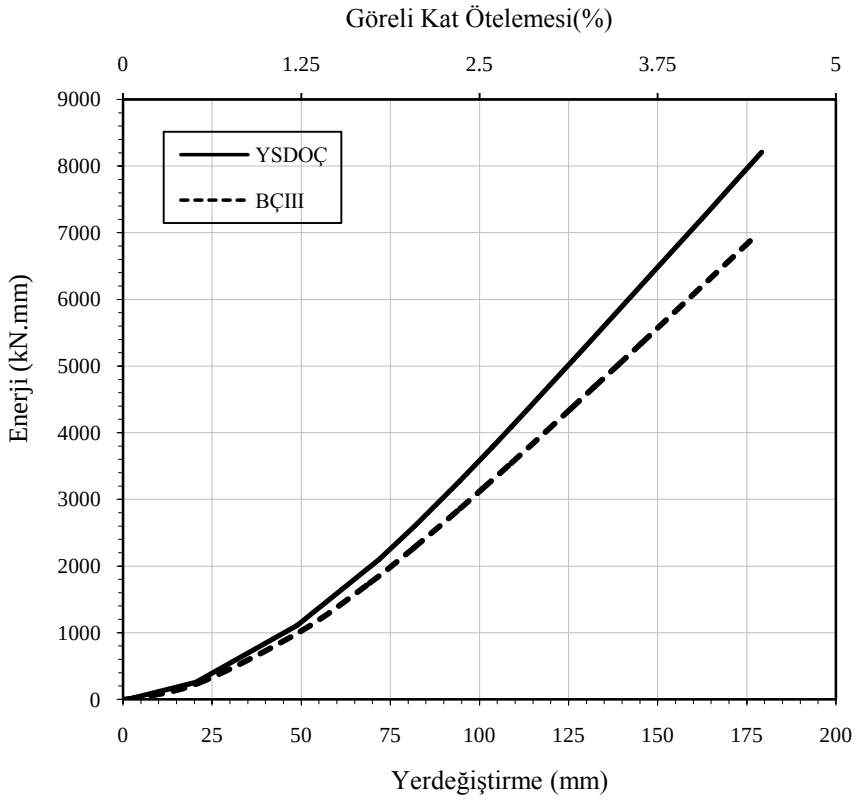



**Şekil 4.11:** Farklı Oranda Boyuna Donatı İçeren Kolonlarda Yük-Yerdeğiştirme İlişkileri

### 4.1.3 Enerji Tüketme Analizi

Yük-yerdeğiştirme eğrisinin kapadığı alan sistemin tükettiği enerjiye karşı gelmektedir. Bu hesaplar için trapez kuralı esas alınarak basit bir kod geliştirilmiştir.

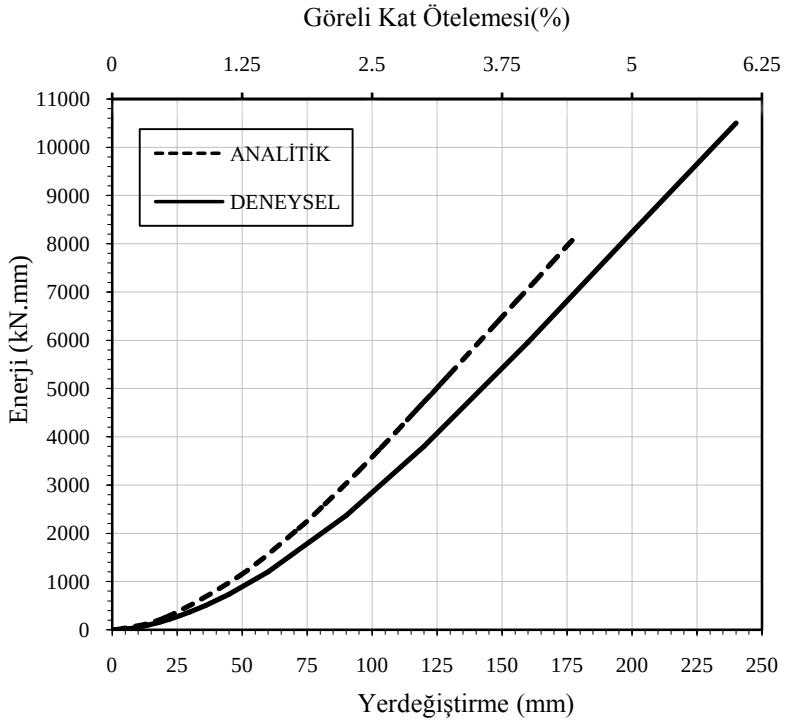
Şekil 4.12 de YSDOÇ ve BÇIII çelikleri ile üretilmiş kolonların kuramsal yük yerdeğiştirme eğrilerine dayalı olarak hesaplanan enerji grafikleri verilmiştir.



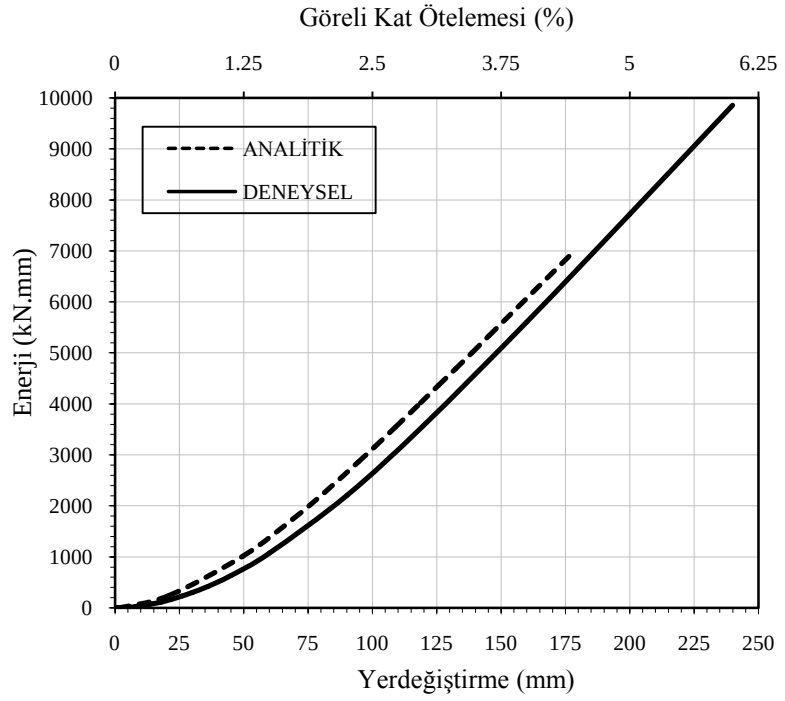

**Şekil 4.12:** Kuramsal Sonuçlara Göre Tüketilen Enerjinin Karşılaştırılması

Grafikten görüldüğü gibi YSDOÇ çeliği ile üretilmiş kolon tüm göreli kat ötelemesi değerlerinde daha fazla enerji tüketmektedir.

Şekil 4.13 de ise YSDOÇ çeliği kullanımı durumunda kuramsal ve deneysel ulaşılan enerji grafikleri verilmektedir. Şekil 4.14 de ise bu grafik BÇIII çeliği için verilmiştir.




**Şekil 4.13:** YSDOÇ Çeliği İle Üretilen Kolonda Enerji Tüketimi

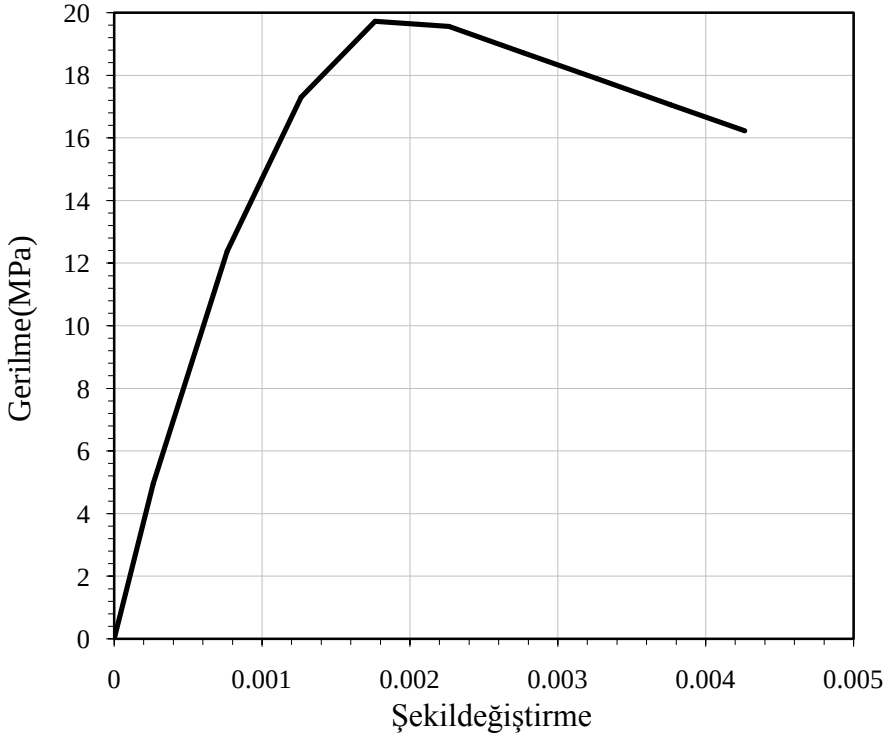



**Şekil 4.14:** BÇIII Çeliği İle Üretilen Kolonda Enerji Tüketimi

## 4.2 1/3 Ölçekli Kolonlarda Kuramsal Çalışmalar

### 4.2.1 Moment Eğrilik İlişkileri

1/3 ölçekli betonarme kolonlarda yüksek şekildeğiştirme özelliği olan betonarme çeliği YSDOÇ ve piyasada kullanılan BÇIIIa donatı çeliği kullanılarak üretilen iki seri kolonun davranışları COLA programı kullanılarak kuramsal olarak incelenmiştir. Çelik için kullanılan malzeme modelleri, 1/1 ölçekli kolonların analizinde kullanılan modeller ile aynıdır. Beton için kullanılan malzeme modeli ise BS20 sınıfı beton için kullanılan Hognestad modelidir. Bu model Şekil 4.15 de verilmiştir.

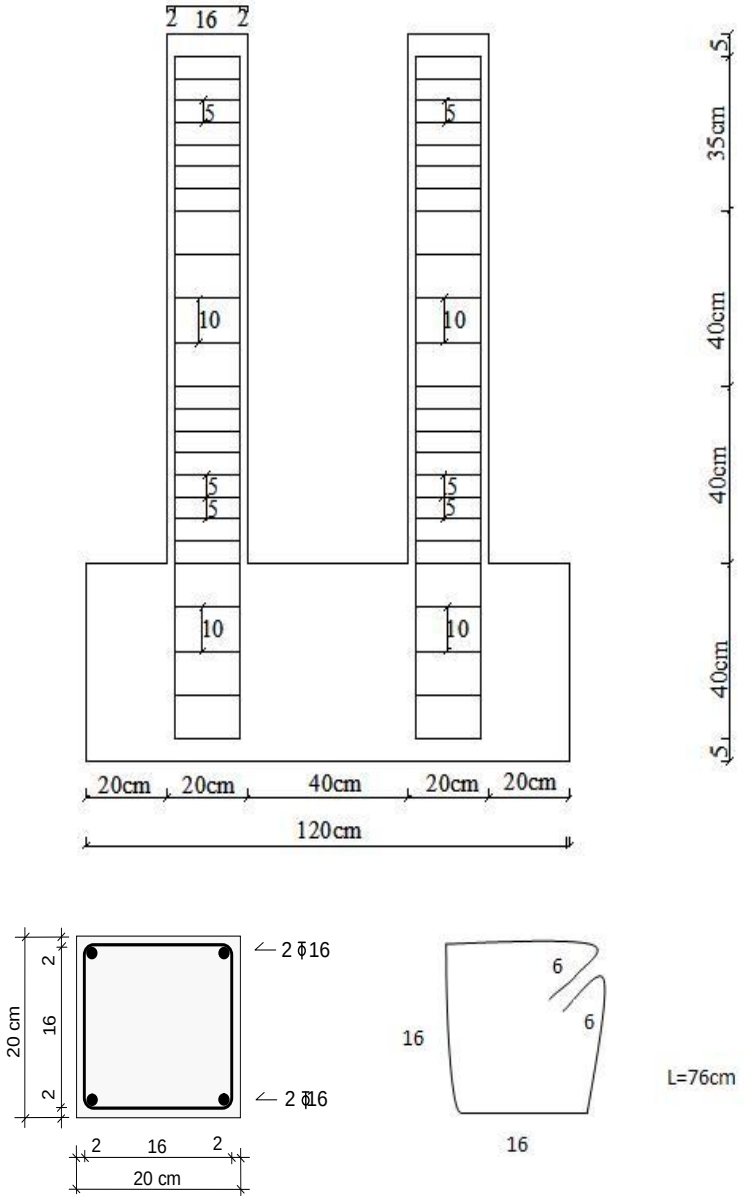



**Şekil 4.15:** Beton İçin Kullanılan Malzeme Modeli

Konsol kolonun kesiti 20*20 cm, yüksekliği ise 120 cm dir. Kolonlarda 4Φ16 lık boyuna donatı kullanılmıştır. Etriye çapı 8 mm dir. Şekil 4.16 da numune genel boyutları ve etriye detayları verilmiştir.

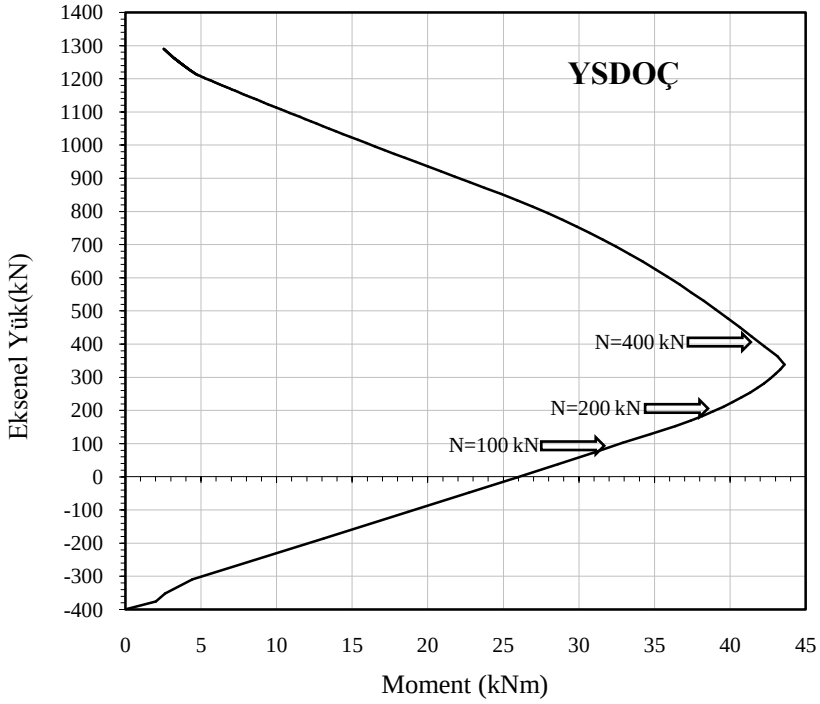
Kuramsal çalışmanın parametreleri normal kuvvet ve hacimsel enine donatı oranı $\rho_v$ dir. Normal kuvvet miktarı açısından dört farklı durum söz konusudur. Bunlar N=0, N=100 kN, N=200 kN ve N=400 kN durumlarıdır. Bu büyüklükler kesit normal kuvvet taşıma kapasitesine oranlandığında $N/N_g$=0, $N/N_g$=%13.4, $N/N_g$=%26.8 ve

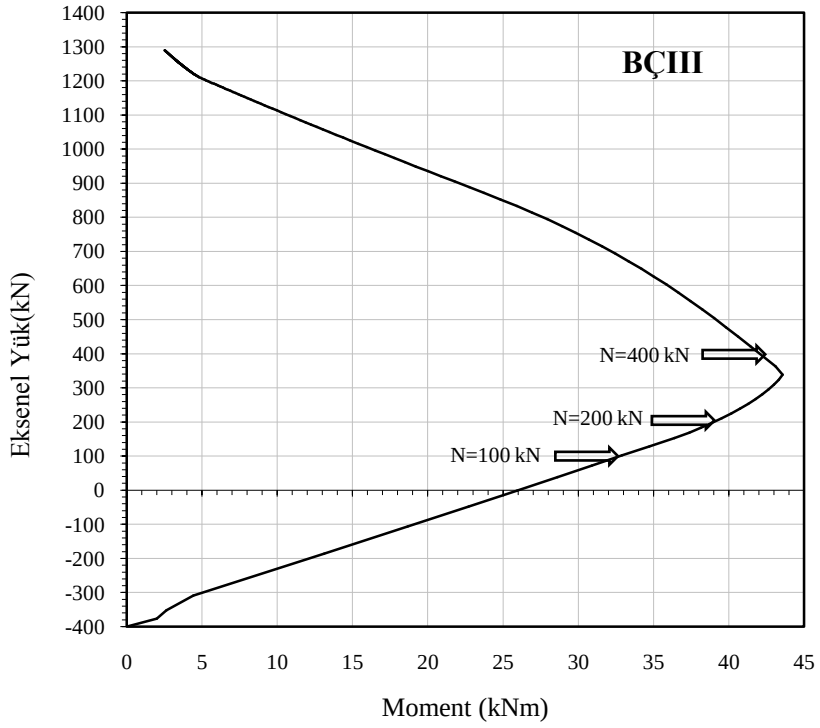
$N/N_g$=%53.7 elde edilmektedir. Moment normal kuvvet etkileşim diyagramlarında, bu normal kuvvetlerin karşı geldiği noktalar işaretlenmiştir ve Şekil 4.17 de gösterilmektedir. Betonarme kolonlarda üç farklı hacimsel enine donatı oranı kullanılmıştır. Bunlar sırası ile $\rho_v$ =0, $\rho_v$ =%1 ve $\rho_v$ =%2 dir.




4Φ16 lık Kolon Kesiti Etriye Detayı

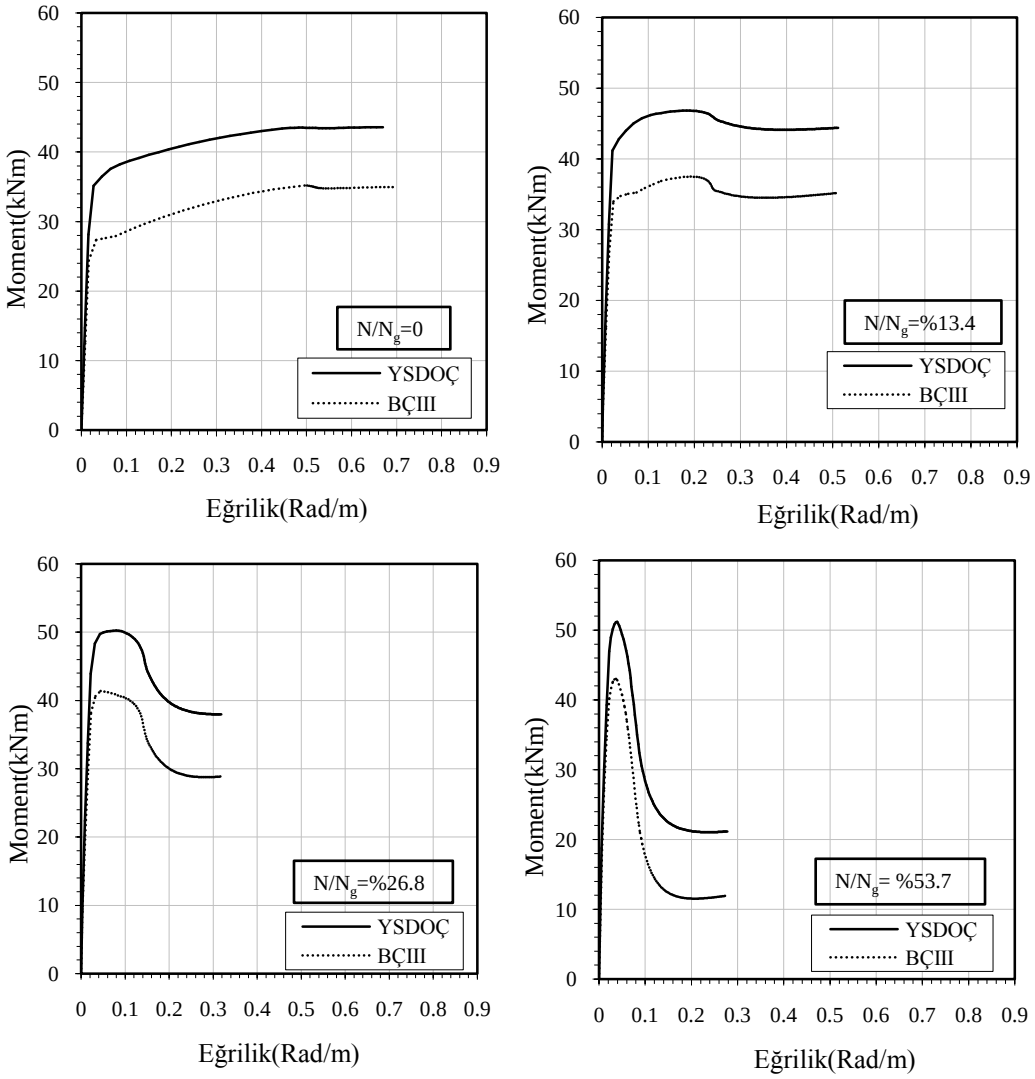
**Şekil 4.16:** 1/3 Ölçekli Kolon Numuneleri İçin Geometrik Özellikler




**Şekil 4.17:** 1/3 Ölçekli Kolonlar İçin Moment Normal Kuvvet Etkileşim Diyagramları

Yukarıda tanımlanan özelliklerin COLA programına girilmesiyle, sargı etkisinin olmadığı $\rho_v$=0 durumu için, elde edilen moment-eğrilik ilişkileri Şekil 4.18 de verilmiştir.

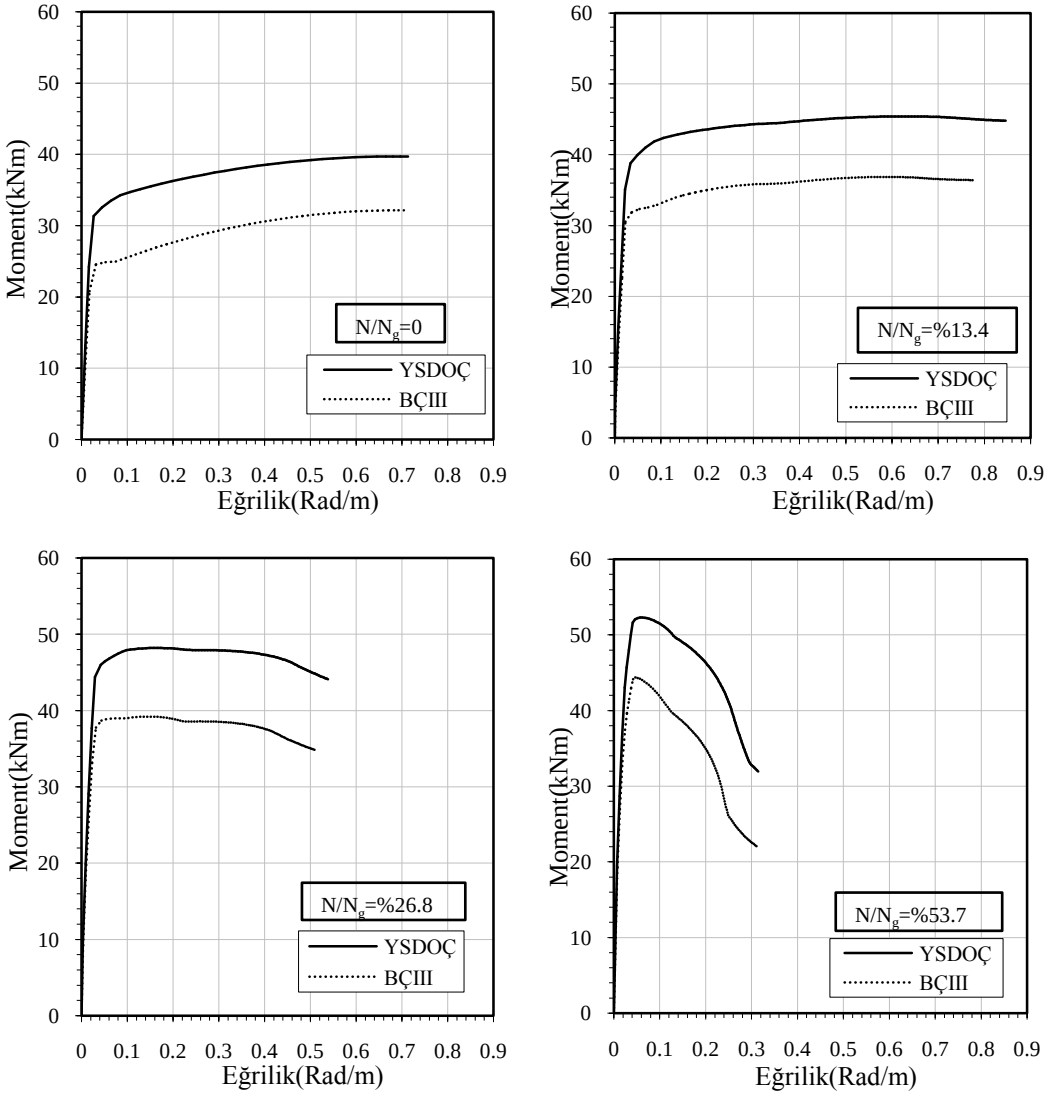



**Şekil 4.18:** Yetersiz Sargı Donatısı Durumunda Elde Edilen Moment Eğrilik İlişkileri

Elde edilen kolon moment eğrilik ilişkileri incelendiğinde normal kuvvet artışının en büyük moment değerlerini artırdığı, eğrilik değerlerini ise küçülttüğü görülmektedir. YSDOÇ çeliği ile üretilmiş kolonun daha yüksek moment değerlerine ulaştığı ancak eğrilik değerlerinde BÇIII ile üretilmiş kolonla aynı davranışı sergilediği grafiklerden çıkarılabilecek başka bir sonuçtur.

Normal kuvvetin kesit normal kuvvet taşıma kapasitesinin %53.7 si kadar olduğu durumda, en büyük moment dayanımına ulaşıldıktan sonra dayanım hızla düşmektedir.

Hacimsel donatı oranı $\rho_v$ nin %1 olduğu kolon için, normal kuvveti oranının ve boyuna donatı türünün değişmesi durumunda elde edilen moment eğrilik ilişkileri Şekil 4.19 da verilmiştir.

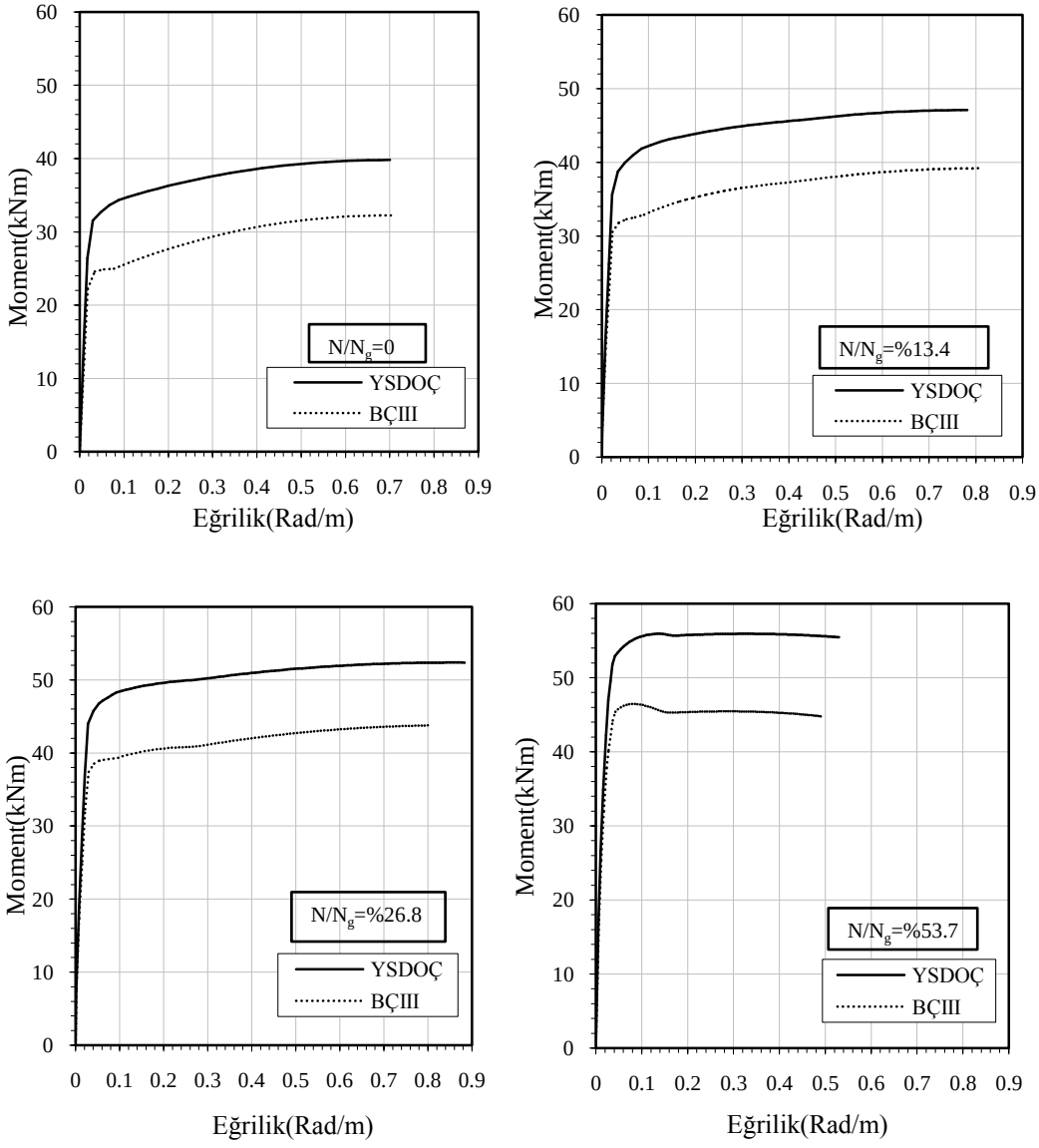



**Şekil 4.19:** $\rho_v$=%1 Durumunda Elde Edilen Moment Eğrilik İlişkileri

Şekil 4.19 dan görüldüğü üzere, $\rho_v$=%1 oranındaki kolonlarda normal kuvvetin artması ile moment taşıma kapasiteleri de artmaktadır. YSDOÇ çeliği ile üretilmiş kolonlarda tüm durumlar için daha yüksek moment kapasitelerine ulaşılmaktadır,

$\rho_v$=%0 ve $\rho_v$=%1 değerleri karşılaştırıldığında; enine donatı oranının en büyük momentten sonraki diyagram bölümünü etkilediği görülmektedir.

Şekil 4.20 de ise hacimsel enine donatı oranının $\rho_v$=%2 olduğu durumda normal kuvvet oranı ile boyuna donatı türünün değişmesi halinde elde edilen moment eğrilik ilişkileri verilmektedir.

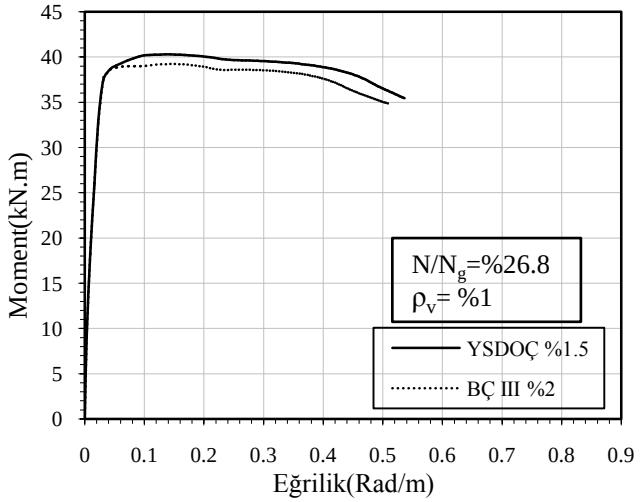



**Şekil 4.20:** $\rho_v$=%2 Durumunda Elde Edilen Moment Eğrilik İlişkileri

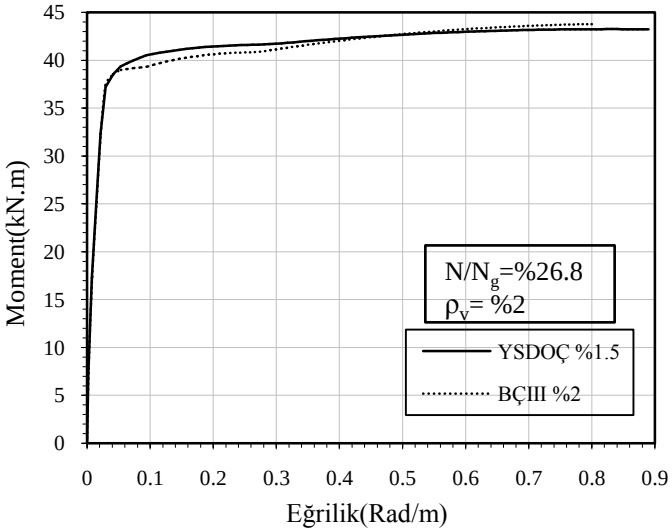
$\rho_v$=%2 durumu için, kolonların davranışları incelendiğinde, normal kuvvetin artışıyla moment taşıma kapasiteleri artmaktadır, $N/N_g$=%13.4 (100 kN) ve $N/N_g$=%26.8 (200 kN) normal kuvvet oranları için ulaşılan en büyük eğrilik değerleri, normal kuvvetin olmadığı duruma göre daha büyüktür.

Moment eğrilik analizinin son bölümünde farklı boyuna donatı oranına sahip (% 1.5 YSDOÇ, %2 BÇIII) iki adet 1/3 ölçekli kolonda, $N/N_g$=%26.8 olduğu durum için karşılaştırmalı olarak moment eğrilik ilişkileri incelenmiştir. Bu ilişkiler hacimsel enine donatı oranının %1 olduğu durum için Şekil 4.21 de, %2 olduğu durumda Şekil 4.22 de verilmiştir.

Bu durumda, YSDOÇ kullanılarak %25 az donatı ile benzer kesit davranışı elde edilmiştir.



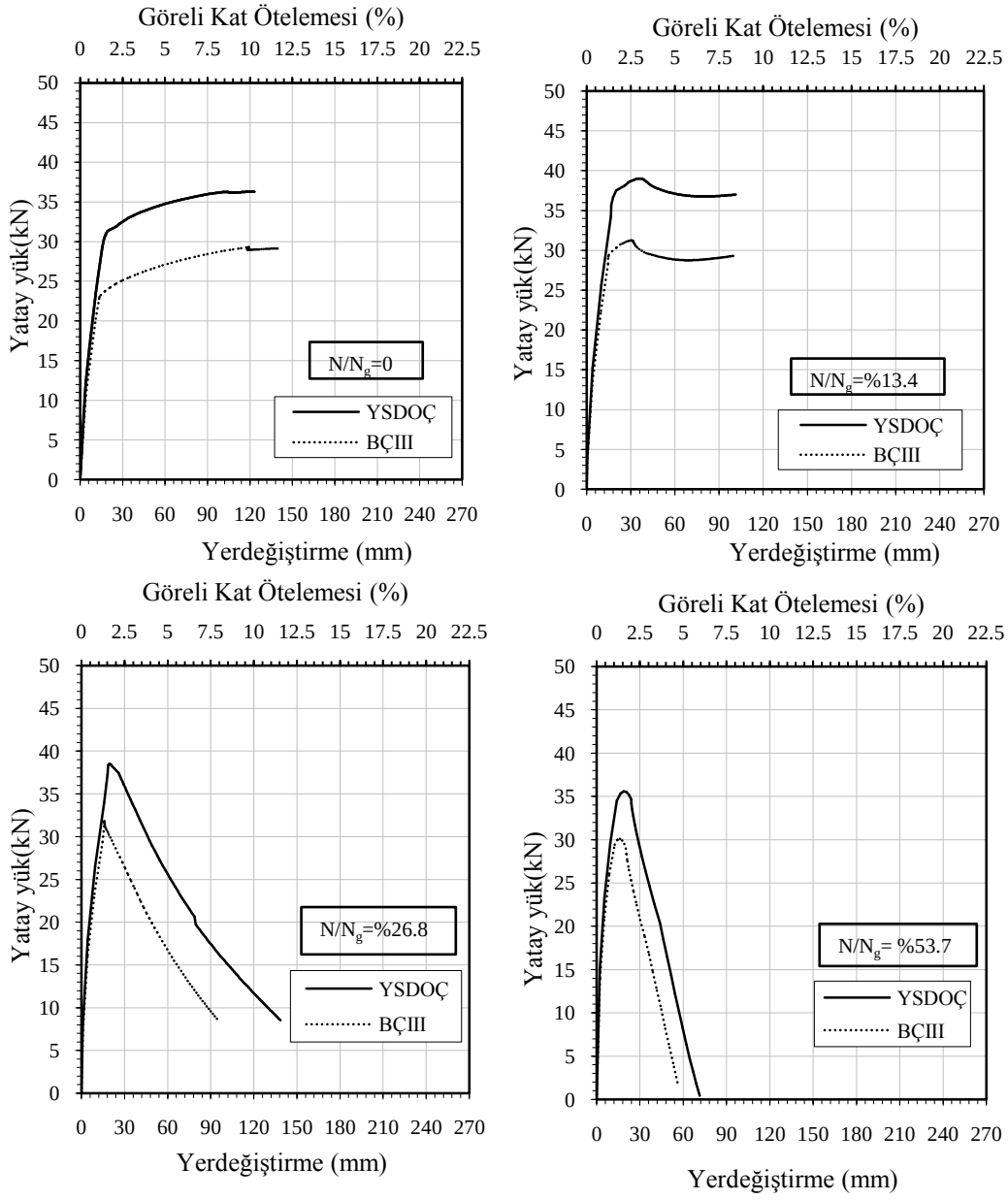

**Şekil 4.21:** $N/N_g$=%26.8, $\rho_v$=%1 için Farklı Boyuna Donatı Kullanım Durumu




**Şekil 4.22:** $N/N_g$=%26.8 ve $\rho_v$=%2 için Farklı Boyuna Donatı Kullanım Durumu

### 4.2.2 İtme Analizi

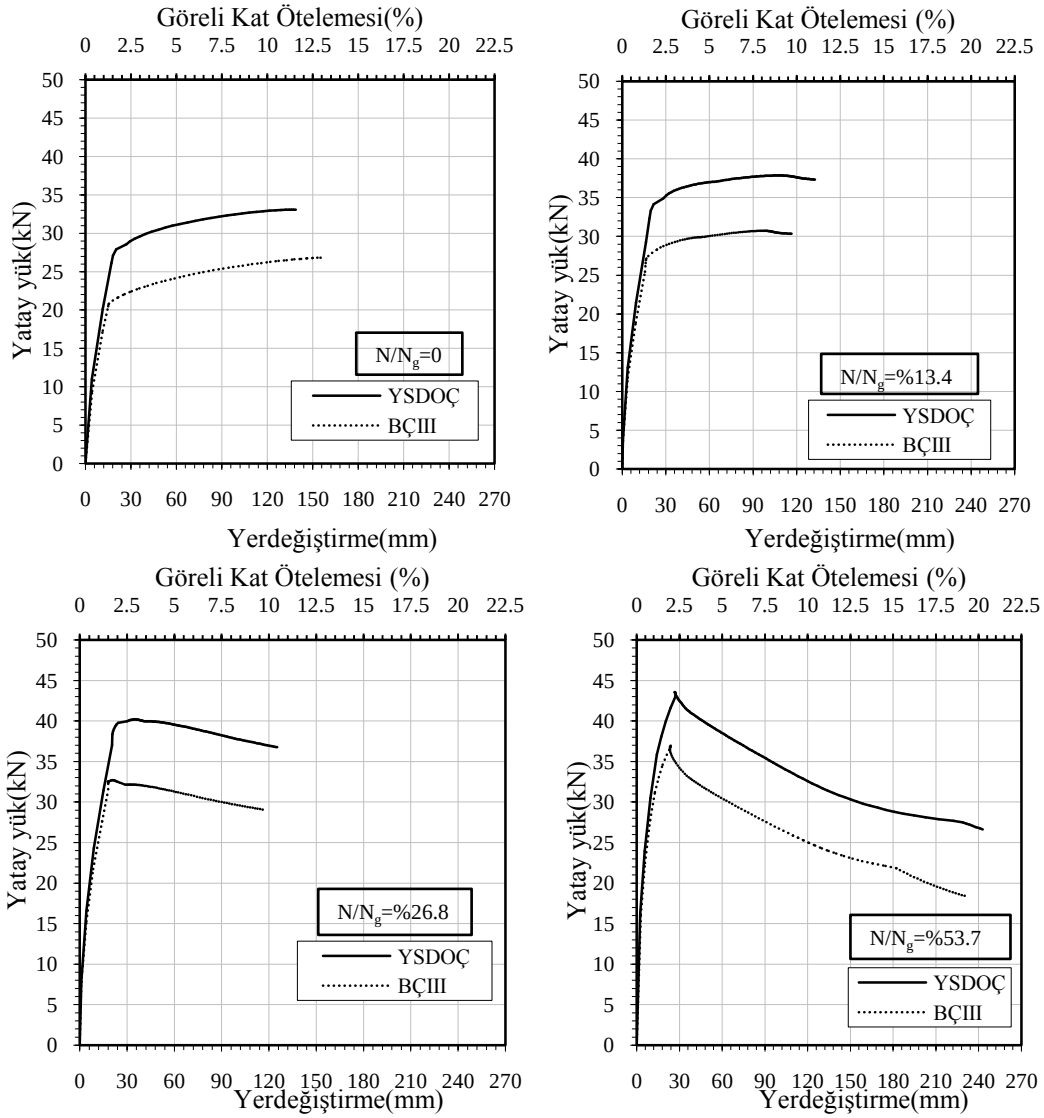
Bu bölümde 1/3 ölçekli betonarme kolonlarda COLA programı ile oluşturulan itme eğrileri verilmiştir. İlk olarak, faklı normal kuvvet oranları ve hacimsel donatı oranı $\rho_v$ nin %0 olduğu durum için yatay yük tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 4.23 de verilmiştir.




**Şekil 4.23:** Hacimsel Enine Donatı Oranı $\rho_v$=%0 için Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkileri

Normal kuvvet oranının %0 olduğu durumla %13.4 olduğu durum karşılaştırıldığında, normal kuvvetin artmasıyla her iki tür donatı ile üretilmiş kolonda da yatay yük taşıma kapasitesinin bir miktar arttığı görülmektedir. Normal kuvvet oranının %0 ve %13.4 olduğu durumlar için, iki farklı türde donatıyla üretilmiş kolonların yaklaşık aynı yerdeğiştirme seviyelerine ulaştığı ancak YSDOÇ ile üretilen kolonun daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olduğu görülmektedir. $N/N_g$ oranının %26.8 ve %53.7 olduğu durumlarda ise ulaşılan en büyük yatay yük seviyesinden sonra dayanımda ani düşüşler görülmüştür.

Hacimsel enine donatı oranının %1 olduğu durumda, normal kuvvet oranlarının farklı değerleri için elde edilen yatay yük-yerdeğiştirme-göreli kat ötelemesi ilişkileri Şekil 4.24 de verilmiştir.

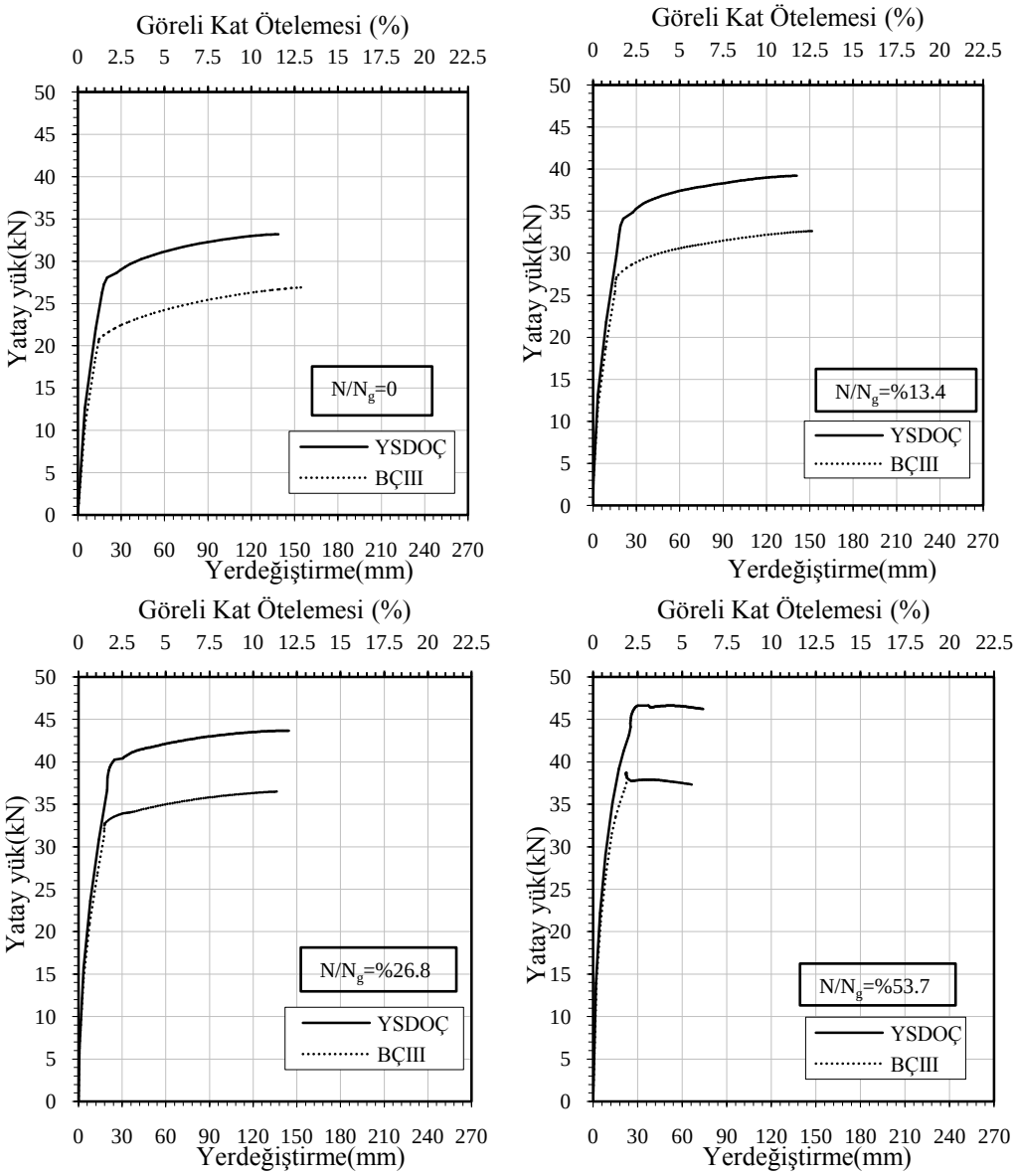



**Şekil 4.24:** Hacimsel Enine Donatı Oranı $\rho_v$=%1 için Yatay Yük Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkileri

Normal kuvvet oranının değiştiği tüm durumlarda, YSDOÇ donatı çeliği kullanılarak üretilmiş kolonun daha yüksek yatay yük seviyelerine eriştiği görülmektedir.

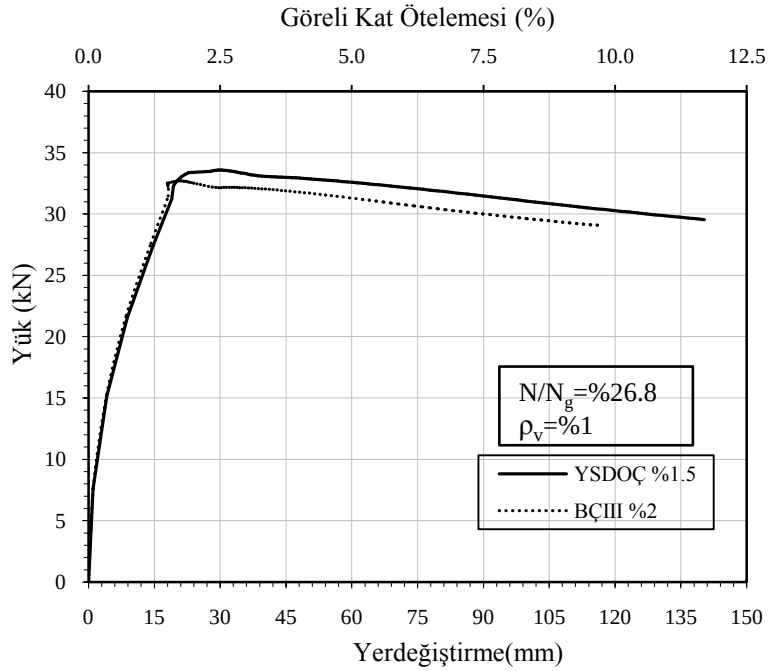
Hacimsel enine donatı oranı $\rho_v$=%2 olan kolonlarda normal kuvvetin farklı oranları için karşılaştırmalı yatay yük-tepe yerdeğiştirmesi grafikleri Şekil 4.25 de verilmiştir.

Grafikler incelendiğinde normal kuvvetin sistemde yer almadığı durumla normal kuvvet oranının %26.8 ve %53.7 olduğu durumlar karşılaştırıldığında YSDOÇ ile üretilmiş kolon için göreli kat ötelemelerinin ve yatay yük kapasitesinin arttığı, BÇIII ile üretilmiş kolonda ise göreli kat ötelemelerinin azaldığı, yatay yük taşıma kapasitesinin de arttığı görülmektedir. Normal kuvvet oranının %53.7 olduğu durumda ise her iki tür donatı için de en düşük göreli kat ötelemesi değerleri elde edilmiştir.

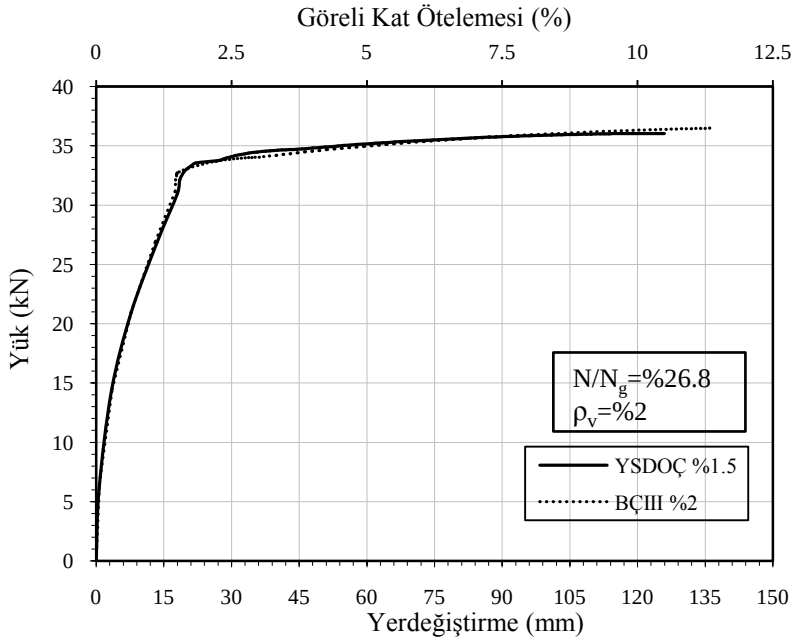



**Şekil 4.25:** Hacimsel Enine Donatı Oranı $\rho_v$ =%2 için Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkileri

Farklı boyuna donatı oranı ile üretilmiş, farklı tür çeliklerin kullanımı durumunda elde edilen kolon davranışları ise aşağıda verilmiştir.YSDOÇ çeliğinin boyuna donatı olarak %1.5 oranında kullanımı durumunda, %2 lik BÇIII donatısı ile üretilmiş halle karşılaştırılması, normal kuvvet oranı ile hacimsel enine donatı oranının iki farklı durumu için Şekil 4.26 ve 4.27 de yapılmıştır.




**Şekil 4.26:** 1/3 Ölçekli Kolonlarda Farklı Boyuna Donatı Oranları İçin Yatay Yük Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkisi, $\rho_v$ =%1

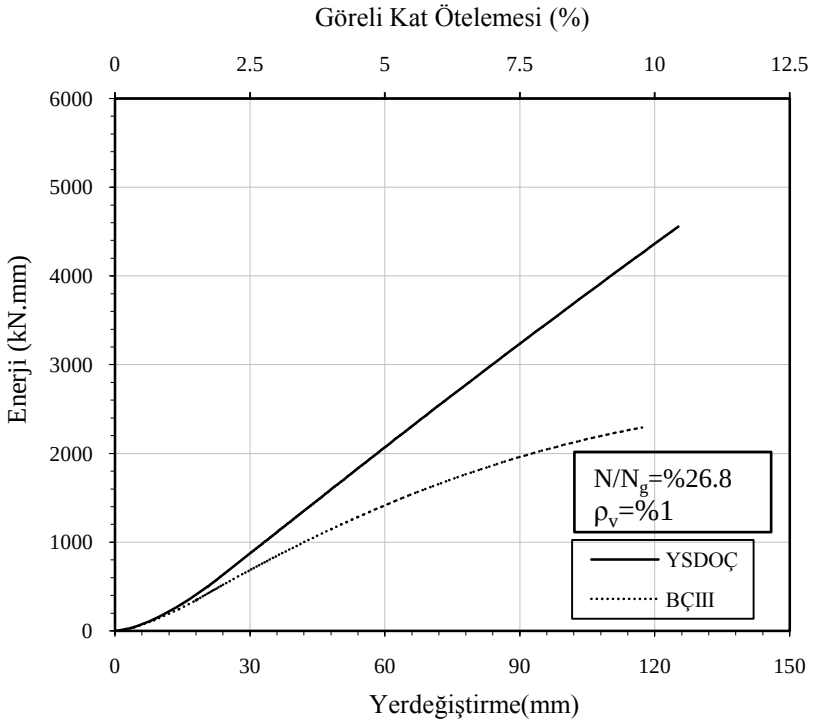



**Şekil 4.27:** 1/3 Ölçekli Kolonlarda Farklı Boyuna Donatı Oranları İçin Yatay Yük-Tepe Yerdeğiştirmesi İlişkisi, $\rho_v$ =%2

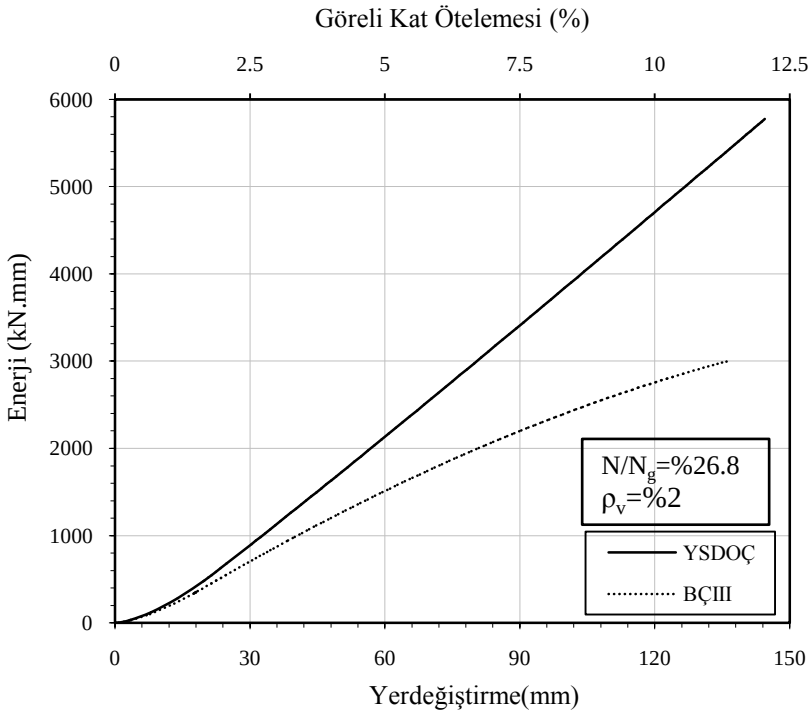
İki farklı durum için yapılan karşılaştırmada, YSDOÇ kullanımı durumunda yaklaşık %25 oranında donatı tasarrufu sağlanmış olmaktadır.

### 4.2.3 Enerji Tüketme Analizi

1/3 ölçekli betonarme kolonlarda enerji hesapları normal kuvvet oranı %26.8 olduğunda, hacimsel enine donatı oranının %2 ve %1 olduğu durumlar için yapılmıştır. YSDOÇ ve BÇIII ile üretilmiş kolonlar için, aynı oranda boyuna donatı kullanımı durumunda oluşacak karşılaştırılmalı enerji grafikleri hazırlanmıştır. Hacimsel enine donatı oranının %1 ve %2 olduğu durumlarda elde edilen enerji grafikleri sırası ile Şekil 4.28 ve Şekil 4.29 da verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü gibi $\rho_v$ =%2 olan kolon $\rho_v$ =%1 olan kolona göre daha fazla enerji tüketme kapasitesine sahiptir. YSDOÇ ile üretilmiş kolonun enerji tüketme kapasitesi BÇIII ile üretilmiş olan kolona gore daha fazladır. İleri göreli kat ötelemeleri düzeylerinde, bu farkın neredeyse 2 katına çıktığı görülmektedir. Örneğin 125 mm lik tepe yerdeğiştirmesi düzeyinde, $\rho_v$ =%2 olan kolon için, YSDOÇ ile üretilmiş numunede enerji tüketme kapasitesi yaklaşık 5000 kN.mm iken, bu değer BÇIII ile üretilmiş olanda yaklaşık 2840 kN.mm dir.




**Şekil 4.28:** 1/3 Ölçekli Kolonda Karşılaştırmalı Enerji-Yerdeğiştirme İlişkileri $\rho_v$=%1




**Şekil 4.29:** 1/3 Ölçekli Kolonda Karşılaştırmalı Enerji-Yerdeğiştirme İlişkileri $\rho_v$=%2

Yukarıda verilmiş olan tüm kuramsal çalışmalar ile Bölüm 3 de anlatılmış olan deneysel çalışmalar hakkındaki genel yorum ve sonuçlar aşağıdaki bölümde yer almaktadır.

# 5. YORUMLAR VE SONUÇLAR

Bu bölümde öncelikle literatürde yer alan ve Bölüm 1 de Önceki Çalışmalar başlığı altında özetlenmiş bulunan çalışmalarda, yüksek dayanımlı ve yüksek şekildeğiştirme özellikli çelikler ile ilgili ulaşılmış genel sonuçlara yer verilmiştir. Ardından da bu çalışmada deneysel ve kuramsal olarak elde edilen sonuç ve yorumlara yer verilmiştir.

Önceki çalışmalara dayanarak yüksek dayanım ve şekildeğiştirme özellikli çeliklerin, betonarme kesitte donatı olarak kullanımı ile ilgili şu sonuçlar ifade edilebilir.

- 500 MPa akma dayanımı ve yüksek şekildeğiştirme özellikli çelikler ile üretilmiş elemanlarda, 300 ve 430 MPa akma dayanımına sahip donatılar ile üretilen elemanlara göre, aynı eğilme kapasitesine ulaşmak için daha düşük oranda boyuna donatı kullanılacağı ve daha düşük eğilme rijitliklerine ulaşılacağı ifade edilmiştir. Kirişlerde 300 MPa akma dayanımına sahip çeliklerin rijitlik kaybını önleme açısından, yüksek akma dayanımlı çeliğe göre uygun olduğu, kolonlar için ise 500 MPa akma dayanımlı çeliğin daha uygun olduğu belirtilmiştir, [7].
- Termal hareketler ve trafik yükleri gibi tekrarlı yüklemelere maruz kalan elemanların yüksek şekildeğiştirme özellikli, 300 veya 500 MPa akma dayanımına sahip deprem çelikleri kullanılarak üretilmesinin yerinde olacağı belirtilmiştir, [4].
- Yüksek dayanımlı çelikler ile üretilen kirişlerin tokluğunun geleneksel çelikler ile üretilenlere göre daha yüksek olduğu ifade edilmiştir, [14].
- 420 MPa akma dayanımına sahip donatı kullanılarak üretilen kolonlarda göçme modu donatının akmasından kaynaklanırken, yüksek dayanımlı çelik durumunda göçme modu betonun göçmesi olmaktadır, [17].
- Kolon kiriş birleşim bölgelerinde yüksek akma dayanımlı çelikler yerine 300 veya 430 MPa akma dayanımına sahip çeliklerin kullanılması uygun görülürken, kolonlarda yüksek dayanımlı çelik kullanımının daha avantajlı olacağı ifade edilmiştir, [10].

- Öngerilmeli kiriş elemanlarında, uygun öngerme verilmesi durumunda, yüksek akma dayanımına sahip donatı kullanıldığında (~700 MPa), çatlak genişliklerinin istenilen seviyelerde tutulabileceği, ayrıca rijitliklerin ve kayma dayanımlarının arttırılabileceği belirtilmiştir, [13].
- Yüksek akma dayanımına sahip çelikler ile (~800 MPa) üretilmiş kiriş elemanların maksimum dayanımının çok daha yüksek olduğu ve daha sünek bir eğilme göçme moduna sahip oldukları belirtilmiştir, [14].
- Eşit oranda çekme ve basınç donatısı içeren kirişlerin davranışını deneysel olarak inceleyen bir çalışmada, betonun göçmesinden sonra, çeliğin yüksek dayanım karakteristikleri nedeniyle kesitin çalışmaya devam ettiğini, böylece toptan göçmenin önlendiği ifade edilmiştir, [2].

Bu tez çalışması kapsamında yüksek dayanım ve yüksek şekildeğiştirme özellikli çeliğin betonarme kesitte donatı olarak kullanımı konusunda yapılan deneysel ve kuramsal çalışmalar neticesinde ulaşılan sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

- Deneysel olarak incelenen kirişlerde, YSDOÇ donatısı kullanıldığında enerji tüketme kapasitesinin BÇIII çeliğiyle üretilen elemanlara göre daha büyük olduğu ortaya çıkmıştır. YSDOÇ çeliği ile üretilmiş kirişin, BÇIII ile üretilen kirişe göre daha yüksek dayanım kapasitesine eriştiği görülmüştür
- Çelik çekme deneylerinde BÇIII çeliğine göre dayanım açısından daha yüksek bir performans gösteren YSDOÇ çeliğinin, bu pozitif katkıyı betonarme tekil eleman deneylerine de yansıttığı görülmektedir. YSDOÇ çeliği ile üretilmiş PCS-1 ve BS-1 numuneleri PCN-1 ve BN-1 numunelerine göre daha yüksek performans sergilemiştir. BN-1 numunesinde yaklaşık 67 mm lik sehim esnasında göçme durumu görülmüşken, BS-1 numunesinde ise yaklaşık 85 mm lik sehimde göçme gerçekleşmiştir.
- 1/1 Ölçekli kolon deneylerinde; YSDOÇ çeliği ile üretilmiş PCS-1 numunesinde boyuna donatılardaki ilk akma, 45 mm lik çekme çevriminde gerçekleşirken, BÇIII çeliği ile üretilmiş PCN-1 numunesinde ilk akma 36 mm lik çekme çevriminde gerçekleşmiştir, bunun da YSDOÇ çeliğinin yüksek akma dayanımının sağladığı pozitif katkıyı gösterdiği söylenebilir.

- 1/1 ölçekli kolonlarda, deneysel çalışma sonucunda YSDOÇ ve BÇIII çeliği ile üretilmiş kolonların enerji tüketim kapasiteleri karşılaştırıldığında belirgin bir fark görülmemiştir.
- Yakın dayanım özelliğine sahip iki kirişten, %25 oranında daha düşük donatı içeren YSDOÇ ile üretilmiş kirişin rijitliği, BÇIII ile üretilen kirişin eğilme rijitliğiyle benzerlik göstermektedir. Göreli olarak daha düşük oranda YSDOÇ donatısı kullanımı kesitte eğilme rijitliği kaybına sebep olmamıştır.
- YSDOÇ ve BÇIII çelikleri ile üretilmiş iki adet 1/1 ölçekli kolondan, %17 oranında daha az boyuna donatı içeren YSDOÇ ile üretilmiş kolonun diğer kolonla karşılaştırıldığında benzer davranış sergilediği görülmüştür. Göreli olarak daha az donatı içermesine karşın, YSDOÇ ile üretilmiş kolonun rijitlik açısından da diğer kolon ile benzer özelliklerde olduğu tespit edilmiştir.
- Kuramsal olarak incelenen kolonlarda aynı boyuna donatı oranına sahip YSDOÇ çeliği ile üretilmiş kolonun, BÇIII çeliği ile üretilmiş kolona göre daha yüksek enerji tüketme kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir.
- Kuramsal olarak incelenen 1/3 ölçekli betonarme kolonlardan, YSDOÇ ile üretilmiş olanlar, farklı normal kuvvet ve hacimsel enine donatı oranları için BÇIII çeliğine göre daha yüksek moment ve yatay yük taşıma kapasitelerine ulaşmıştır.
- 1/3 ölçekli betonarme kolonlardan, %25 oranında daha az YSDOÇ çeliği içeren kolonun, BÇIII çeliği ile üretilmiş kolon ile aynı davranışı sergilediği tespit edilmiştir. İki kolon eğilme rijitlikleri bakımından karşılaştırıldığında da, benzer eğilme rijitliklerine sahip oldukları görülmüştür.
- 1/3 ölçekli betonarme kolonlarda hacimsel enine donatı oranı arttırıldıkça davranıştaki azalan kolun eğimi azalmakta ve yatay duruma yanaşmaktadır.
- Aynı donatı oranına sahip 1/3 ölçekli betonarme kolonlarda, YSDOÇ çeliği ile üretilmiş kolonun, BÇIII çeliği ile üretilmiş kolona göre daha yüksek enerji tüketim kapasitesine sahip olduğu tespit edilmiştir.

**KAYNAKLAR**


[1] **Guralnick, S. A.,** 1960. High Strength Deformed Steel Bars for Concrete Reinforcement, *Journal of the American Concrete Institute (ACI),* **57,** 241-282.

[2] **Sinha, N., C., Ferguson, P., M.,** 1964, Ultimate Strength with High Strength Reinforcing Steel with an Indefinite Yield Point, *Journal of the American Concrete Institute*, **61,** 399-418.

[3] **Allington. C. J, Bull. D. K,** 2002. Influences of Locally Produced and Imported Reinforcing Steel on the Behaviour of Reinforced Concrete Members, University Of Canterbury, New Zealand.

[4] **Bull. D. K, Allington. C. J,** 2002**.** L, N and E Grade 500 Steel, *Journal of the Structural Engineering Society of New Zealand* , **15,** 1-5.

[5] **Helgason. T, Hanson. J, Somes. N, Corely. G, Hogstad. E,** 1975. Fatigue Strength of High-Yield Reinforcing Bars, *Research Result,* NCHRP.

[6] **MacGregor. J, Jhamb. I, Nuttall. N,** 1971. Fatigue Strength of Hot Rolled Deformed Reinforcing Bars, *ACI Journal*, **68,** 169-179.

[7] **Fenwick, R. C. ,**2003 Potential Problems With The Use Of Grade 500 Reinforcement, *Study report by Environmental Engineering*, University Of Auckland, New Zealand.

[8] **Lin, Cheng, Ming,** 2000. Seismic Behaviour and Design of Reinforced Concrete Interior Beam Column Joints, *Research Report 2000-1 Dept. Of Civil Engineering,* University Of Canterbury, New Zealand.
.

[9] **Young, K. L.,** 1998. Anchorage Plates and Mechanical Couplers in Seismic Resistant Concrete Frames Reinforced with Threaded Bar, *MSc Thesis,* University of Auckland, New Zealand.

[10] **Brooke, N. J., Megget L.M., Ingham, J.M.,** 2005. Factors to Consider in The Use of Grade 500E Longitudinal Reinforcement in the Beams of Ductile Moment Resisting Frames, *Journal of the Structural Engineering Society of New Zealand*, **18,** 14-22.

[11] **Megget, L. M.,** 2005. Seismic Design and Behaviour of External Reinforced Concrete Beam-Column Joints Incorporating 500E Grade Steel Reinforcing, *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, **38,** 73-86.

[12] **Allington. C. , J, Bull. D. K,** 2003. Grade 500 reinforcement: The overstrength Factor for Pacific Steel Micro-Alloy Reinforcement, *Proceedings of the Pacific Conference on Earthquake Engineering*, 2003.

[13] **Okada. K. Et al.,** 1984. Reinforced Concrete Members with High Strength Steel Bars, *Transactions of the Japan Concrete Institute*, **6,** 567-574.

[14] **Ansely, M.,** 2002. Investigation into the Structural Performance of MMFX Reinforcing, *Preliminary Draft Report*, Structures Research Center, Florida.

[15] **Seliem, H. M.,** 2007. Behavior of Concrete Bridges Reinforced with High-Performance Steel Reinforcing Bars, *PhD Thesis*, North Carolina State University, Raleigh, NC.

[16] **Yotakhong, P.,** 2003. Flexural Performance of MMFX Reinforcing Rebars in Concrete Structures, *M.Sc. Thesis*, North Carolina State University, Raleigh, NC.

[17] **El-Hacha, R., Rizkalla, S.,** 2002. Fundamental Material Properties of MMFX Steel Rebars, *NCSU-CFL Report No. 02-04*, Constructed Facilities Laboratory (CFL), North Carolina University, Raleigh, NC.

[18] **AS/NZS 4671:** 2001. Steel Reinforcing Materials, *Standards Association of New Zealand*, Wellington.

[19] **ASTM A 706/A 706M REV A,** 2005. Standart Specification for Low-Alloy Steel Deformed and Plain Bars for Concrete Reinforcement, *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia.

[20] **BS 4449:2005,** 2005. Steel for the reinforcement of concrete-Weldable Reinforcing steel-Bar, coil and decoiled product Specification, *British Standards*, London .

[21] **CSA.G.30.18-M92,** 1992. Billet-Steel Bars for Concrete Reinforcement, *Canadian Standarts Association*, Ontario.

[22] **TS500,** 2000. Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.

[23] **UNI 6407,** 1986. Steel for Reinforcing Concrete. New Italian Standart.

[24] **Elot 1421-3,** 2005. Steel for the reinforcement of concrete-Weldable Reinforcing steel-Part 2:Steel reinforcing Bar Technical Class C (B500C) , *Greek Organizacion For Standardization*, Athens.

[25] **SI 4466-3,** 2000. Steel For The Reinforcement Of Concrete Ribbed Bars, *The Standards Institution Of Israel*, Tel-Aviv.

[26] **NS 3576-3,** 1997. Steel for the reinforcement of concrete Dimensions and Properties Part 3:Ribbed bars B500C, *Standards Norway*, Lysaker.

[27] **COVENIN 316,** 2000. Barras y Rollos de Acero con Resaltes para uso como Refuerzo Estructural, *FONDONORMA*, Caracas.

[28] **NTC 2289,** 1995. BARRAS Y ROLLOS CORRUGADOS DE ACERO DE BAJAALEACION Y/O TERMOTRATADOS para hormigón reforzado en construcciones sismo-resistentes, *Normas Tecnicas Colombianas Oficiales Obligatorias*, Columbia.

[29] **UNE 36065/2000:**2000. Barras corrugadas de acero soldable con Caracteristicas, *especiales de ductilidad para armaduras de hormigon armado*, Madrid.

[30] **LNEC E 455-2002**.2002 Varoes de aço A400NR de ductilidade especial para armaduras de betao armado. *Caracteristicas, ensaios e marcaçao*, Portugal.

[31] **LNEC E 460-2002**.2002 Varoes de aço A500NR de ductilidade especial para armaduras de betao armado. *Caracteristicas, ensaios e marcaçao de ductilidade especial çao*, Portugal.

[32] **Yüksel, E.,Yalçın, C.,** 2007. Ekinciler Demir Çelik Sanayi Tarafından Üretilen Eksismik Deprem Çeliğinin Farklı Betonarme Elemanlarda Davranışının İncelenmesine Yönelik Teknik Rapor, İstanbul, Türkiye.

[33] **Bingöl, Y.,** 2004. Bölgesel Mantolama İle Güçlendirilmiş Ağır Hasarlı Prefabrike Kare Kolonların Davranışı, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

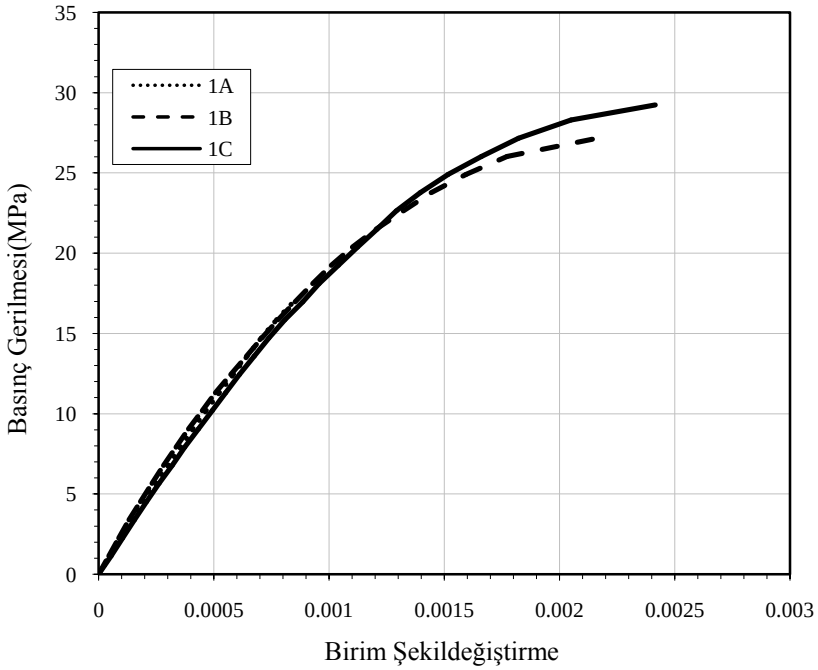
[34] **Yalcin, C., Saatcioglu M.,** 2000. Inelastic analysis of reinforced concrete columns, *Computers&Structures* **77,** 539-555.

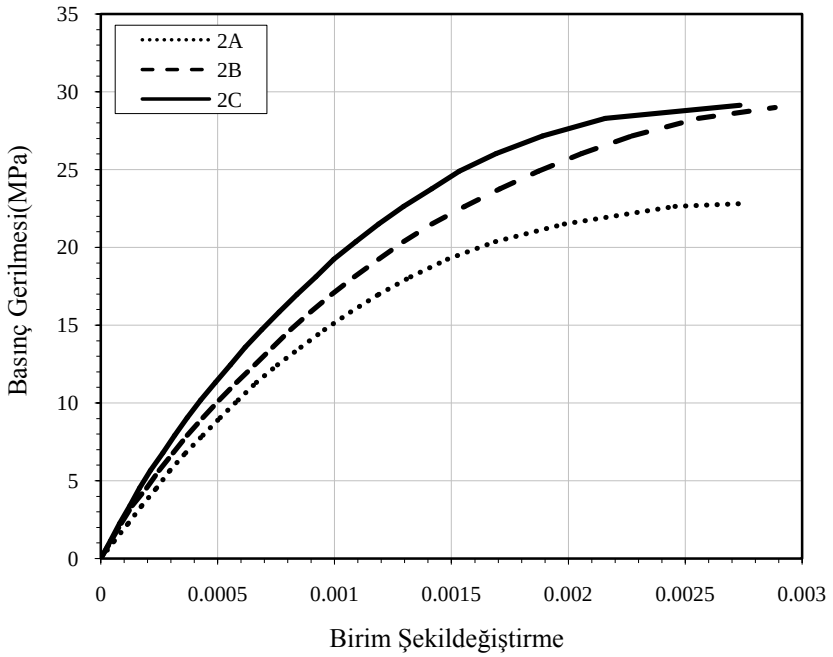
[35] **Ersoy, U. ve Özcebe G.,** 2004. Betonarme:Temel İlkeler, TS500:2000 ve deprem yönetmeliğine(1998) göre hesap, Sistem Matbaacılık, İstanbul.

## EK A BETONARME ELEMANLARDA KULLANILAN DEMİR VE BETONA AİT MALZEME DENEYLERİ

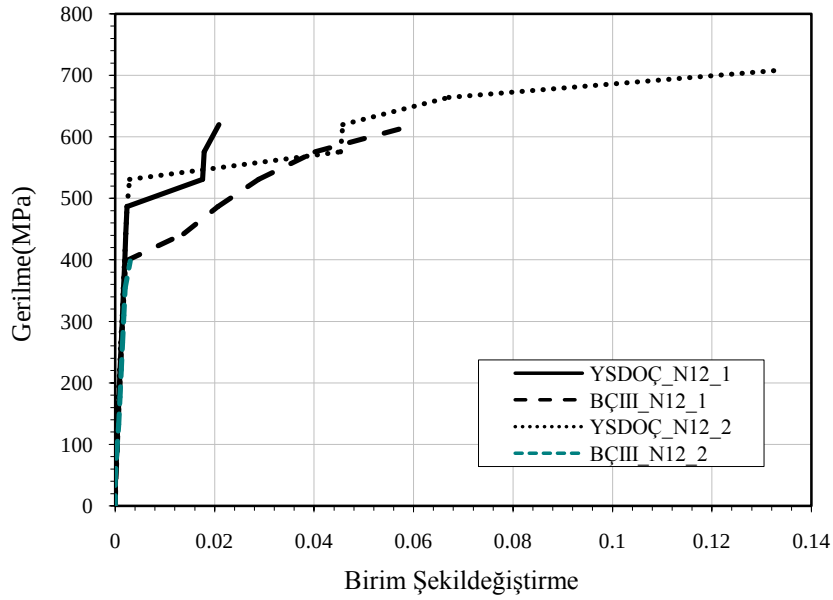
Tablo A.1 Beton Silindir Numunelere Ait Sonuçlar

| Numune | Basınç Dayanımı [MPa] | Elastisite Modulü [MPa] |
|---|---|---|
| 1A | 17,0 | 21502 |
| 1B | 27,2 | 22682 |
| 1C | 29,2 | 20653 |
| 2A | 22,8 | 18518 |
| 2B | 29,0 | 19395 |
| 2C | 29,1 | 23429 |

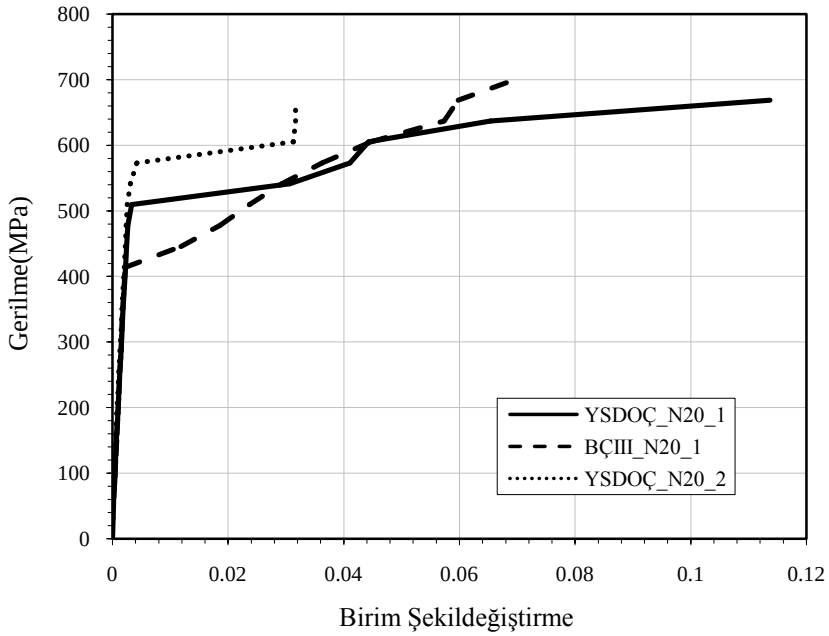





Şekil A.1 Betonda Gerilme-Birim Şekildeğiştirme Grafikleri




Şekil A.2 12 mm Çaplı Donatılar için Gerilme-Birim Şekildeğiştirme İlişkisi




Şekil A.3 20 mm Çaplı Donatılar için Gerilme-Birim Şekildeğiştirme İlişkisi

Tablo A.2 Kullanılan Değişik Donatılar İçin Mekanik Özellikler

| Numune | Akma Dayanımı | | Pekleşme | | Kopma | | $A_{gt}$ % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Gerilme (MPa) | Şekildeğiştirme | Gerilme (MPa) | Şekildeğiştirme | Gerilme (MPa) | Şekildeğiştime | |
| YSDOÇ_ϕ12_1 | 487 | 0.002388 | 531 | 0.017600 | 619 | 0.02091 | 12 |
| YSDOÇ_ϕ12_2 | 531 | 0.002916 | 575 | 0.045336 | 708 | 0.13360 | 14 |
| YSDOÇ_ϕ20_1 | 510 | 0.003300 | 541 | 0.031000 | 669 | 0.11360 | |
| YSDOÇ_ϕ20_2 | 573 | 0.004221 | 605 | 0.031000 | 669 | 0.03168 | 16 |
| BÇIII_ϕ12_1 | 398 | 0.002125 | 442 | 0.013780 | 619 | 0.06045 | 12 |
| BÇIII_ϕ12_2 | 398 | 0.003046 | | | 601 | | 14 |
| BÇIII_ϕ20_1 | 414 | 0.002257 | 446 | 0.011890 | 701 | 0.06980 | 13 |

## ÖZGEÇMİŞ

Arcan YANIK, 1983 yılında İstanbul'da doğmuştur. Lise öğrenimi 2002 yılında Kadiköy Anadolu Lisesi'nde tamamlamıştır. Aynı yıl içinde Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne girmiştir. 2006 bahar yarıyılında bu bölümden mezun olmasının ardından, aynı sene içinde İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Mühendisliği programında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır.