

2002-288



TÜRKİYE BİLİMSEL VE  
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL  
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

**PROJE NO: INTAG-564**

43375

İnşaat Teknolojileri Araştırma Grubu  
Construction Technologies Research Grant Committee

**DEĞİŞİK DONATI TAŞIYAN DENGE ALTI  
BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME  
DAVRANIŞININ TERSİNİR YÜKLEME  
ALTINDA İNCELENMESİ**

**PROJE NO: INTAG-564**

43975

**DOÇ. DR. HASAN KAPLAN**

**DR. ŞEVKET MURAT ŞENEL**

**MAYIS 2002**

**DENİZLİ**

## ÖNSÖZ

Ülkemizin yaşadığı deprem felaketleri depreme dayanıklı bina yapımı ile ilgili çalışmaların önemini ortaya çıkartmıştır. Deneysel çalışmaların kuramsal çalışmalar ile desteklenmesi, davranış ile ilgili bilgilerin uygulamaya aktarılabilmesi deprem kayıplarını önleyebilmek için gereklidir.

INTAG-564 numaralı TUBİTAK projesi kapsamında, değişik donatı yerleşimi ve oralarına sahip betonarme derin kiriş elemanların deprem yükleri altındaki davranışları, Pamukkale Üniversitesi, Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda incelenmiştir. Farklı gövde ve sargı donatısı içeren 12 adet düzlemsel derin kiriş numunesinin deneysel ve kuramsal analizi yapılmıştır. Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı açısından bu çalışma, betonarme elemanlar üzerine tersinir yüklerin uygulandığı ve pek çok ölçüm cihazının kullanıldığı ilk çalışma olması nedeniyle önemlidir. Laboratuvarın deneysel çalışmaya hazır hale getirilmesi ve numunelerin hazırlanarak deneysel çalışmanın gerçekleştirilebilmesi TUBİTAK tarafından sağlanan destek ile mümkün olmuştur. Laboratuvarımızın deneysel altyapısının kurulmasına vesile olan bu destekten ötürü TUBİTAK'a teşekkürü bir borç biliriz.

Deneysel çalışma konusunda bizi cesaretlendiren ve destek veren Prof. Dr. Ergin Atımtay'a teşekkür ederiz. Yürütülen bu çalışmanın, mevcut imkanların geliştirilmesi ile birlikte yeni ve daha kapsamlı deneysel çalışmalar için başlangıç olacağına inanılmaktadır.

Doç. Dr. Hasan KAPLAN  
Dr. Şevket Murat ŞENEL

# İÇİNDEKİLER

Önsöz.....	II
İçindekiler.....	III
Şekiller Dizini.....	VI
Çizelgeler Dizini.....	XI
Simgeler Dizini.....	XII
Özet .....	XIV
Summary .....	XV

## Birinci Bölüm

### GİRİŞ

1. GİRİŞ.....	1
---------------	---

## İkinci Bölüm

### AMAÇ ve KAPSAM

2. AMAÇ ve KAPSAM .....	2
2.1 Deneysel Çalışmanın Amacı .....	2
2.2 Deneysel Çalışmanın Kapsamı .....	3

## Üçüncü Bölüm

### DENEY NUMUNELERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMA YÖNTEMİ

3. DENEY NUMUNELERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMA YÖNTEMİ .....	4
3.1 Numunelerin Tasarımı ve Üretilmesi.....	4
3.1.1 Numunelerin Tasarımı.....	4
3.1.2 Numunelerin Üretilmesi.....	8
3.2 Yükleme Düzenegi.....	9
3.3 Veri Toplama Sistemi.....	12
3.4 Yüklemenin Yapılış Yöntemi .....	15

#### **Dördüncü Bölüm**

### **DENEYSEL ÇALIŞMA**

4.	DENEYSEL ÇALIŞMA .....	16
4.1	Malzeme Deneyleri .....	16
4.1.1	Beton Basınç Deneyleri.....	16
4.1.2	Donatı Çeliği Çekme Deneyleri.....	17
4.2	Numunelerin Tersinir Yükler Altında Eğilme Deneyleri .....	18
4.2.1	DeneySEL Yük-Deplasman İlişkileri.....	19
4.2.2	DeneySEL Moment-Eğrilik İlişkileri.....	20
4.2.3	Numunelerde Çatlak Oluşumları.....	20

#### **Beşinci Bölüm**

### **KURAMSAL ANALİZ**

5.	KURAMSAL ANALİZ .....	22
5.1	Sargılı Beton Davranış Modeli .....	22
5.1.1	Mander Modeli .....	22
5.1.2	Sargılı Beton İçin İskelet Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi .....	25
5.1.3	Kullanılan Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrileri .....	26
5.2	Donatı Çeliği Davranış Modeli .....	28
5.3	Kuramsal Hesap .....	30

#### **Altıncı Bölüm**

### **DENEYSEL ve KURAMSAL SONUÇLARIN**

### **DEĞERLENDİRİLMESİ**

6.	DENEYSEL ve KURAMSAL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ ...	32
6.1	DeneySEL ve Kuramsal Moment Eğrilik İlişkileri .....	32
6.2	Kuramsal Moment Taşıma Kapasiteleri .....	33
6.3	Enerji Sönümlenme Özellikleri .....	34
6.4	Deplasman Sünekliği Seviyeleri .....	36
6.5	Süneklik, Enerji Sönümlenme ve Dayanım Özelliklerinin Karşılaştırılması ....	37
6.6	DeneySEL ve Kuramsal Eğrilik Süneklikleri .....	46

**Yedinci Bölüm**  
**SONUÇ ve ÖNERİLER**

7	SONUÇ ve ÖNERİLER .....	51
7.1	Sonuçlar .....	51
7.2	Öneriler .....	53
KAYNAKLAR.....		54

**EKLER**

Ek A	Numunelerin Donatı Çizimleri ve Fotoğrafları.....	61
Ek B	Donatı Çeliği Çekme Deneyleri .....	71
Ek C	Deney Fotoğrafları .....	74
Ek D	Yük-Deplasman ve Moment-Eğrilik İlişkileri.....	86
Ek E	Kuramsal ve Deneysel Moment-Eğrilik İlişkilerinin Karşılaştırılması.....	97

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1: Deney numunesinin boyutları .....	5
Şekil 3.2: Farklı gövde ve sargı donatısı yerleşimleri .....	6
Şekil 3.3: Deney numunelerindeki donatı yerleşimleri .....	7
Şekil 3.4: Kare hasır şeklinde bağlanmış gövde donatıları .....	7
Şekil 3.5: Numune betonlarının dökülmesi .....	8
Şekil 3.6: Numune kalıplarının sökülmesi .....	8
Şekil 3.7: Deneyler sırasında kullanılan yükleme düzeneği .....	9
Şekil 3.8: Deneye başlamadan önceki son durum .....	11
Şekil 3.9: Mesnetlerde itme ve çekmeye karşı hareketin önlenmesi .....	11
Şekil 3.10: Düzlem dışına hareket önleyiciler.....	11
Şekil 3.11: Yer değiştirme ölçerlerin kullanımı .....	13
Şekil 3.12: Yatayda kullanılan yer değiştirme okumaları ile eğrilik hesabı .....	14
Şekil 3.13: Yatayda ve düzlem dışına doğru oluşan deplasmanların kontrolü...	14
Şekil 3.14: Yükleme ünitesi ve ADU veri toplama ünitesi.....	14
Şekil 4.1: Beton ve donatı numunelerinin deneyden sonraki görünüşleri ....	18
Şekil 5.1: Monoton artan yükleme durumu için gerilme-şekil değiştirme bağıntısı .....	22
Şekil 5.2: Etkili olarak sarılan kesitin görünümü.....	23
Şekil 5.3: Sargı donatısı şekilleri ve ölçüleri (mm.) .....	26
Şekil 5.4: S1, S2, S3 ve S4 sargıları için elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri .....	27
Şekil 5.5: Çekme ve basınç altında çelik gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ....	29
Şekil 5.6: Kuramsal hesaplar sırasında kullanılan gerilme-şekil değiştirme kabulleri .....	29
Şekil 5.7: Pekleşme bölgesinde çekme testi ve türetilen fonksiyona ait verilerin dağılımı .....	30

Şekil 5.8: Moment-eğrilik ilişkisi (Kuramsal yükleme) .....	31
Şekil 5.9: Moment-eğrilik ilişkisi içinde betonda oluşan şekil değiştirmeler (G3) .....	31
Şekil 5.10: Moment -eğrilik ilişkisi içinde betonda oluşan şekil değiştirmeler (S3) .....	31
Şekil 6.1: G2_S3 numunesi için elde edilen yük okumaları .....	32
Şekil 6.2: Karşılaştırmanın yapıldığı deplasman seviyesinin seçilmesi .....	35
Şekil 6.3: Süneklik hesabı için akma anının belirlenmesi .....	36
Şekil 6.4: Boyuna donatı miktarı ve süneklik arasındaki ilişki .....	38
Şekil 6.5: Deneysel moment değerleri ve süneklik arasındaki ilişki .....	39
Şekil 6.6: Deplasman sünekliği ve yutulan enerji değerlerinin karşılaştırılması	40
Şekil 6.7: Sargı şekillerinin sebep olduğu artış oranlarının karşılaştırılması (G1) .....	42
Şekil 6.8: Sargı şekillerinin sebep olduğu artış oranlarının karşılaştırılması (G2) .....	42
Şekil 6.9: Sargı şekillerinin sebep olduğu artış oranlarının karşılaştırılması (G3) .....	43
Şekil 6.10: Gövde şekillerinin sebep olduğu artış oranlarının karşılaştırılması (S1) .....	43
Şekil 6.11: Gövde şekillerinin sebep olduğu artış oranlarının karşılaştırılması (S2) .....	44
Şekil 6.12: Gövde şekillerinin sebep olduğu artış oranlarının karşılaştırılması (S3) .....	44
Şekil 6.13: Gövde şekillerinin sebep olduğu artış oranlarının karşılaştırılması (S4) .....	45
Şekil 6.14: Eğrilik sünekliğinin hesabı .....	46
Şekil 6.15: Deplasman ve eğrilik sünekliklerinin karşılaştırılması .....	47
Şekil 6.16: Moment - eğrilik davranışı ve plastik mafsall oluşumu .....	48
Şekil 6.17: Deney numunelerinde plastik mafsall bölgesinin belirlenmesi .....	49
Şekil 6.18: Kesit boyunca eğrilik yığılımının değişimi [69] .....	50
Şekil A.1: G1_S1 numunesi donatı çizimleri .....	62



Şekil A.2: G2_S1 numunesi donatı çizimleri .....	62
Şekil A.3: G3_S1 numunesi donatı çizimleri .....	63
Şekil A.4: G1_S2 numunesi donatı çizimleri .....	63
Şekil A.5: G2_S2 numunesi donatı çizimleri .....	64
Şekil A.6: G3_S2 numunesi donatı çizimleri .....	64
Şekil A.7: G1_S3 numunesi donatı çizimleri .....	65
Şekil A.8: G2_S3 numunesi donatı çizimleri .....	65
Şekil A.9: G3_S3 numunesi donatı çizimleri .....	66
Şekil A.10 G1_S4 numunesi donatı çizimleri .....	66
Şekil A.11 G2_S4 numunesi donatı çizimleri .....	67
Şekil A.12 G3_S4 numunesi donatı çizimleri .....	67
Şekil A.13 Gövde tip 1-Sargı tip 1 (G1-S1).....	68
Şekil A.14 Gövde tip 1-Sargı tip 2 (G1-S2) .....	68
Şekil A.15 Gövde tip 1-Sargı tip 3 (G1-S3).....	68
Şekil A.16 Gövde tip 1-Sargı tip 4 (G1-S4).....	68
Şekil A.17 Gövde tip 2-Sargı tip 1 (G2-S1).....	69
Şekil A.18 Gövde tip 2-Sargı tip 2 (G2-S2).....	69
Şekil A.19 Gövde tip 2-Sargı tip 3 (G2-S3).....	69
Şekil A.20 Gövde tip 2-Sargı tip 4 (G2-S4) .....	69
Şekil A.21 Gövde tip 3-Sargı tip 1 (G3-S1) .....	70
Şekil A.22 Gövde tip 3-Sargı tip 2 (G3-S2) .....	70
Şekil A.23 Gövde tip 3-Sargı tip 3 (G3-S3) .....	70
Şekil A.24 Gövde tip 3-Sargı tip 4 (G3-S4).....	70
Şekil B.1: Çekme testi raporu (Örnek 1) .....	72
Şekil B.2: Çekme testi raporu (Örnek 2) .....	73
Şekil C.1: Numune G1_S1 (itme).....	75
Şekil C.2: Numune G1_S1 (çekme).....	75
Şekil C.3: Numune G1_S2 (çekme).....	76
Şekil C.4: Numune G1_S3 (itme).....	76
Şekil C.5: Numune G1_S3 (çekme).....	77
Şekil C.6: Numune G1_S4 (deney sonu) .....	77

Şekil C.7: Numune G2_S1 (çekme).....	78
Şekil C.8: Numune G2_S1 (itme).....	78
Şekil C.9: Numune G2_S2.....	79
Şekil C.10 Numune G2_S3 (itme) .....	79
Şekil C.11 Numune G2_S3 (çekme) .....	80
Şekil C.12 Numune G2_S4 (çekme) .....	80
Şekil C.13 Numune G2_S4 (itme) .....	81
Şekil C.14 Numune G3_S1 (itme) .....	81
Şekil C.15 Numune G3_S1 (çekme) .....	82
Şekil C.16 Numune G3_S2 (Deney Sonu).....	82
Şekil C.17 Numune G3_S2.....	83
Şekil C.18 Numune G3_S3 (itme).....	83
Şekil C.19 Numune G3_S3 (çekme).....	84
Şekil C.20 Numune G3_S4 (itme).....	84
Şekil C.21 Numune G3_S4 (çekme).....	85
Şekil C.22 G2_S4 numunesinin deneyden sonraki görünümü .....	85
Şekil D.1: G1_S1 Numunesi yük-deplasman ilişkisi .....	87
Şekil D.2: G1_S3 Numunesi yük-deplasman ilişkisi .....	87
Şekil D.3: G1_S4 Numunesi yük-deplasman ilişkisi.....	88
Şekil D.4: G2_S1 Numunesi yük-deplasman ilişkisi.....	88
Şekil D.5: G2_S2 Numunesi yük-deplasman ilişkisi.....	89
Şekil D.6: G2_S3 Numunesi yük-deplasman ilişkisi.....	89
Şekil D.7: G2_S4 Numunesi yük-deplasman ilişkisi.....	90
Şekil D.8: G3_S1 Numunesi yük-deplasman ilişkisi.....	90
Şekil D.9: G3_S2 Numunesi yük-deplasman ilişkisi.....	91
Şekil D.10 G3_S3 Numunesi yük-deplasman ilişkisi .....	91
Şekil D.11 G3_S4 Numunesi yük-deplasman ilişkisi .....	92
Şekil D.12 G1_S1 Numunesi Moment-eğrilik ilişkisi.....	92
Şekil D.13 G1_S3 Numunesi Moment-eğrilik ilişkisi.....	93
Şekil D.14 G2_S1 Numunesi Moment-eğrilik ilişkisi .....	93
Şekil D.15 G2_S3 Numunesi Moment-eğrilik ilişkisi .....	94

Şekil D.16	G2_S4 Numunesi Moment-eğrilik ilişkisi .....	94
Şekil D.17	G3_S1 Numunesi Moment-eğrilik ilişkisi .....	95
Şekil D.18	G3_S2 Numunesi Moment-eğrilik ilişkisi .....	95
Şekil D.19	G3_S3 Numunesi Moment-eğrilik ilişkisi .....	96
Şekil D.20	G3_S4 Numunesi Moment-eğrilik ilişkisi.....	96
Şekil E.1:	G1_S1 numunesi için kuramsal ve deneysel sonuçların değişimi ..	98
Şekil E.2:	G1_S3 numunesi için kuramsal ve deneysel sonuçların değişimi ..	98
Şekil E.3:	G2_S1 numunesi için kuramsal ve deneysel sonuçların değişimi ..	98
Şekil E.4:	G2_S3 numunesi için kuramsal ve deneysel sonuçların değişimi ..	99
Şekil E.5:	G2_S4 numunesi için kuramsal ve deneysel sonuçların değişimi ..	99
Şekil E.6:	G3_S1 numunesi için kuramsal ve deneysel sonuçların değişimi ..	99
Şekil E.7:	G3_S2 numunesi için kuramsal ve deneysel sonuçların değişimi ..	100
Şekil E.8:	G3_S3 numunesi için kuramsal ve deneysel sonuçların değişimi ..	100
Şekil E.9:	G3_S4 numunesi için kuramsal ve deneysel sonuçların değişimi ..	100

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1: Boyuna donatı miktarları ,geometrik oranları ve karşılaştırma değerleri .....	7
Çizelge 4.1: Beton basınç deneyi sonuçları .....	17
Çizelge 4.2: Donatı çeliği çekme testi sonuçları (ortalama) .....	18
Çizelge 5.1: Sarılmış ve sarılmamış beton için dayanım ve şekil değiştirme değerleri .....	27
Çizelge 5.2: Donatı çeliklerinin pekleşme ve kopma şekil değiştirmeleri .....	28
Çizelge 6.1: Kuramsal ve deneysel moment değerlerinin karşılaştırılması .....	34
Çizelge 6.2: Numuneler tarafından sönmölen enerji miktarları .....	35
Çizelge 6.3: Deplasman sünekliği değerleri .....	37
Çizelge 6.4: Süneklik, moment, boyuna donatı oranı ve yutulan enerji miktarları .....	37
Çizelge 6.5: Farklı sargı şekillerinin G1 gövde donatısı üzerindeki etkileri ..	40
Çizelge 6.6: Farklı sargı şekillerinin G2 gövde donatısı üzerindeki etkileri ..	40
Çizelge 6.7: Farklı sargı şekillerinin G3 gövde donatısı üzerindeki etkileri...	40
Çizelge 6.8: Farklı gövde şekillerinin S1 sargı donatısı üzerindeki etkileri ...	40
Çizelge 6.9: Farklı gövde şekillerinin S2 sargı donatısı üzerindeki etkileri ...	41
Çizelge 6.10: Farklı gövde şekillerinin S3 sargı donatısı üzerindeki etkileri ...	41
Çizelge 6.11: Farklı gövde şekillerinin S4 sargı donatısı üzerindeki etkileri ...	41
Çizelge 6.12: Eğrilik sünekliği değerleri .....	46
Çizelge 6.13: Kuramsal ve deneysel eğrilik sünekliklerinin karşılaştırılması ..	50

## SİMGELER DİZİNİ

- $A_c$  : Tarafsız eksen üzerinde basınca maruz beton alanı ( $\text{mm}^2$ )
- $A_{cc}$  : Sarılmış beton enkesit alanı ( $\text{mm}^2$ )
- $A_e$  : Etkili olarak sarılmış alan ( $\text{mm}^2$ )
- $A_s$  : Boyuna donatı toplam alanı ( $\text{mm}^2$ )
- $A_{sh}$  : Enine donatı enkesit alanı ( $\text{mm}^2$ )
- $A_{shx}$  : x doğrultusuna paralel enine donatı kesit alanı ( $\text{mm}^2$ )
- $A_{shy}$  : y doğrultusuna paralel enine donatı kesit alanı ( $\text{mm}^2$ )
- $A_{smin}$  : En aza donatı içeren kesitteki boyuna donatı toplam alanı ( $\text{mm}^2$ )
- $b$  : Kesit genişliği (mm)
- $b_c$  : Sarılmış kesit genişliği (mm)
- $b_{cx}$  : Sarılmış kesit genişliği (mm)
- $b_{cy}$  : Sarılmış kesit genişliği (mm)
- $C$  : Tarafsız eksenin en dış basınç lifine uzaklığı (mm)
- $d$  : Yükleme açıklığı (mm)
- $d_c$  : Sarılmış kesit yüksekliği (mm)
- $d_b$  : Donatı çapı
- $E_c$  : Beton elastisite modülü (MPa)
- $E_{sh}$  : Donatı için pekleşme modülü
- $E_{sb}, E_s$  : Çelik için elastisite modülü (MPa)
- $f_l$  : Yanal basınç (MPa)
- $f_l'$  : Etkili yanal basınç (MPa)
- $f_l' x$  : x doğrultusundaki etkili yanal basınç (MPa)
- $f_l' y$  : y doğrultusundaki etkili yanal basınç (MPa)
- $f_c$  : Betonda oluşan basınç gerilmesi
- $f'_{cc}$  : Sargılı beton basınç dayanımı (MPa)
- $f'_{co}$  : Sargısız beton basınç dayanımı (MPa)
- $f_{si}$  : i seviyesindeki donatıda oluşan gerilme (MPa)
- $f_{yh}$  : Sargı donatısı akma dayanımı (MPa)

- $h$  : Deneysel numunesinin kesit yüksekliği
- $k_1$  : Beton dayanım artışı katsayısı
- $k_2$  : Beton Şekil değiştirme artışı katsayısı
- $k_e$  : Sargı etki katsayısı
- $L$  : Deneysel numunesinin uzunluğu
- $l_p$  : Plastik mafsal uzunluğu (mm)
- $M_{deney}$  : Deneysel moment değerisi (kNm)
- $M_u$  : Kuramsal moment değerisi (kNm)
- $s$  : Sargı donatıları arasındaki mesafe (mm)
- $s'$  : Sargı donatıları arasındaki temiz açıklık (mm)
- $S_l$  : Boyuna donatılar arasındaki mesafe (mm)
- $w$  : Boyuna donatılar arasındaki mesafe (mm)
- $\epsilon_{co}$  : Sarılmamış betonda basınç dayanımına karşılık gelen Şekil değiştirme
- $\epsilon_{cc}$  : Sarılmış betonda basınç dayanımına karşılık gelen Şekil değiştirme
- $\epsilon_c$  : Beton iÇin Şekil değiştirme ifadesi
- $\epsilon_{sh}$  : Çelik iÇin pekleşme Şekil değiştirmesi
- $\epsilon_{si}$  :  $i$  seviyesindeki donatıda oluşan Şekil değiştirme
- $\epsilon_{sy}$  : Çelik iÇin akma Şekil değiştirmesi
- $\epsilon_{su}$  : Çelik iÇin kopma Şekil değiştirmesi
- $\rho_{cc}$  : Boyuna donatı alanının sarılmış alana oranı
- $\rho_s$  : Boyuna donatı geometrik oranı
- $\rho_{sh}$  : Sargı donatısı alanının sargılı beton alanına oranı
- $\phi$  : Eğrilik (1/m)
- $\mu_\phi$  : Eđrilik sűnekliđi
- $\mu_\Delta$  : Deplasman sűnekliđi

## ÖZET

Betonarme konusunda özellikle son elli yıl içinde davranışı modellemeye yönelik çok sayıda kuramsal çalışma gerçekleştirilmiştir. Buna rağmen üzerinde kesin olarak mutabakata varılmış bir model yoktur. Sargılamının betonarme davranışı üzerinde olumlu etkileri olduğu bilinmektedir. Kullanılan boyuna donatı oranının da elemanın sünek davranışı üzerinde etkili olduğunu yapılan kuramsal ve deneysel çalışmalar göstermiştir. Yürütülen çalışmada, değişik donatı oranlarına ve yerleşimine sahip 12 adet betonarme derin kiriş numunesinin tersinir yükler altındaki davranışı incelenmiştir. Değişken donatı miktarının, yerleşiminin ve kesit geometrisinin dayanım ve süneklik üzerindeki etkileri deneysel ve kuramsal olarak araştırılmıştır.

Deney numuneleri hazırlanırken gövde ve sargı donatısı yerleşimleri ve miktarları değişken olarak alınmış, deney sonuçlarının değerlendirilmesinde ise numunelerin yük-deplasman ve moment-eğrilik mukabelelerinden yararlanılmıştır.

Deneysel ve kuramsal çalışmalar gövde ve/veya sargı bölgelerinde kullanılan boyuna donatı miktarını arttırmanın elemanların dayanımını yükselttiğini, eğrilik ve deplasman sünekliğini düşürdüğünü göstermiştir. Dayanım ve sönmölenen enerji miktarlarında sağlanan artış oranı, boyuna donatı oranında sağlanan artışın gerisinde kalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Derin kiriş, betonarme, deprem dayanımı, tersinir yükleme, eğrilik sünekliği, deplasman sünekliği, sargılı beton.

## SUMMARY

Many studies were made especially last fifty years which aimed to model the behavior of reinforced concrete. However, there is no single behavior model which was agreed upon by consensus of researchers. It was known that confinement effect improves the concrete behavior. Theoretical and experimental studies show that the amount of longitudinal reinforcement also effects the ductility of reinforced concrete members. In this study behavior of twelve reinforced concrete deep beam specimens was examined under cyclic-static load reversals. The effect of steel amount and position and shape of section on strength and ductility of specimens were investigated by evaluating theoretical and experimental results.

Reinforcement amounts and arrangements used in web and flange regions are accepted as variable and load-displacement and moment-curvature responses of specimens were investigated.

Theoretical and experimental results show that increasing the reinforcement amount in web and/or flange regions increase the flexural strength but decrease the displacement and curvature ductility of the members. However the increase in strength and consumed energy ratios are relatively small with respect to the increase in longitudinal reinforcement ratio.

Keywords: Deep beam, earthquake resistance, cyclic loading, curvature ductility, displacement ductility, confined concrete.



## BİRİNCİ BÖLÜM

### GİRİŞ

Ülkemizin belli aralıklar ile yaşadığı deprem felaketleri çok büyük miktarda can ve mal kaybına sebep olmaktadır. Söz konusu kayıpları en aza indirebilmek ve depremlere karşı daha hazırlıklı hale gelebilmek için ülkemiz, bina yapımından kontrolüne dek yeni bir anlayışı ve disiplini yerleştirmeye çalışmaktadır. Yenilenen “Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik” ve imalat sırasında yapıların denetimi hakkındaki yasal düzenleme çalışmaları bu çabanın örneklerindedir.

Deprem bölgesinde yapılan incelemeler göstermiştir ki, yeterli rijitliğe, dayanıma ve sünekliğe sahip olmayan betonarme yapılar deprem hasarını kabul edilebilir sınırlar içinde tutmayı başaramamıştır. Depremi sebep olduğu tersinir yükler altında zorlanan betonarme elemanlar rijitlik ve dayanım kayıplarına uğramış ve ağır hasar görmüştür. Süneklik, dayanım ve rijitlik açısından optimum seviyenin yakalanabilmesi, eleman detaylandırmasının doğru bir biçimde yapılmasını gerektirmektedir. Yaşanan depremler, çok yüksek elastik enerji tüketme kapasitesine sahip rijitliği yüksek betonarme yapıların bu felaketlerden daha az etkilendiğini göstermektedir.

Detaylandırmanın dayanım ve süneklik üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla farklı gövde ve sargı donatılarına sahip denge altı donatı içeren derin betonarme giriş eleman modellerine tersinir yükler uygulanmış, eğilme etkileri ile taşıma kapasitelerine ulaşan numunelerin yük-deplasman ve moment eğrilik davranışları incelenmiştir.

## İKİNCİ BÖLÜM

### AMAÇ VE KAPSAM

Betonarme elemanların davranışlarını doğru şekilde belirleyebilmek için gerek malzeme, gerekse eleman bazında bugüne kadar pek çok deneysel ve kuramsal çalışma yapılmış olmasına rağmen, üzerinde kesin olarak fikir birliğine varılmış bir model henüz yoktur. Bunun en önemli sebebi ise belirtilen değişkenlerin hem sayıca çok oluşu, hem de çok geniş bir aralıkta değişim göstermesidir. Tersinir yükler altındaki davranış bir yana, monoton artan yükler altındaki davranış üzerine bile pek çok çalışma devam etmektedir. Bugüne kadar yapılan pek çok deneysel çalışma Abrams [1] tarafından özetlenmiştir.

#### 2.1 Deneysel Çalışmanın Amacı

Yürütülen bu çalışmada amaç betonarme derin kiriş eleman modellerinin yön değiştiren tekrarlı yükler altında eğilme davranışını incelemek, aşağıda maddeler halinde verilen faktörlerin davranış üzerindeki etkilerini araştırmaktır.

1. Sargı ve gövde bölgelerinde kullanılan boyuna donatının yerleşimi,
2. Sargı ve gövde bölgelerinde kullanılan boyuna donatının miktarı,
3. Kullanılan hasır şeklindeki donatının eleman davranışı ve kırılma şekilleri üzerindeki etkileri,
4. Farklı seviye ve sayılarda kullanılan, gövde ve sargı bölgelerindeki boyuna donatıların, artan eğilme altındaki davranışları ve bu donatıların, elemanın dayanımı ve sünekliği üzerindeki etkileri.

## 2.2 Deneysel Çalışmanın Kapsamı

Farklı gövde ve sargı donatısı miktarları ve yerleşimlerine sahip, özdeş geometrilerde üretilen 12 adet düzlemsel betonarme eleman modeli üzerinde tersinir yükler altında eğilme deneyleri yapılmıştır. Numuneler 3 farklı gövde ve 4 farklı sargı donatısı şeklinin sırası ile bir araya getirilmesi ile hazırlanmıştır. Kesitlerin doğrusal olmayan çözümlemesi yapılmış, elde edilen sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Gövde ve sargı bölgelerinde kullanılan donatıların, elemanların dayanımı, sünekliği, enerji sönmüleme özellikleri ve çatlak oluşumları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deney numuneleri tasarlanırken göçmenin kesme etkileri ile değil eğilme etkileri ile oluşmasına özen gösterilmiştir. Tasarlanan bütün numunelerde kullanılan beton özdeştir ve tek seferde dökülmüştür. Bütün numunelerde kullanılan donatı çapı aynıdır ve aynı kangaldan alınmıştır.

Deneysel olarak elde edilen sonuçların kuramsal sonuçlar ile uygunluğunun araştırılması amacıyla bir bilgisayar uygulaması geliştirilmiştir. Karşılaştırma işlemi yapılırken elemanların moment eğrilik-davranışları esas alınmış, deneysel olarak elde edilen sonuçlar ile kuramsal olarak hesaplanan sonuçlar kıyaslanmıştır. Bu yaklaşımın benimsenmesindeki amaç, deney değişkenlerinin dayanım ve deformasyon üzerindeki etkilerini incelemektir. Kuramsal hesaplar yapılırken, numunelerin hazırlanması sırasında kullanılan beton ve donatıya ait eleman deneylerinin sonuçlarından faydalanılmıştır. Donatının pekleşme davranışı gerçekçi bir biçimde modellenmiş, sargılı beton davranışı için Mander Modeli kullanılarak deney numunelerinin doğrusal olmayan analizi yapılmıştır.

# ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

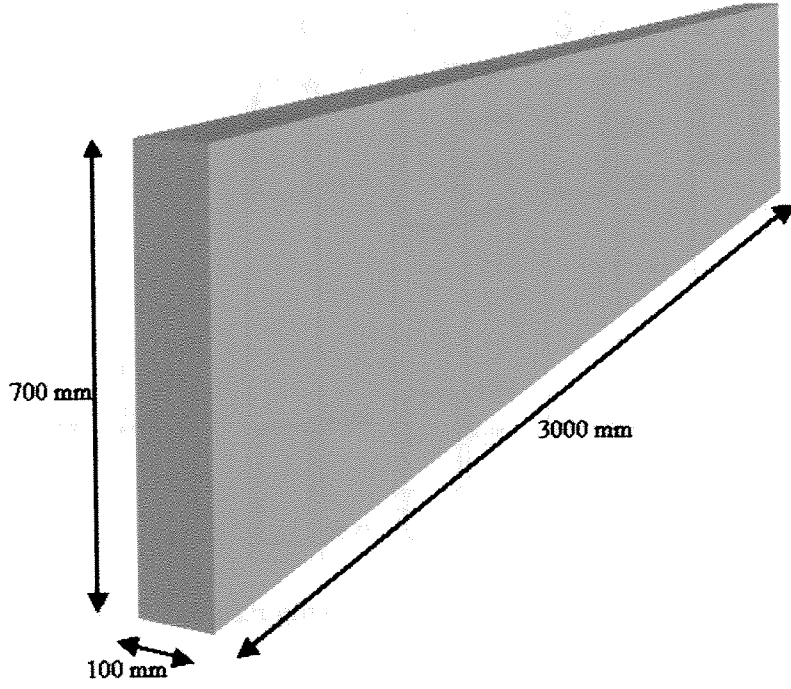
## DENEY NUMUNELERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMA YÖNTEMİ

### 3.1 Numunelerin Tasarımı ve Üretilmesi

#### 3.1.1 Numunelerin Tasarımı

Hazırlanan deney numunelerinin boyutları 100mm x 700 mm x 3000 mm'dir. Deney tekniği açısından hazırlanan numunelerin, orta bölgede oluşturulan yükleme açıklığı yardımıyla iki noktadan yüklenmesi öngörülmüş, bu sayede kesit ortasında kesme kuvvetinin sıfır, momentin ise sabit kaldığı ve ölçümlerin yapıldığı bir bölge elde edilmiştir. Deney numunesinin ölçüleri Şekil 3.1'de, yükleme düzeneğinin görünümü de Şekil 3.7'de verilmektedir.

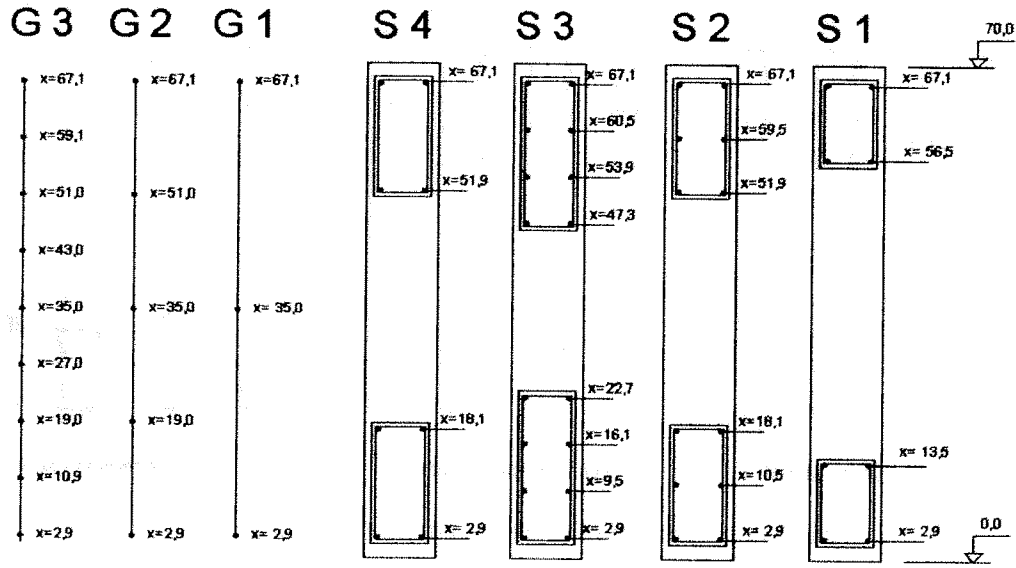
Numunelerin hazırlanması aşamasında yüksek dayanımlı nervürlü BÇ III çeliğinin kullanılması öngörülmüştür. Yapılan kuramsal hesap neticesinde yüksek dayanımlı çelikler ile hazırlanacak olan numunelerin, laboratuvar ortamındaki sınırlı yükleme kapasitesini (200 kN.) zorlayacağı anlaşılmıştır. Bunun üzerine gövde donatısı olarak düşünülen hasır donatılar ve sargı bölgesi için düşünülen enine ve boyuna donatılar için 6 mm çapındaki St 37 çeliği kullanılmıştır. Tasarlanan farklı gövde ve sargı şekilleri laboratuvarda hazırlanmış, donatıların kaynaklanması ile gövde donatısının hasır örgüsü elde edilmiştir.



Şekil 3.1: Deney numunesinin boyutları

Deney numunelerinin hazırlanmasında hazır beton kullanılmıştır. Numunelerde kullanılan beton sınıfı BS20 olarak öngörülmüştür ve brüt beton kullanılmıştır. Donatı çeliği çekme deneyleri Kosgeb'de bulunan DARTEC çekme cihazları ile yapılırken, silindir ve küp numune deneyleri Pamukkale Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarında bulunan hidrolik pres cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

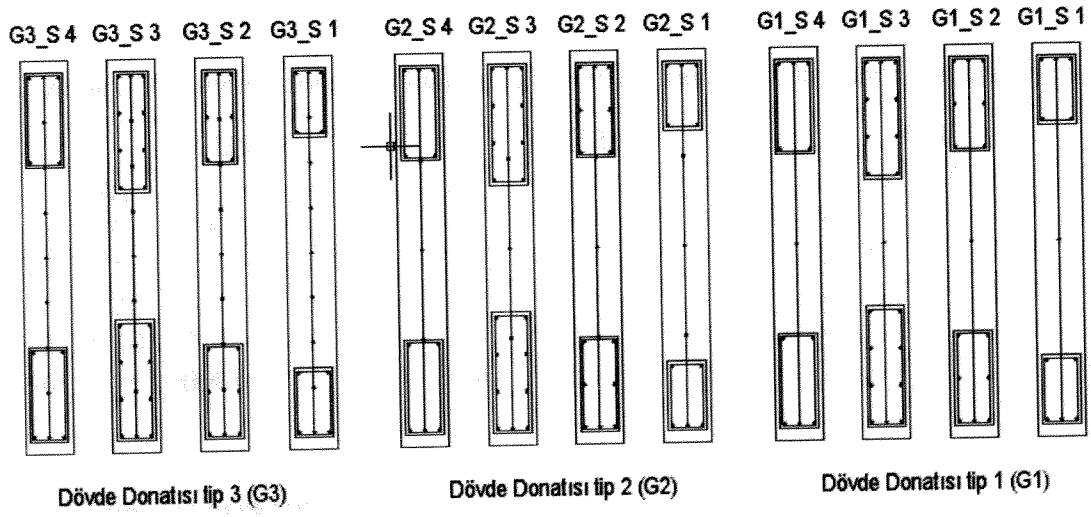
Numuneler türetilirken 3 farklı gövde ve 4 farklı sargı şekli sırası ile birleştirilerek bütün gövde donatısı şekillerinin, bütün sargı şekilleri ile bir araya getirilmesi sağlanmıştır. Şekil 3.2'de gövde ve sargı donatısı yerleşimlerinin kesitten görünüşleri ve donatıların merkez kotları verilmektedir. Söz konusu gövde ve sargıların bir araya getirilmesi ile elde edilen 12 numune Şekil 3.3'te, deney numunelerine ait donatı çizimleri ve fotoğrafları ise çalışmanın sonunda Ek A bölümünde verilmiştir.



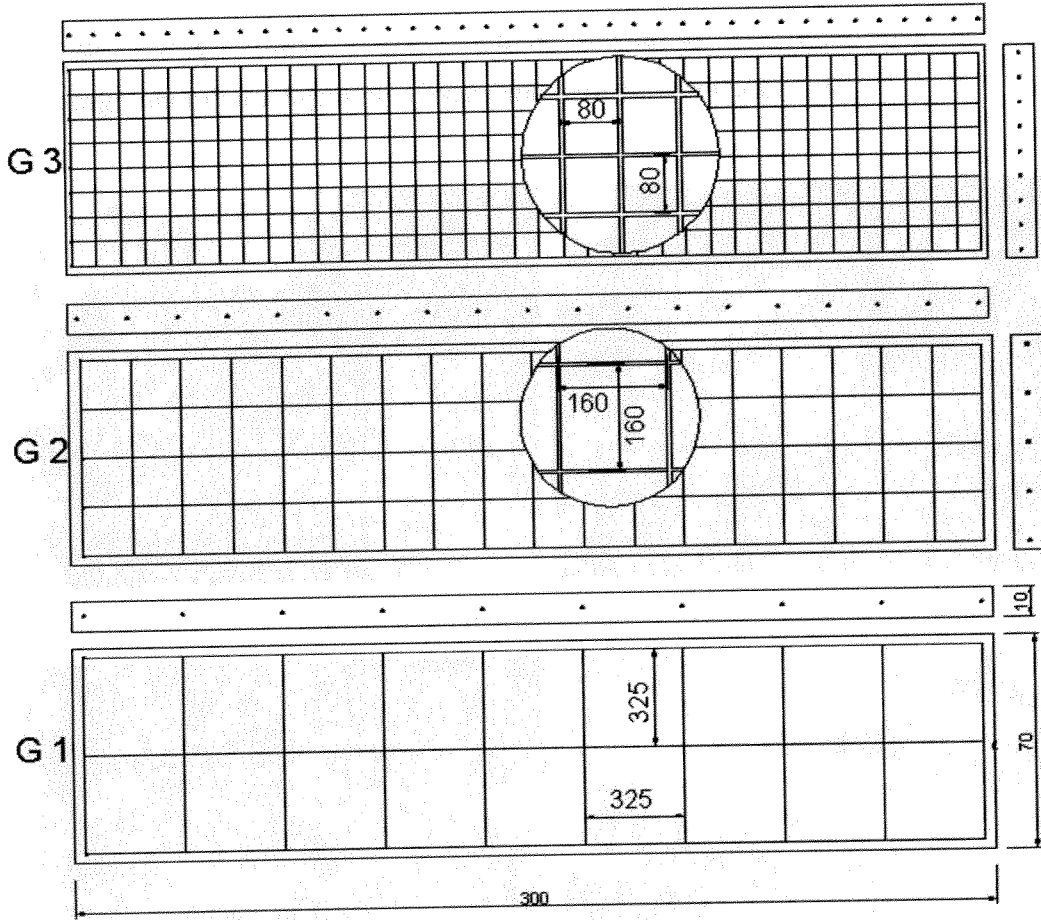
Şekil 3.2: Farklı gövde ve sargı donatısı yerleşimleri

Laboratuar ortamında hazırlanan kare hasırların görünümü ise Şekil 3.4'te verilmektedir. G1, G2 ve G3 gövde donatılarında iki donatı arası, donatıların merkezinden merkezine sırası ile 325 mm, 160 mm ve 80 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 3.4'te numune boyu 3000 mm olarak görünmekte ise de hazırlanan numunelerin boyu 3500 mm'dir. Bunun sebebi numuneler mesnetlere oturduktan sonra her iki tarafta 250 mm kadar binme mesafesinin bırakılmasıdır. Bu işlem yapılırken mesnetlerin dışında kalacak kısma ait gövde hasırının bağlanması işlemine aynı şekilde devam edilmiş ve numuneler 3500 mm boyunda hazırlanmıştır. Numunelerde kullanılan boyuna donatı miktarları, boyuna donatı geometrik oranları ile en az donatı içeren kesite göre yapılan karşılaştırma değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

S1, S2, S3 ve S4 şeklinde isimlendirilen sargı bölgelerindeki etriyeler Şekil 3.4'te gösterilen gövde donatısına ardışık iki donatı arasında merkezden merkeze 100 mm mesafe olacak şekilde bağlanmıştır. Alt ve üst bölgede oluşturulan sargılar 135 derece bükülen kancalar ile ana donatıya bağlanmıştır. Şekil 3.3 ve 3.4'te şematik olarak gösterilen donatıların, bağlandıktan sonraki görünüşleri Ek A'da verilmiştir.



Şekil 3.3: Deney numunelerindeki donatı yerleşimleri



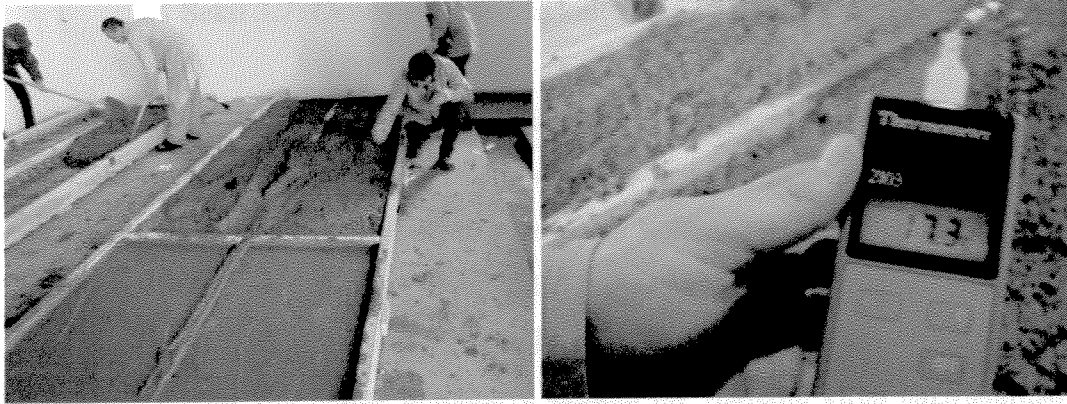
Şekil 3.4: Kare hasır şeklinde bağlanmış gövde donatıları

Çizelge 3.1: Boyuna donatı miktarları, geometrik oranları ve karşılaştırma değerleri

	G1			G2			G3		
	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	$\rho_s$ %	$A_s/A_{s\ G1\_S1}$	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	$\rho_s$ %	$A_s/A_{s\ G1\_S1}$	$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	$\rho_s$ %	$A_s/A_{s\ G1\_S1}$
<b>S1</b>	3,11	0,44	1,00	3,68	0,53	1,18	4,81	0,69	1,55
<b>S2</b>	4,25	0,61	1,36	4,81	0,69	1,55	5,94	0,85	1,91
<b>S3</b>	5,38	0,77	1,73	5,94	0,85	1,91	7,08	1,01	2,27
<b>S4</b>	3,11	0,44	1,00	3,68	0,53	1,18	4,81	0,69	1,55

### 3.1.2 Numunelerin Üretilmesi

Beton dökme işlemi Şekil 3.5'de gösterilmektedir. Hazırlanan numunelerin dayanım kazanmasından sonra, kalıplar sökülmüş ve numuneler deneylerin yapılacağı laboratuara taşınmaya hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.6).



Şekil 3.5: Numune betonlarının dökülmesi

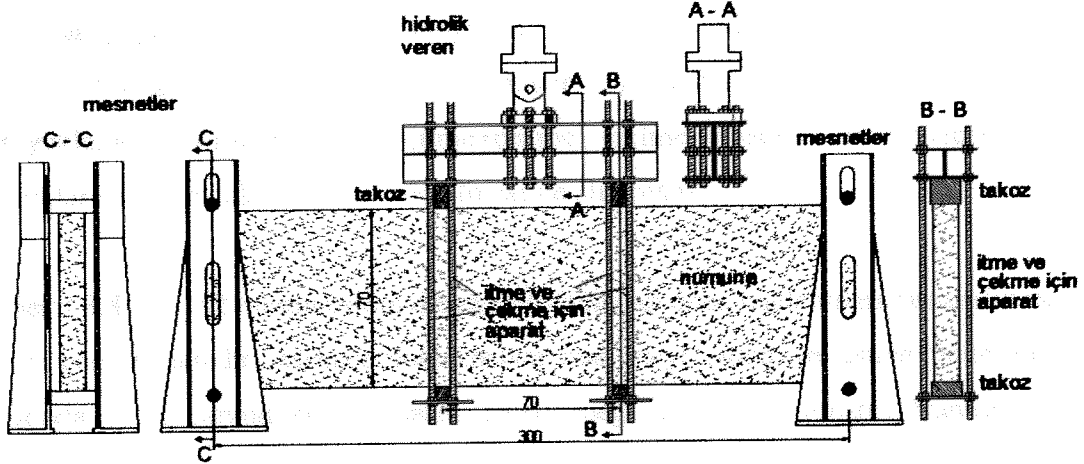


Şekil 3.6 Numune kalıplarının sökülmesi



### 3.2 Yükleme Düzenegi

İtme ve çekme şeklinde yüklemenin yapılacağı deney düzenegi kapalı bir çerçeveden oluşmaktadır. Kullanılan deney düzenegi şematik olarak Şekil 3.7’de verilmiştir.



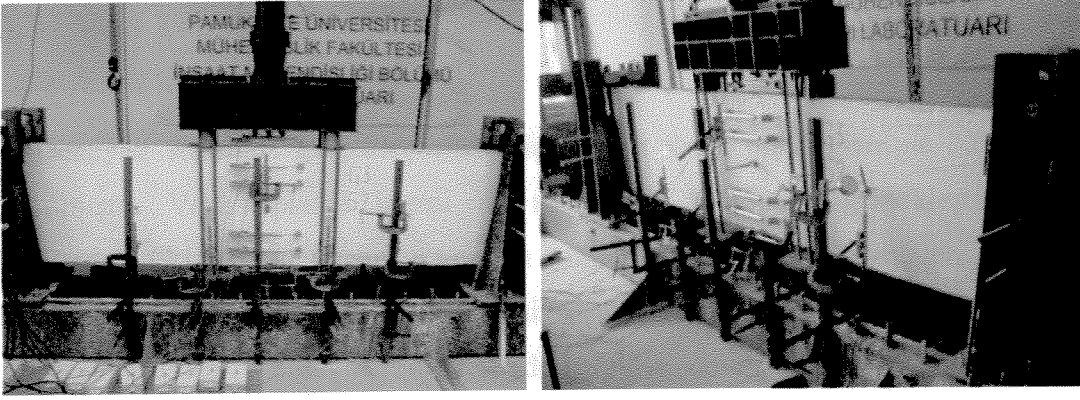
Şekil 3.7: Deneyler sırasında kullanılan yükleme düzenegi

Daha önce de belirtildiği gibi yürütülen çalışmada esas amaç tersinir yükler etkisindeki numunelerin salt eğilme altındaki davranışını incelemektir. Bu amaçla ölçümlerin yapılacağı, sabit moment etkisindeki bölümün elde edilmesi için Şekil 3.7’de görüldüğü gibi 70 cm’lik bir yükleme açıklığı bırakılmıştır. Hazırlanan numuneye göre oldukça rijit olan ve hidrolik verenin uyguladığı itme ve çekmeyi 70 cm açıklık ile tekil yük olarak numuneye aktaran bir yükleme kirişi hazırlanmıştır. Deney düzeneginde iki tekil yük noktası arasında elde edilen bu sabit moment bölgesine yerleştirilen ölçüm cihazları yardımıyla yük-deplasman ve moment-eğrilik ilişkileri elde edilmiştir. Betonarme kiriş elemanlarda eğilme momentinin yanı sıra kesme kuvvetinin de aynı zamanda bulunacağı bir gerçektir. Söz konusu ölçümleri gerçekleştirebilmek ve göçmenin tümüyle eğilme etkileri altında oluşmasını temin edebilmek için mevcut şartlarda seçilen deney tekniğinden daha uygun bir yöntem bulunmamaktadır.

Deney esnasında numunelerin itme işlemi hazırlanan yükleme kirişi ile yapılırken çekme işlemi de Şekil 3.7’de görülen ve St70 çeliğinden imal edilen 22 mm çapındaki çelik bulonlar yardımıyla yapılmıştır. St70 çeliğinden hazırlanan bulonların bir tanesinin ortalama 15 tonun üzerinde yük taşıyabileceği öngörülmüştür. Şekil 3.7’de görüldüğü gibi itme ve çekme işlemi için bu bulonlardan 8 adet kullanılmıştır. Numunelerin kalınlığının 10 cm olması nedeniyle deney sırasında yükleme noktalarında meydana gelebilecek olası bir ezilmeyi en aza indirebilmek için çelik levhalar kullanılmıştır. Ayrıca deney sırasında tamamlanan her yükleme çevriminden sonra (itme+çekme) ezilme sebebiyle oluşabilecek olan boşluklar alt kısımdaki bulonların sıkılması ile alınmıştır.

Şekil 3.8, G3\_S2 numunesinin deneye başlamadan önce bağlantıları tamamlanmış halini göstermektedir. Mesnet noktalarında numuneyi alttan ve üstten tutabilmek amacıyla 5 cm çapındaki bulonların geçebileceği delikler açılmıştır. Numune bu bulonlar arasına alındıktan sonra 25 mm çapında, uçlarına ağız açılmış başka bulonlar yardımı ile bağlanan çelik aparatların sıkılması ile sabitlenmiştir. Söz konusu aparatlar Şekil 3.9’de görülmektedir. Numunelerin mesnet bölgelerinde yükleme esnasında düzlem dışına doğru oluşacak muhtemel bir hareketi engellemek için, mesnetlerin orta bölgelerinde açılan deliklerden faydalanılmıştır. Her mesnette dört tane olmak üzere boydan boya ağız açılmış bulonlar yardımı ile numuneler yanlardan sıkılmıştır. Söz konusu bulonların karşılıklı olarak sıkılması ve gevşetilmesi ile birlikte deneyden önce numuneleri düzgün bir biçimde terazilemek mümkün olmuştur. Bahsi geçen bu bulonlar da Şekil 3.10’da gösterilmektedir.

Numunelerde eğilme momentini oluşturan yükleme bilgisayar kontrollü DARTEC hidrolik güç ünitesi yardımı ile yapılmıştır. Hidrolik veren statik olarak 250 kN, dinamik olarak da 200 kN yükleme ve 200 mm yer değiştirme kapasitesine sahiptir. Bilgisayar ile kontrol edilen yükleme cihazını gerek yük, gerekse de deplasman kontrollü olarak çalıştırmak mümkündür.



Şekil 3.8: Deneye başlamadan önceki son durum



Şekil 3.9: Mesnetlerde itme ve çekmeye karşı hareketin önlenmesi



Şekil 3.10 : Düzlem dışına hareket önleyiciler

### 3.3 Veri Toplama Sistemi

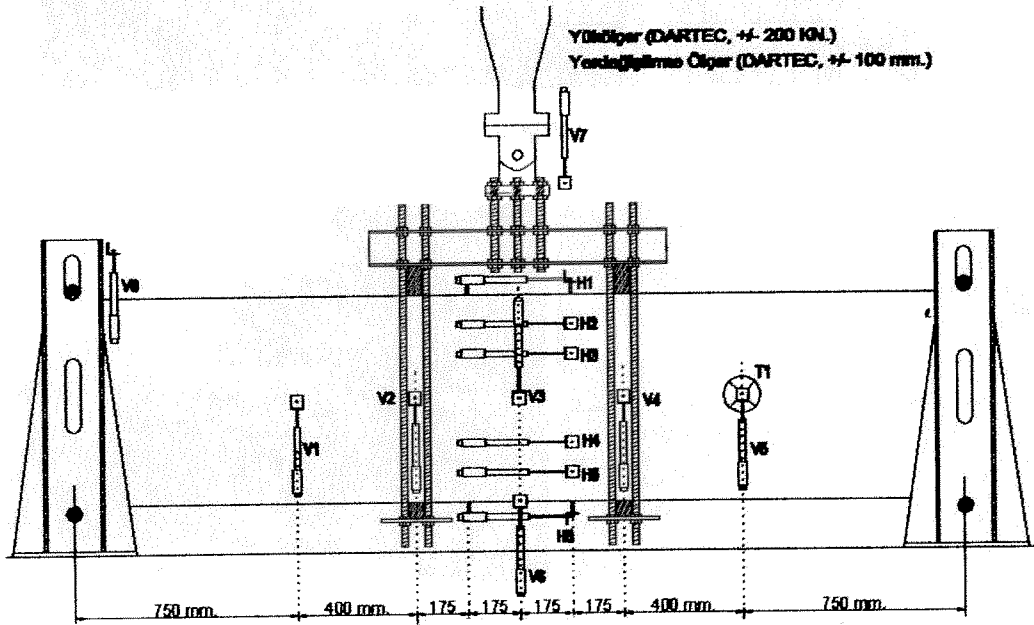
Deneyleer sırasında gerçekleştirilen ölçümlerin tümü yer değiştirme ölçerler ile yapılmıştır. Veri toplama işlemi iki ayrı ünite üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki deney sırasında yapılan yükleme ve yer değiştirmeleri toplayan DARTEC cihazına bağlı veri toplama nitesi, ikincisi de numune üzerinde meydana gelen anlık deplasman değişimlerini kaydeden ADU nitesidir. Bütün lmler aynı anda tek bir bilgisayar aracılığı ile değil iki ayrı bilgisayar yardımı ile toplanmıştır. Alınan verileri eř zamanlı hale getirebilmek, deneyden sonra numune üzerindeki hangi deplasmanın hangi yük değerine karşılık geldiğini belirleyebilmek için ADU cihazına bağlanan yer değiştirme ölçerlerden bir tanesi hidrolik veren başlığına monte edilmiştir. Yapılan bu işlem sayesinde ADU ya bağlanan yer değiştirme ölçer ile DARTEC'e bağlanan yer değiştirme lerin aynı anda, aynı deplasman okumalarını yapması sağlanmış ve bu okumaların yapıldığı zaman diliminde numune üzerindeki yer değiştirme ölçerlerde oluşan deplasmanlar toplanabilmiştir.

Deney okumaları düşeyde, yatayda ve numune düzlemine dik doğrultuda olmak üzere toplam üç değişik biçimde gerçekleştirilmiştir. Deneyleer sırasında kullanılan ölçüm cihazlarının numune üzerine yerleşimleri Şekil 3.11'de gösterilmiştir. V1, V2, V3, V4, V5 ve V6 yer değiştirme ölçerleri ile gerçekleştirilen okumalar, numunenin düşeyde yaptığı deplasmanı kontrol etmek amacı ile alınmıştır. V1,V2,V4,V5 lmleri deneylerin sonunda kullanılmamıştır. Bu yer değiştirme ölçerlerin kullanım amacı yüklemenin simetrik olup olmadığını kontrol etmektir.

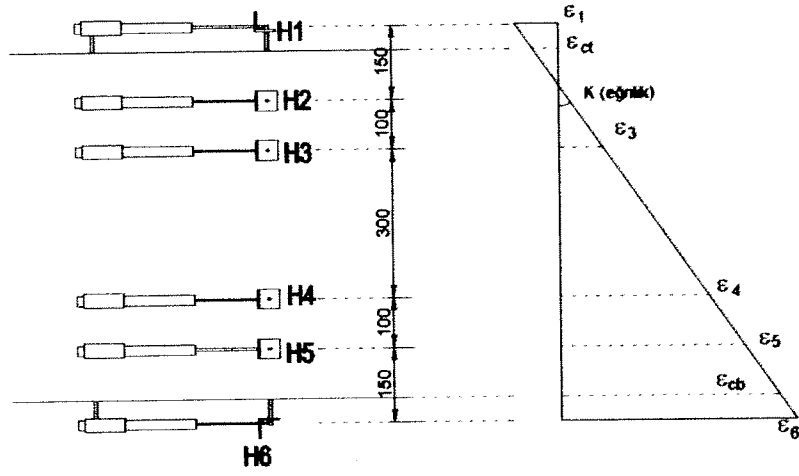
Yük-deplasman eğrileri hazırlanırken V3 ve V6 okumalarından yararlanılmıştır. Orta noktadan hem V3, hem de V6 okumalarının alınmasının sebebi, muhtemel bir çatlama sonucunda ölçüm cihazının devreden çıkması ihtimaline karşılık yedek ölçüm alma ihtiyacıdır. V7 yer değiştirme leri ise belirtildiği gibi DARTEC ve ADU okumalarını eř zamanlı hale getirebilmek için veren kafasında kullanılmıştır. H1, H2, H3, H4, H5 ve H6 yer değiştirme ölçerleri ise Şekil değiştirme ölçümlerini yapabilmek için kullanılmıştır. Deneyleer başlamadan önce numune üzerinde oluşacak

şekil değiştirme dağılımlarının doğrusal mı, yoksa eğrisel mi oluşacağı konusunda kuşkular bulunduğu için, yatayda gerçekleştirilen bu okumalar mümkün olduğunca çok sayıda yer değiştirme ölçer kullanılarak yapılmıştır. Davranışın doğrusal olduğu deneyler sonucunda görülmüş ve yatayda yapılan bu ölçümlerin ortalaması üzerinden eğrilik hesaplamaları gerçekleştirilmiştir (şekil 3.12). V8 yer değiştirme leri ise deney sırasında mesnetlerde meydana gelebilecek olası bir deplasmanı izleyebilmek amacı ile kullanılmıştır. Son olarak numune düzlemine dik olarak yerleştirilen T1 yer değiştirme leri ile de düzlem dışına doğru meydana gelebilecek deplasmanlar kontrol edilmiştir. Yatayda kullanılan yer değiştirme ölçerler ve T1 yer değiştirme lerinin deney numunesine bağlanmış hali şekil 3.13'teki gibidir.

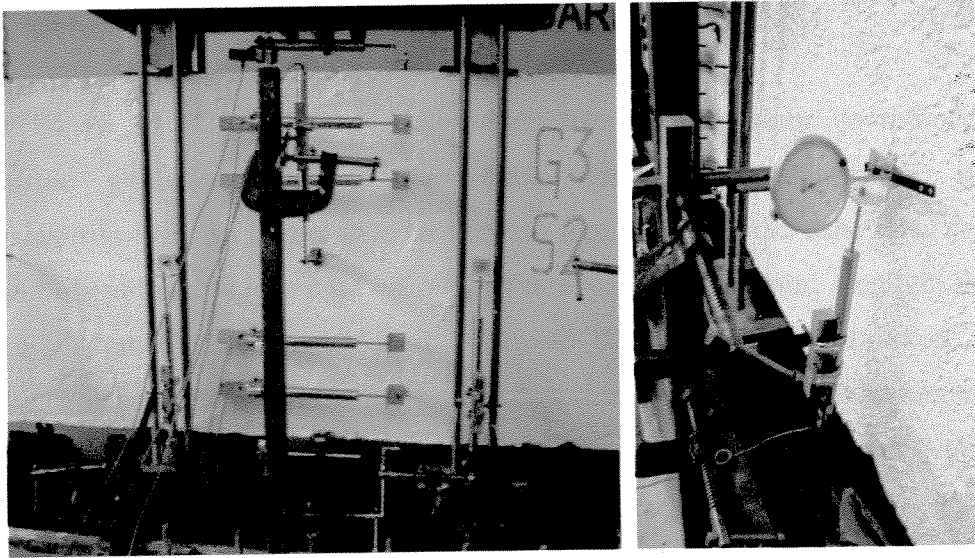
lm cihazları numune içine 3.5 cm kadar gömülen 6 mm çapındaki bulonlar ve 4 mm kalınlığındaki aliminyum köşebentler yardımı ile numune üzerine tutturulmuştur. Yükleme cihazında itme ve çekme yönünde belli artımlarla uygulanan yükleme çevrimlerinin her biri, DARTEC cihazını kumanda eden bilgisayara bir yükleme dosyası olarak girilmiş, her yükleme çevriminden sonra deney durdurulmuş, gerekli kontroller yapıldıktan sonra bir sonraki çevrime devam edilmiştir. Deneyin kontrol deplasmanı olarak ise hidrolik veren deplasmanı göz önüne alınmıştır.



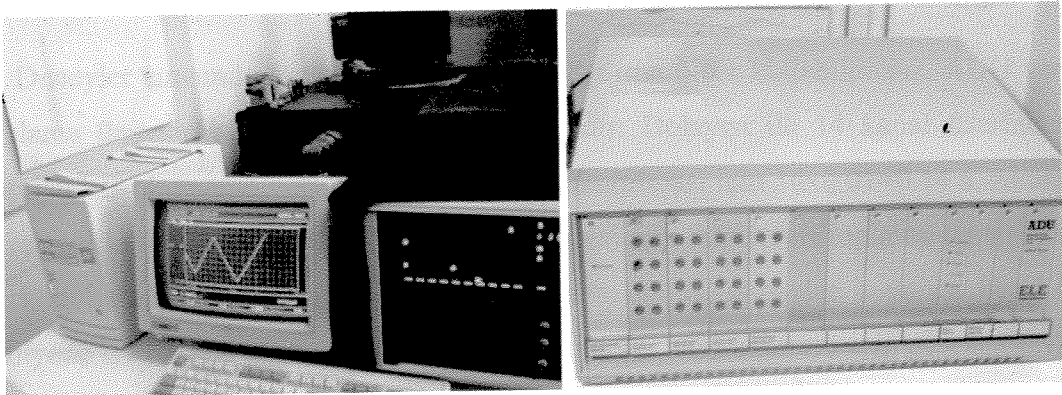
şekil 3.11 : Yer değiştirme ölçerlerin kullanımı



Şekil 3.12: Yatayda kullanılan yer değiştirme okumaları ile eğrilik hesabı



Şekil 3.13: Yatayda ve düzlem dışına doğru oluşan deplasmanların kontrolü



Şekil 3.14. Yükleme ünitesi ve ADU veri toplama ünitesi

### 3.4 Yüklemenin Yapılış Yöntemi

Deneyle, numunelerin belli adım ve hızlar ile itme ve çekme yönünde yüklenmesi ile yapılmıştır. Uygulanan deney tekniğinin gerçek dinamik yükleri yansıtmak konusunda bazı dezavantajları bulunmasına rağmen, yüklemenin adım adım gerçekleştirilmesi ve her çevrimden sonra deneyin durdurularak gerekli kontrollerin yapılmasına imkan vermesi gibi avantajları da mevcuttur. Gerçek depremler sırasında betonarme elemanlar üzerinde oluşacak etkilerin rastgele ve son derece düzensiz bir biçimde oluşacağı açıktır. Yükleme şekli belirlenirken numunelerin her çevrimde itme ve çekme yönünde artan deplasmanlar ile yüklenmesi hedeflenmiştir.

G1\_S4 ve G1\_S2 numuneleri denenirken, her itme ve çekme çevriminde yer değiştirme genlikleri 3 mm. artırılarak numunelerin yüklenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu iki numune haricindeki tüm numunelerde, daha fazla çevrim sayısına ulaşabilmek için genlik artımları 2 mm'ye düşürülmüştür. Genliğin küçük olduğu yüklemenin ilk çevrimlerinde yükleme 0.25mm/s hızla yapılırken, daha büyük genlik seviyelerinde bu hız 0.4 mm/s değerine çıkartılmıştır. Bütün numuneler yük-deplasman eğrisi yatay bir seyir alana dek yüklenmiş ve bu seviyelerde 3 veya 4 çevrim daha yapıldıktan sonra deneylere son verilmiştir. Yük ve yer değiştirme okumalarının yapıldığı hidrolik güç ünitesi ve ADU veri toplama ünitesinin görünümü Şekil 3.14'te verilmektedir.

Deneyle sırasında toplam 14 adet yer değiştirme ölçer kullanılmıştır. ADU veri toplama ünitesinin hız kapasitesi 0.01s/kanaldır. Dolayısı ile 14 kanal üzerinden yapılan her okumanın veri toplama ünitesine aktarılması için  $14 \times 0.01 = 0.14$  s. zaman gerekmektedir. Sağlıklı okumaların yapılabilmesi için ADU veri toplama ünitesinde veri toplama zaman aralığı 0.5 s. olarak tanımlanmış, deneyle boyunca her 0.5 saniyede bir okuma alınmıştır. Tanımlanan bu değer veri aktarımı için gereken 0.14 s.'lik zaman aralığından oldukça yüksek olduğu için, muhtemel veri kayıplarının oluşmasına izin verilmemiştir.

## **DÖRDÜNCÜ BÖLÜM**

### **DENEYSEL ÇALIŞMA**

Deneysel çalışma iki grup altında ele alınmıştır. Bunlardan ilki betonarmeyi oluşturan beton ve çelik ile ilgili yapılmış olan malzeme deneylerini, ikincisi de tersinir yükler altında kiriş elemanların eğilme deneylerini kapsamaktadır.

#### **4.1 Malzeme Deneyleri**

Elde edilen deneysel verilerin doğru bir şekilde yorumlanabilmesi ve kuramsal hesap sonuçları ile karşılaştırılabilmesi için beton ve donatıya ait davranış özelliklerinin mümkün olduğunca gerçeğe yakın olarak belirlenebilmesi gerekmektedir. Aşağıda numunelerin üretimi esnasında kullanılan beton ve donatı çeliği üzerinde yapılan deneyler hakkında bilgi verilmektedir.

##### **4.1.1 Beton Basınç Deneyleri**

Deney numunelerinin betonlarının dökülmesi işlemi hazır beton kullanılarak yapılmıştır. Bütün numunelerin betonları bir seferde dökülmüştür ve aynı mikserden alınmıştır. Dolayısı ile beton basınç deneyleri sırasında elde edilen değerler bütün numuneler için geçerlidir. Numunelerin dökülmesi sırasında hazır beton kullanıldığından ve kalıpların hepsi dikey değil yatay olarak (tepsi şeklinde) hazırlandığından, bütün numunelerdeki dağılımın özdeş olduğu düşünülmektedir. Deney numunelerinin kalınlığı 10 cm. olarak belirlendiği için maksimum agrega boyutu 16 mm. elekten geçecek şekilde ayarlanmıştır. Beton dökme işlemi sırasında 8 adet küp 8 adet de silindir numune alınmış, alınan bu numuneler 3, 7, 28 ve 120 günlük sürelerin ardından denenmiştir. Küp numuneler 3 ve 7 günlük sürelerin



sonunda kırılırken, silindir numuneler 28 ve 120 günlük sürelerin sonunda denenmiştir. Standart silindir numunelerin kırıldıktan sonraki görünümüleri Şekil 4.1'de verilmektedir. Beton basınç deneyleri sırasında elde edilen dayanım değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Şekil değiştirme ölçümleri ise 120 günlük standart silindirlerin denenmesi sırasında el ile yapılmıştır. Dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme için ortalama 0.00198 değeri elde edilmiştir.

Çizelge 4.1: Beton basınç deneyi sonuçları

Numune	Tür	Gün	Dayanım (MPa)	Ortalama (MPa)
1	Küp (15x15x15)	3	13.6	13.3
2	Küp (15x15x15)	3	12.9	
3	Küp (15x15x15)	3	13.7	
4	Küp (15x15x15)	3	13.1	
5	Küp (15x15x15)	7	18.1	17.5
6	Küp (15x15x15)	7	17.9	
7	Küp (15x15x15)	7	16.6	
8	Küp (15x15x15)	7	17.3	
9	Standart Silindir	28	25.4	24.2
10	Standart Silindir	28	24.1	
11	Standart Silindir	28	22.9	
12	Standart Silindir	28	24.3	
13	Standart Silindir	120	29.4	29.8
14	Standart Silindir	120	28.2	
15	Standart Silindir	120	29.9	
16	Standart Silindir	120	31.6	

#### 4.1.2 Donatı Çeliği Çekme Deneyleri

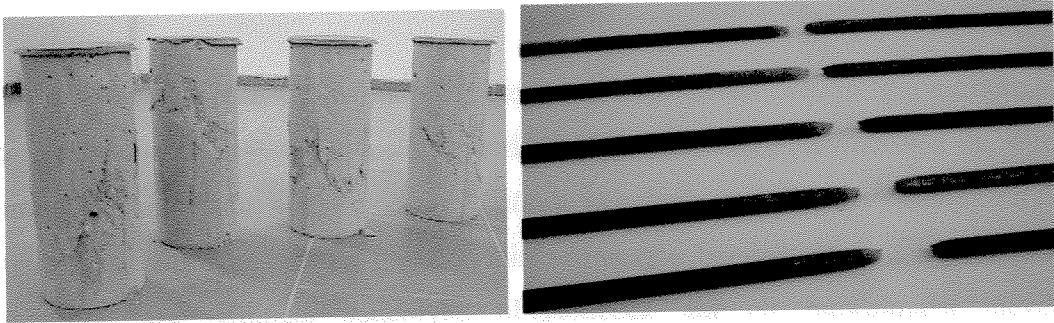
Deney numunelerinin hazırlanması sırasında kullanılan bütün numuneler 6 mm. çapında ve düz yüzeilidir. Donatı çeliği için 5 adet çekme testi ve 3 adet de kimyasal analiz yapılmıştır. Çekme testleri Kosgeb-Denizli laboratuvarlarında bulunan Dartec çekme cihazları ile yapılmıştır. Çekme testleri sırasında kullanılan ölçüm boyu 260 mm. dir.

Kesitlerin teorik çözümlenmeleri yapılırken donatı çeliğinin elastisite modülü 210000 MPa olarak alınmıştır. Donatı çeliği çekme testi sonuçları incelenirken

malzemenin akma ve pekleşme bölgelerinin doğru bir biçimde belirlenebilmesine çalışılmıştır. Elde edilen akma, pekleşme ve kopma şekil değiştirmeleri, Kent ve Park [37,39] tarafından, benzer dayanımlardaki donatı çelikleri üzerine yapılan çekme testi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çekme testlerinde elde edilen sonuçların, yazarlar tarafından yumuşak çelikler üzerine yapılan deneylerde elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. 5 adet numune için elde edilen sonuçların ortalaması Çizelge 4.2’de verilmiştir. Çekme testi için kullanılan numunelerin deneyden sonraki durumu Şekil 4.1’de görülmektedir. Kosgeb’ten alınan test raporları da Ek B’de verilmiştir.

Çizelge 4.2: Donatı çeliği çekme testi sonuçları (ortalama)

Donatı	$f_y$ (MPa)	$f_{su}$ (MPa)	$\epsilon_{su}$
$\phi 6$	373.4	485.4	0.1733



Şekil 4.1: Beton ve donatı numunelerinin deneyden sonraki görünüşleri

## 4.2 Numunelerin Tersinir Yükler Altında Eğilme Deneyleri

Betonarme kirişlerin tersinir tekrarlı yükler altında sergiledikleri davranışlar, yük-deplasman ve moment-eğrilik ilişkileri kullanılarak incelenmiştir. Deneyler sırasında deplasman ve şekil değiştirme ölçümleri düşeyde ve yatayda yerleştirilen yer değiştirme ölçerler yardımı ile yapılmıştır. Yük deplasman ilişkileri hidrolik veren üzerinde bulunan yük ölçer ve V3 yer değiştirme ölçeri tarafından yapılan okumalara göre çizdirilmiştir. Kesit derinliği boyunca yatay olarak kullanılan yer değiştirme

ölçerler yardımı ile kesit üzerinde oluşan şekil değiştirme dağılışı hesaplanmış, farklı çevrimler sırasında değişen şekil değiştirme dağılımlarının eğimleri hesaplanarak kesitte oluşan anlık eğrilik değerleri belirlenmiştir. Eğrilik hesaplamaları yapılırken çatlak oluşumları sebebi ile sağlıklı okumalar vermeyen yer değiştirme ölçerlerin verileri hesaba dahil edilmemiştir.

Deneilerin yapılışı sırasında meydana gelen çatlak oluşumları nedeniyle G1\_S2 numunesinde düşeyde okuma yapan V3 ve V6 yer değiştirme ölçerlerinden sağlıklı veriler alınamamış ve yük-deplasman ilişkisi elde edilememiştir. G1\_S2, G1\_S4 ve G2\_S2 numunelerinde yatayda ölçüm yapan yer değiştirme ölçerlerden elde edilen okumalar sağlıklı bulunmamış, bu numunelerde eğrilik ölçümü yapılmamıştır. Dolayısı ile G1\_S2 numunesinde sadece ulaşılan yük seviyeleri kaydedilebilmiş, G1\_S4 ve G2\_S2 numunelerinde de sadece yük deplasman eğrileri elde edilebilmiştir.

Deneiler sırasında kontrol deplasmanı veren deplasmanı olduğu için numunelere itme ve çekme adımları boyunca simetrik deplasmanlar uygulanmamışsa da, bütün numuneler hem itme, hem de çekme yönünde yük deplasman ilişkisi yataylaşana dek yüklenmişlerdir. Deplasman genliklerinin artmasıyla beraber düzlem dışına doğru hareketin fark edilmesi nedeniyle, oluşabilecek ani bir burkulmaya meydan vermeden, yük deplasman eğrisi yatay seyir aldıktan sonra 3 veya 4 çevrim daha yapılmış ve deneylere son verilmiştir.

#### 4.2.1 Deneysel Yük-Deplasman İlişkileri

Kiriş modellerinin yön değiştiren tekrarlı yükler altında denenmesi sırasında, bütün numunelerin sünek davranış sergiledikleri görülmüştür. Tasarım aşamasında bütün numuneler denge altı donatı içerecek şekilde detaylandırılmıştır. Laboratuvar ortamında uygulanabilecek yüklemenin sınırları genellikle yükleme ünitesinin kapasitesi ile ilgili olduğundan, numunelerin tasarımı sırasında cihazın dinamik yükleme kapasitesi olan 200 kN değerinin aşılmamasına dikkat edilmiştir.

Hazırlanan numunelerden elde edilen yük-deplasman ilişkileri, deneyler sırasında ulaşılan en büyük yük değeri ile cihazın yükleme kapasitesinin %70'ine çıkıldığını göstermektedir. Bütün numunelerde hem itme hem de çekme yönünde artan deplasmanlar ile birlikte yük değerlerinde yataylaşma elde edilmiştir. Numunelerin yüklenmesi sırasında yük deplasman eğrilerinde ani düşüşler meydana gelmemiş, ilerleyen çevrimler boyunca kesitler yük taşıma kapasitelerini muhafaza etmiştir. Deneyler sırasında elde edilen yük deplasman eğrileri Ek D'de verilmiştir.

#### 4.2.2 Deneysel Moment-Eğrilik İlişkileri

Betonarmenin doğrusal olmayan çözümlenmesinde kullanılan en doğru yaklaşımlardan birisi moment-eğrilik hesaplarından yararlanmaktır. Bilindiği gibi moment kesitin taşıma kapasitesini, süneklik de taşıma kapasitesinde düşme olmadan deformasyon yapabilme özelliğini temsil etmektedir. Moment-eğrilik ilişkilerini kullanarak betonarme kesitlerin taşıma kapasitelerini ve deformasyon yapabilme özelliklerini gözlemek mümkündür. Deneyler sırasında numunelerin sabit moment bölgelerine yerleştirilen ölçüm cihazlarından alınan deplasman okumalarının eğimleri ve bu anda kesite etkiyen kuvvetler yardımıyla hesaplanan deneysel moment değerleri kullanılarak moment-eğrilik ilişkileri türetilmiştir. Elde edilen moment-eğrilik ilişkileri Ek D'de verilmiştir.

#### 4.2.3 Numunelerde Çatlak Oluşumları

Deneyleri yapılan bütün numuneler taşıma güçlerine eğilme etkileri ile ulaştığı için numunelerde görülen çatlaklar eğilme çatlaklarıdır. Sünek eleman tasarımı ve yükleme düzeneğinin eleman ortasında momentin sabit, kesmenin sıfır olduğu bir bölge oluşturması eğilme çatlaklarının oluşmasına sebep olmuştur. Numunelerdeki kesit yüksekliğinin genişliğe oranının oldukça yüksek olması ve şekil değiştirmenin kesit derinliği boyunca doğrusal dağılması nedeniyle daha deneyin ilk safhalarında çekme bölgelerinde meydana gelen ayrılmalar ile çatlaklar oluşmaya başlamıştır.

Basınç bölgesinde göreceli olarak küçük şekil değiştirme değerleri oluşurken, doğrusal şekil değiştirme dağılışı çekme bölgesinde oldukça büyük şekil değiştirmelere ve dolayısıyla çekme çatlaklarına sebep olmuştur. İtme ve çekme çevrimleri boyunca yükleme açıklığı bölgesinde oluşan az sayıdaki çatlaklar (2 veya 3 adet) deney boyunca açılmış, yeni çatlakların oluşması gerçekleşmemiştir. Kesitin altında ve üstünde meydana gelen bu çatlamlar itme ve çekme çevrimleri sırasında birleşerek kesit derinliği boyunca ilerlemiştir. Çatlak oluşumu ve ilerlemesinde karşılaşılan bu durumun, kesit geometrisi ve kullanılan düz yüzeyli donatı şekli ve yerleşimi ile de ilgili olduğu düşünülmektedir. Nervürlü yerine düz yüzeyli donatı kullanılması sebebiyle azalan aderans etkileri, az sayıda fakat daha geniş çatlak oluşumlarına sebep olmuştur.

Kare hasır şeklinde gövde donatısının en az kullanıldığı G1 tipi donatıya sahip numunelerde betonda meydana gelen çatlama ve ayrılma davranışının çok daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. G1\_S4 numunesinde yükün uygulandığı noktalarda da çatlaklar meydana gelmiştir. Gövde ve özellikle sargı bölgelerinde daha fazla donatı içeren G2\_S3, G3\_S2 ve G3\_S3 numunelerinde meydana gelen çatlak oluşumlarının diğer numunelere göre daha sınırlı seviyede kaldığı gözlenmiştir. Farklı seviyelerde çatlak oluşumlarına rağmen bütün numunelerde ani dayanım düşüşlerine rastlanmamıştır. Kiriş elemanlara göre çok daha fazla sayıda ve seviyede kullanılan boyuna donatıların pekleşme özellikleri nedeniyle çatlak oluşumları devam ederken numuneler az da olsa artan oranlarda yük taşımaya devam etmişlerdir.

İlerleyen çatlak seviyeleri ve artan yer değiştirme değerleri ile birlikte numunelerin düzlem dışına doğru hareket etmeye başladığı tespit edilmiştir. Meydana gelen çatlakların kesit boyunca birleşmesi ile başlayan düzlem dışına doğru hareket, ileri seviyelerde meydana gelebilecek olası bir stabilite kaybının işareti olarak yorumlanmış ve düşen kol oluşmadan deneylere son verilmiştir. Deneyler sırasında numuneler üzerinde oluşan çatlak şekillerinin görünümü, Ek C'de verilen deney fotoğraflarında mevcuttur.

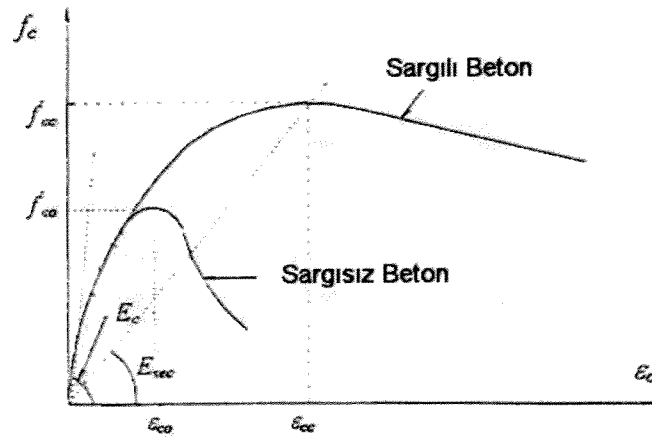
## BEŞİNCİ BÖLÜM

# KURAMSAL ANALİZ

Günümüze kadar yapılan pek çok kuramsal ve deneysel çalışmalar neticesinde, farklı araştırmacılar tarafından öne sürülmüş çok sayıda davranış modeli bulunmaktadır. Deneysel sonuçların kuramsal sonuçlar ile karşılaştırılması yapılırken, sargılı beton davranışı için Mander Modeli kullanılmıştır. Donatı çeliği davranışı ise pekleşmeyi de içine alacak şekilde doğrudan çekme testleri sonuçlarından alınmıştır.

### 5.1 Sargılı Beton Davranış Modeli

#### 5.1.1 Mander Modeli



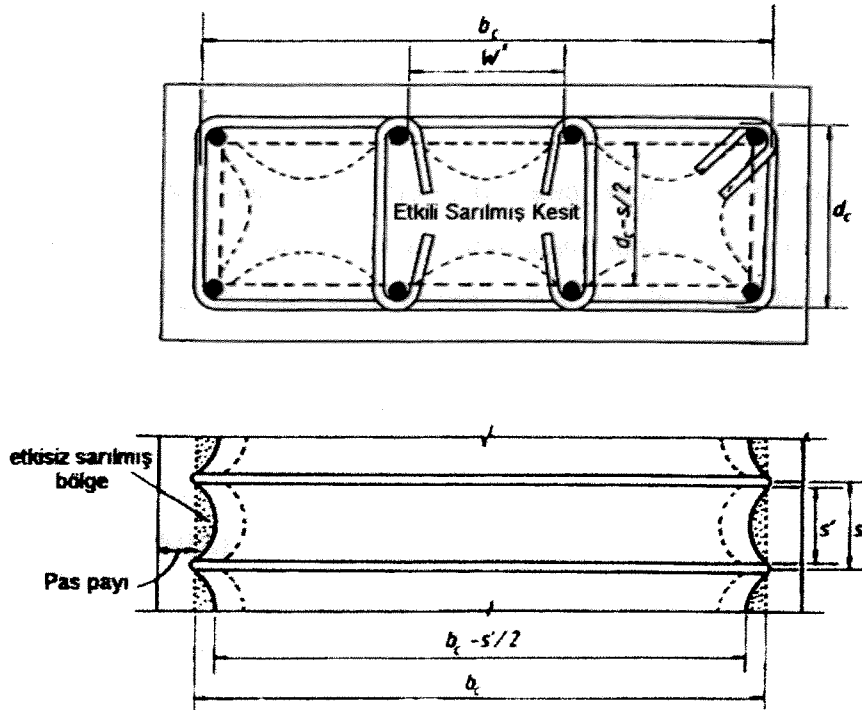
Şekil 5.1: Monoton artan yükleme durumu için gerilme-şekil değiştirme bağıntısı

Sargılı beton davranışı ile ilgili geliştirilen bu model, Mander [39], Mander ve diğ. [40] ve Mander ve diğ. [41] tarafından yapılan çalışmalara dayanmaktadır. Çalışmanın bu bölümünde yazarların öngördüğü model hakkında bilgi verilirken,

sadece dikdörtgen kesitler üzerinde durulacaktır. Gerilme-şekil değiştirme davranışının idealize edilmiş gösterimi Şekil 5.1’de verilmiştir.

Dikdörtgen kesitlerde sargılama etkisinin dairesel kesitlere göre daha az olacağı bilinmektedir. Etriyenin büküm noktalarından başlayan ve 45° başlangıç eğimine sahip 2. dereceden bir parabol şeklindeki kemerlenme etkisi nedeniyle, sarılmış bölge içindeki etkili sargılama alanı azalacaktır. Kemerlenme etkisinin sebep olduğu etkili olarak sarılamayan alan Şekil 5.2’de görülmektedir. Anlaşılacağı gibi  $w$  mesafesi iki boyuna donatı arasındaki net açıklığın ifadesidir. Kesitin geometrisi ve kullanılan kancaların sayısı  $w$  mesafesinin azalmasına, dolayısıyla da etkili olarak sarılmış alanın artmasına sebep olmaktadır. Büküm noktalarına gelmek veya kancalar ile tutturulmak kaydı ile  $n$  adet boyuna donatı arasında oluşan ve kemerlenme sebebiyle etkili olarak sarılamayan toplam alan 5.1 bağıntısı ile verilmiştir.

$$\frac{\sum_1^n (w_i)^2}{6} \quad (5.1)$$



Şekil 5.2: Etkili olarak sarılan kesitin görünümü

$b_c$  ve  $d_c$  mesafeleri sargı donatısının merkezinden merkezine olmak kaydı ile, sargılı beton enkesit alanı 5.2 bağıntısı ile verilmiştir.  $\rho_{cc}$  ise boyuna donatı alanının, enine donatıların merkezinden merkezine ölçülen beton kesit alanına oranıdır (5.3).

$$A_{cc} = b_c d_c (1 - \rho_{cc}) \quad (5.2)$$

$$\rho_{cc} = \frac{\sum A_s}{b_c d_c} \quad (5.3)$$

Hem yatay hem de düşey doğrultudaki kemerlenme etkileri göz önüne alındığı takdirde, etkili olarak sarılan kesitin en küçük değerine ulaştığı iki enine donatı seviyesinin ortasında, etkili olarak sarılmış kesit alanı 5.4 bağıntısı ile ifade edilmektedir.

$$A_e = \left( b_c d_c - \sum_i^n \frac{(w_i')^2}{6} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2d_c} \right) \quad (5.4)$$

$$k_e = \frac{A_e}{A_{cc}} = \frac{\left( 1 - \sum_i^n \frac{(w_i')^2}{6b_c d_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2b_c} \right) \left( 1 - \frac{s'}{2d_c} \right)}{(1 - \rho_{cc})} \quad (5.5)$$

5.5 bağıntısı ile etkili olarak sarılmış olan alanın, sargılı beton enkesit alanına oranı verilmektedir. Bu oran yazarlar tarafından sargı etki katsayısı olarak tanımlanmıştır ( $k_e$ ).  $A_{shx}$  ve  $A_{shy}$  kesit üzerinde x ve y yönlerinde kullanılan sargı donatılarının enkesit alanı olmak üzere, her iki yönde de betona uygulanan etkili yanal basınç ifadeleri 5.6 ve 5.7 bağıntılarındaki gibidir.

$$f'_{1x} = k_e \frac{A_{shx}}{s d_c} f_{yh} \text{ (MPa)} \quad (5.6)$$

$$f'_{1y} = k_e \frac{A_{shy}}{s b_c} f_{yh} \text{ (MPa)} \quad (5.7)$$



Her iki yönde de farklı sargı basıncı değerleri elde edilmesi durumunda yazarlar belirlenen değerlerin ortalamasının alınmasını önermektedir. Etkili sargı basıncı ve sargısız beton basınç dayanımı ifadelerinin de bilinmesi ile birlikte, sargılı beton basınç dayanımı için yazarlar tarafından önerilen bağıntı 5.8 ile verilmiştir.

$$f'_{cc} = f'_{co} \left( -1.254 + 2.254 \sqrt{\frac{1 + 7.94 f'_1}{f'_{co}}} - 2 \frac{f'_1}{f'_{co}} \right) \quad (\text{MPa}) \quad (5.8)$$

### 5.1.2 Sargılı Beton İçin İskelet Gerilme-Şekil Değişirme Eğrisi

Gerilme-şekil değişirmenin iskelet eğrisi Popovics [52] tarafından önerilen 5.9 bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır. Aşağıdaki bağıntılarda  $f_c$  ve  $\varepsilon_c$  sırasıyla herhangi bir andaki beton dayanımını ve karşılık gelen şekil değişirmeyi temsil etmektedir.

$$f_c = \frac{f'_{cc} x^r}{r - 1 + x^r} \quad (5.9)$$

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \quad (5.10)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{\text{sec}}} \quad (5.11)$$

$$E_c = 5000 \sqrt{f'_{co}} \quad (5.12)$$

$$E_{\text{sec}} = \frac{f'_{cc}}{\varepsilon_{cc}} \quad (5.13)$$

$$k_1 = 4.1 \quad (5.14)$$

$$k_2 = 5k_1 \quad (5.15)$$

$$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f'_1 \quad (5.16)$$

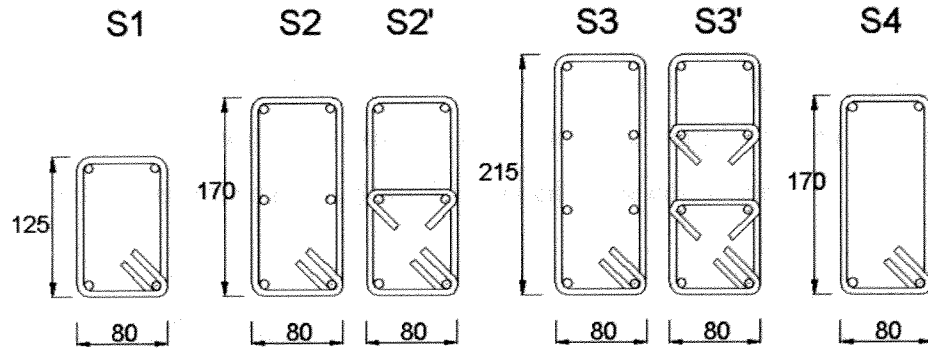
$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left( 1 + k_2 \frac{f'_1}{f'_{co}} \right) \quad (5.17)$$

5.16 ve 5.17 bağıntıları Richart ve diğ. [54,55] tarafından hidrostatik yanal basınç ile sarılma gerilmesi uygulanan numuneler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda önerilmiştir. Yazarlar yaptıkları bu çalışmaların sonucunda  $k_1$  ve  $k_2$  değerleri için 5.14 ve 5.15 ifadelerini elde etmişlerdir. 5.14, 5.15 ve 5.16 bağıntıları yeniden düzenlenir ve 5.17 bağıntısında yerine konulursa  $\varepsilon_{cc}$  için 5.18 ifadesi elde edilir.

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (5.18)$$

### 5.1.3 Kullanılan Gerilme-Şekil Değişirme Eğrileri

Eğilme etkileri altında oluşacak tarafsız eksen derinliğinin sargılanmış kısım içinde kalacağı düşünülerek, sadece uçlarda oluşturulan sargı bölgeleri için Mander yaklaşımı uygulanmıştır. Hazırlanan 4 farklı sargı donatısı detayı Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.3: Sargı donatısı şekilleri ve ölçüleri (mm.)

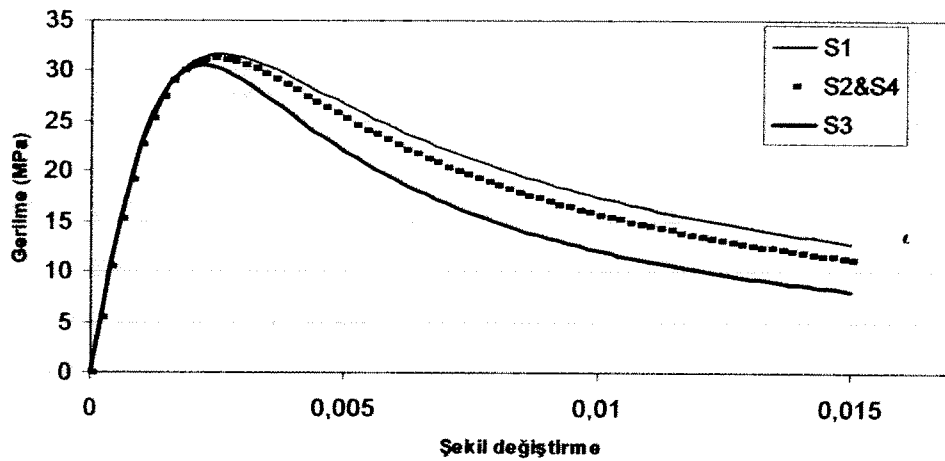
Mander yöntemi kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucu sargılı kesit için elde edilen  $f'_{cc}$  ve  $f'_{co}$  değerleri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir. Burada bir noktaya dikkat edilmelidir. Söz konusu kesitlerde S2 ve S3 sargıları, hazırlanırken ara donatılar kanca ile bağlanmamıştır. Mander yaklaşımının uygulanışı sırasında bu donatıların hesaba katılabilmesi için kanca ile bağlı olması gerekmektedir. Söz konusu kesitlerin kanca ile bağlanmış gösterimi Şekil 5.3'te verilirken, bu tür sargılamının sebep olacağı etkiler de Çizelge 5.1'de S2' ve S3' ifadeleri ile verilmiştir. Mander yaklaşımı

esas alınarak yapılan hesaplama göre, kancalı sargılama durumu betonun basınç dayanımında çok büyük farklar oluşturmazken, maksimum dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme değerlerinde büyük artışlara sebep olmaktadır. Bu da elemanın sünek davranışı üzerinde etkilidir. Hazırlanan deney numunelerinde S2' ve S3' sargıları kullanılmamıştır. Dolayısıyla söz konusu sargılamanın etkileri bu deneysel çalışmanın kapsamının dışındadır. Yapılan işlemin kuramsal sonuçlar üzerindeki etkisini göstermek amacıyla elde edilen değerler sunulmuştur.

Çizelge 5.1: Sarılmış ve sarılmamış beton için dayanım ve şekil değiştirme değerleri

	S1	S2	S3	S4	S2'	S3'
$f'_{co}$ (MPa)	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8	29.8
$f'_{cc}$ (MPa)	31.55	31.26	30.54	31.26	32.64	33.3
$f'_{cc}/f'_{co}$	1.059	1.049	1.025	1.049	1.095	1.12
$\epsilon'_{co}$	0.00198	0.00198	0.00198	0.00198	0.00198	0.00198
$\epsilon'_{cc}$	0.00255	0.00242	0.00218	0.00242	0.00288	0.0031
$\epsilon'_{cc}/\epsilon'_{co}$	1.288	1.222	1.101	1.222	1.455	1.566

Çizelgede verilen sarılmış ve sarılmamış betona ait bilgiler Popovics [52] tarafından önerilen bağıntılar kullanılarak işlenmiş, sargılı betona ait kuramsal gerilme-şekil değiştirme eğrileri Şekil 5.4'teki gibi elde edilmiştir.



Şekil 5.4: S1, S2, S3 ve S4 sargıları için elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrileri

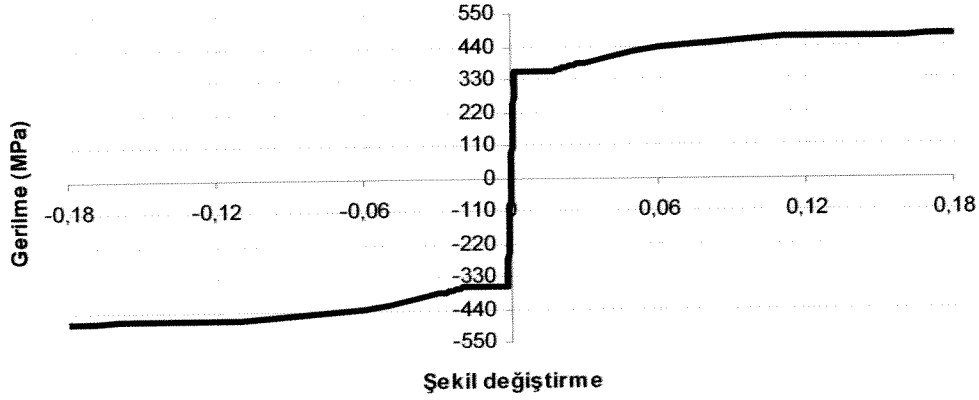
## 5.2 Donatı Çeliği Davranış Modeli

Sadece alt ve üst kısımlarda donatının bulunduğu betonarme kirişlerden ayrı olarak, ara seviyelerde de donatıların kullanıldığı deney numunelerinde davranış pekleşmenin etkisiyle daha karmaşık hale gelmektedir. Yapılan deneyler sırasında kesit derinliği boyunca şekil değiştirmenin doğrusal olarak değiştiği tespit edilmiştir. Bu durum kesit derinliği boyunca alt ve üst liflere yakın bulunan donatıların oldukça farklı şekil değiştirmelere maruz kalmasına sebep olmaktadır. Yapılan hesaplamalar çok küçük eğrilik değerlerine ulaşılmış olmasına rağmen çekme bölgesindeki donatıların akma şekil değiştirmesine ulaştığını göstermiştir. Deneysel olarak elde edilen eğrilik değerleri üzerinden yapılan hesaplamalar, tekrarlanan yükleme çevrimleri boyunca donatının pekleşme bölgesi içinde çekme ve basınç ile ardışık olarak zorlandığını göstermiştir. Bu durum, donatının davranışının doğru olarak modellenebilmesi için elastik bölge, akma platosu ve pekleşme bölgelerinin ayrı ayrı ve gerçeğe en yakın şekilde bilinmesini gerektirmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan çekme testlerinde ve Kent ve Park [37] tarafından gerçekleştirilen deneylerde elde edilen  $\epsilon_{sh}$  ve  $\epsilon_{su}$  değerleri Çizelge 5.2’de verilmektedir.

Çizelge 5.2: Donatı çeliklerinin pekleşme ve kopma şekil değiştirmeleri

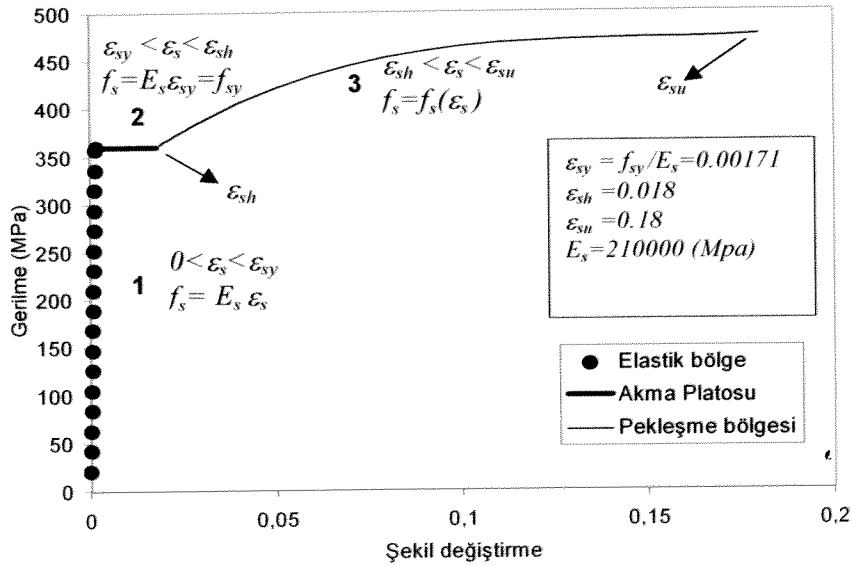
	$\epsilon_{sh}$	$\epsilon_{su}$
Çekme Testleri	$\cong 0.02$	0.1733
Kent ve Park [37]	0.018	0.18

Donatı çeliği davranış modeli geliştirilirken, Çizelge 5.2’de verilen sonuçların uyumu da göz önüne alınarak, pekleşme şekil değiştirmesi için 0.018, kopma şekil değiştirmesi için ise 0.18 değerleri esas alınmıştır. Donatı çeliğinin elastik bölge ve akma platosu boyunca davranışı doğrusal kabul edilmiş, pekleşme bölgesi ise şekil değiştirmenin fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Genel itibari ile donatı çeliğinin çekme ve basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışı Şekil 5.5’te şematik olarak sunulmuştur. Hem çekme hem de basınç bölgelerindeki davranış iki doğru ve bir parabolde oluşmaktadır.



Şekil 5.5: Çekme ve basınç altında çelik gerilme- şekil değiştirme ilişkisi

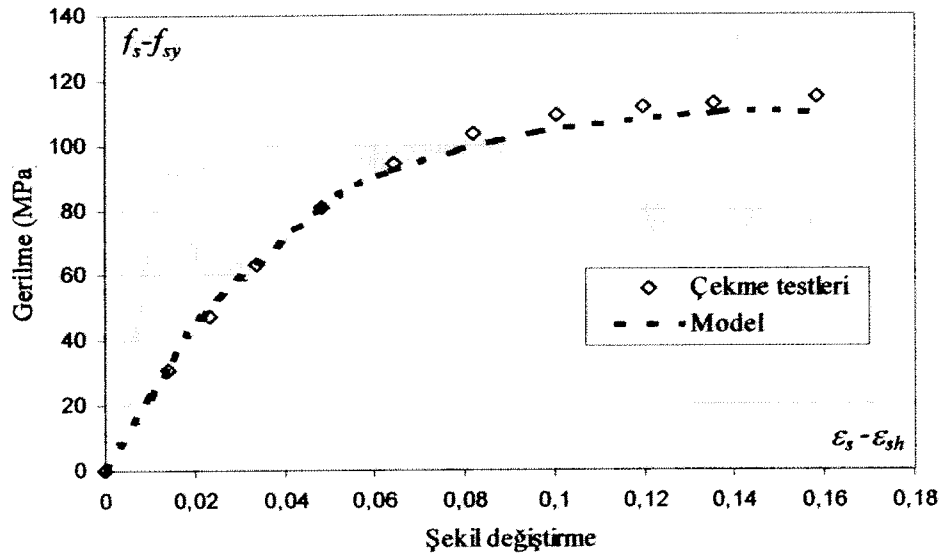
Kuramsal hesaplar gerçekleştirilirken itme ve çekme çevrimleri sırasında donatının akma şekil değiştirmesini geçtikten sonra yumuşaması sebebiyle maruz kaldığı Bauschinger etkileri göz önüne alınmamıştır. Kuramsal hesaplar sırasında donatı çeliğinin geçtiği her evrenin ve bu evrelerde yapılan hesap kabullerinin gösterimi Şekil 5.6'da verilmektedir. Elastik bölge, akma platosu ve pekleşme bölgeleri sırası ile 1, 2 ve 3 numaralı bölgeler olarak ifade edilmiştir.



Şekil 5.6: Kuramsal hesaplar sırasında kullanılan gerilme- şekil değiştirme kabulleri

Pekleşme bölgesi boyunca parabol şeklinde ilerleyen ilişkinin türetilebilmesi için pekleşmenin başladığı nokta sıfır kabul edilmiş ve deneysel olarak elde edilen noktalardan geçen 3. dereceden bir polinom fonksiyon tanımlanmıştır. Türetilen polinomun sonuçları ve elde edilen deneysel verilerin birbiri ile uyumlu olduğu Şekil 5.7'de görülmektedir. Unutmamak gerekir ki, esas alınan bağıntı sadece bu çalışmada kullanılan donatılar ile ilgilidir ve genelleştirme ifade etmemektedir. Pekleşme bölgesinde donatının gerilme-şekil değiştirme dağılımının ifadesi için türetilen fonksiyon 5.19 bağıntısı ile tanımlanmıştır.

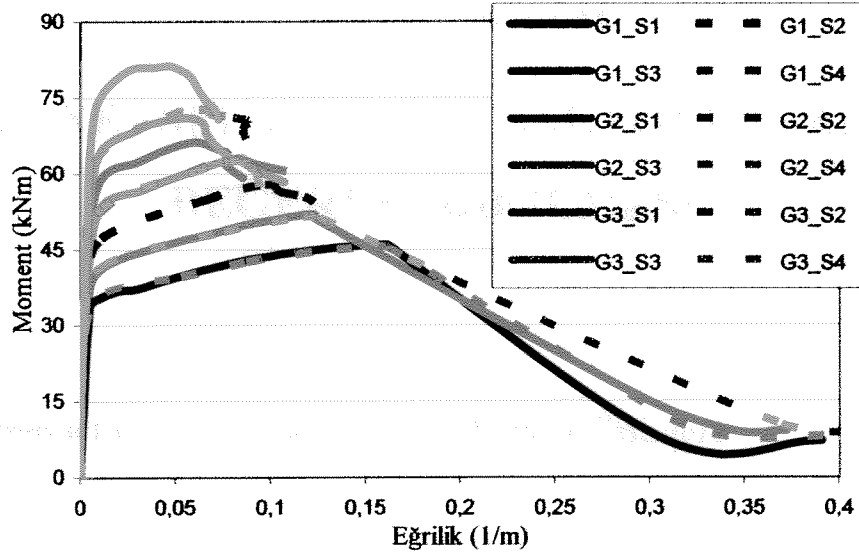
$$f_s = f_{sy} + \left[ 44729(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh})^3 - 17840(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh})^2 + 2426.3(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) \right] \text{ (Mpa)} \quad (5.19)$$



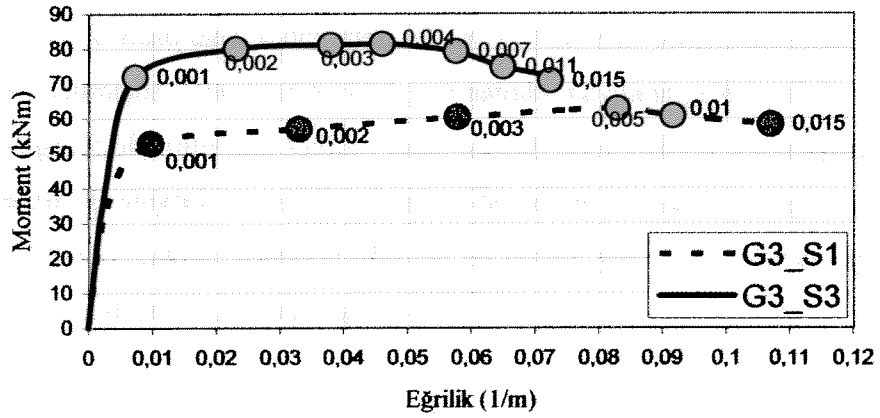
Şekil 5.7: Pekleşme bölgesinde çekme testi ve türetilen fonksiyona ait verilerin dağılımı

### 5.3 Kuramsal Hesap

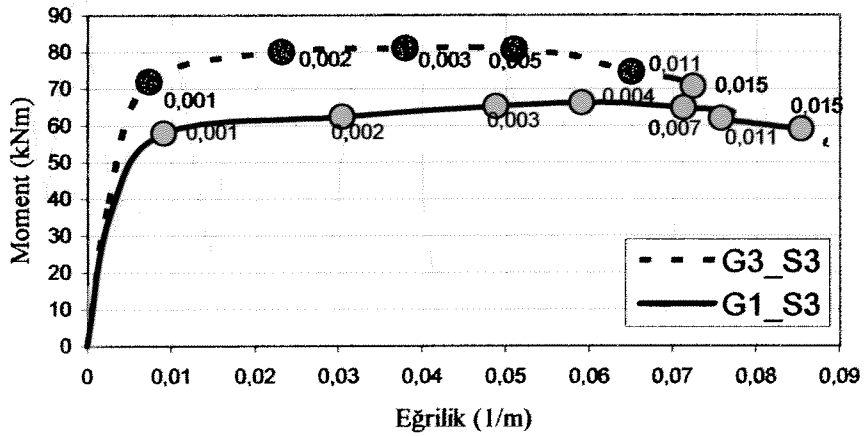
Beton ve donatı için öngörülen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri kullanılarak deney numunelerinin kuramsal hesapları yapılmıştır. Elde edilen kuramsal moment eğrilik ilişkileri Şekil 5.8-5.10'da verilmektedir. Şekil 5.9 ve 5.10'da grafik üzerinde verilen değerler en dış beton basınç lifinde ulaşılan şekil değiştirme değerlerini ifade etmektedir.



Şekil 5.8: Moment-eğrilik ilişkisi (Kuramsal yükleme)



Şekil 5.9: Moment-eğrilik ilişkisi içinde betonda oluşan şekil değiştirmeler (G3)



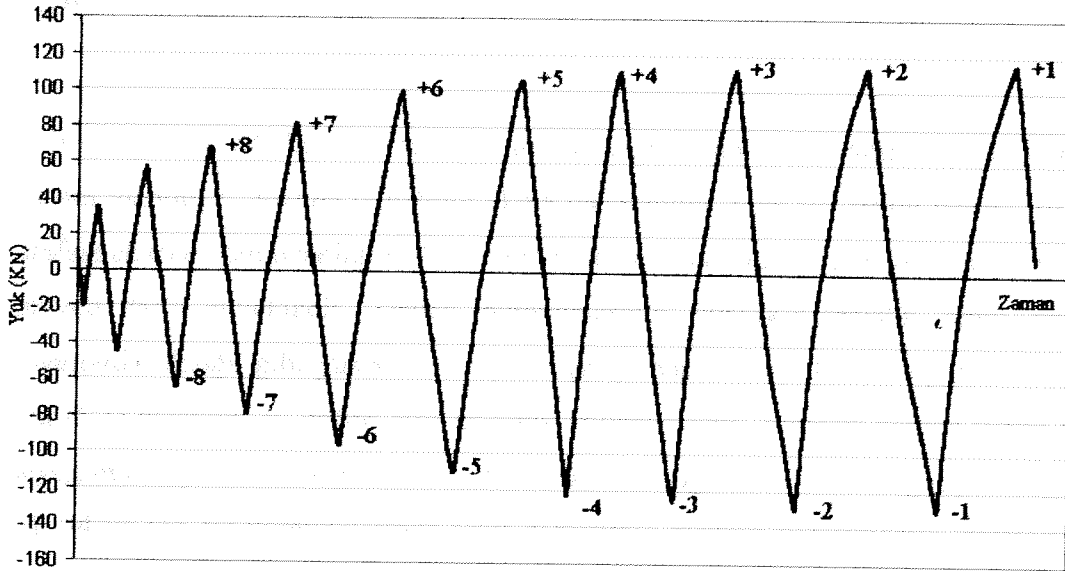
Şekil 5.10: Moment-eğrilik ilişkisi içinde betonda oluşan şekil değiştirmeler (S3)

## ALTINCI BÖLÜM

# DENEYSEL ve KURAMSAL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

### 6.1 Deneysel ve Kuramsal Moment Eğrilik İlişkileri

Deneysel ve kuramsal olarak elde edilen sonuçların değerlendirilmesi işlemi öncelikle moment-eğrilik ilişkilerinin karşılaştırılması ile yapılmıştır. Deney sırasında kesit üzerinde yapılan eğrilik ölçümleri hazırlanan bilgisayar programına girilmiş ve söz konusu eğrilik değerleri için kesit üzerinde oluşan moment, kuramsal olarak hesaplanmıştır. Deneyle ilgili yapıldığı sırada meydana gelen çatlak oluşumları nedeniyle eğrilik ölçümlerinin sağlıklı bulunmadığı numunelerde karşılaştırma işlemi yapılmamıştır. Deneysel ve teorik olarak elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yapılırken itme ve çekme yönünde ulaşılan en büyük yükleme değerleri ayıklanmış ve karşılaştırmalar bu noktalarda yapılmıştır.



Şekil 6.1: G2\_S3 numunesi için elde edilen yük okumaları



Şekil 6.1, G2\_S3 numunesi için elde edilen hidrolik veren yükü okumalarını göstermektedir. Deneysel ve teorik olarak yapılan karşılaştırmalar şekil üzerinde gösterilen sekiz tepe noktasında gerçekleştirilmiştir. Söz konusu bu noktalar moment eğrilik ilişkisinin zarfını temsil etmektedir. Artı değerler çekme anındaki, eksi değerler de itme anındaki maksimum okumaları ifade etmektedir.

Söz konusu tepe noktalarına ait kuramsal ve deneysel moment-eğrilik ilişkilerinin değişimi Ek E'de verilmektedir. Kuramsal sonuçların deneysel olarak elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir.

## 6.2 Kuramsal Moment Taşıma Kapasiteleri

Deneysel moment değerleri, hem kuramsal sonuçlar ile hem de Cardenas ve diğ. [18] tarafından eğilme ve aksenal basınç etkisindeki perde duvarlar için önerilen bağıntı ile kontrol edilmiştir. Yazarlar, aksenal basınca maruz, simetrik donatılı dikdörtgen perde duvarların eğilme mukavemetini (6.1) bağıntısı ile tarif etmişlerdir.

$$M_u = 0.5A_s f_y l_w \left(1 + \frac{N_u}{A_s f_y}\right) \left(1 - \frac{c}{l_w}\right) \quad (6.1)$$

Bu bağıntıda  $M_u$  kesitin moment taşıma kapasitesini,  $A_s$  kesitin boyuna donatı toplam alanını,  $f_y$  boyuna donatının akma dayanımını,  $c$  en dış beton basınç lifinin tarafsız eksene olan uzaklığını,  $l_w$  de perde duvar kesit yüksekliğini ve  $N_u$  da aksenal kuvveti tarif etmektedir. Deney numunelerinin yükseklik/genişlik oranı perde duvarlarda olduğu gibi yüksektir. Yapılan çalışmada aksenal kuvvet uygulanmadığı için (6.1) bağıntısı  $N_u$  değeri sıfır alınarak kullanılmıştır. Yatayda okuma yapan yer değiştirme ölçer cihazlarından alınan okumaların sağlıklı bulunmadığı için G1\_S2, G1\_S4 ve G2\_S2 numunelerinde şekil değiştirme ölçümü yapılamamış, dolayısıyla tarafsız eksen derinliği hesaplanmamıştır. Deneysel çalışma sırasında elde edilen ve

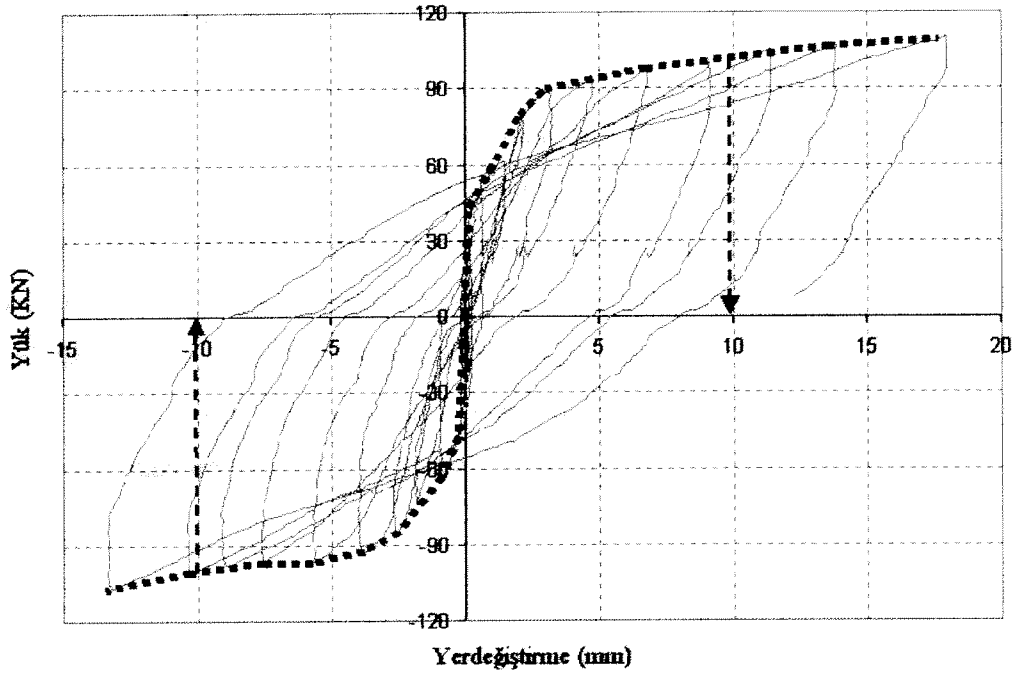
6.1 bağıntısına göre bulunan moment değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Görüldüğü gibi 6.1 bağıntısına göre bulunan sonuçlar ile deneysel sonuçlar uyumludur.

Çizelge 6.1 Kuramsal ve deneysel moment değerlerinin karşılaştırılması

Numune	Md (kNm)	Mu (kNm)	Md/Mu
G1 S1	40,11	37,09	1,08
G2 S2	56,19	-	-
G1 S3	65,70	67,37	0,98
G1 S4	47,93	-	-
G2 S1	43,65	43,35	1,01
G2 S2	61,52	-	-
G2 S3	73,41	67,59	1,09
G2 S4	48,38	43,72	1,11
G3 S1	62,66	56,09	1,12
G3 S2	65,76	67,06	0,98
G3 S3	78,08	79,54	0,98
G3 S4	61,82	56,04	1,10

### 6.3 Enerji Sönümlenme Özellikleri

Numuneler tarafından sönümlenen enerji miktarlarının tespiti için deneyler sırasında elde edilen yük-deplasman eğrilerinden faydalanılmıştır. Ara seviyelerde kullanılan çok sayıdaki boyuna donatının pekleşme özellikleri sebebiyle, yük deplasman eğrileri az da olsa artan oranlarda yük taşımaya devam etmiş ve ani düşen kol oluşmamıştır. Numunelere itme ve çekme adımları boyunca özdeş deplasman genlikleri uygulanmadığı için, yutulan enerjinin hesabı için yük-deplasman eğrisinin zarfından faydalanılmıştır. Yutulan enerjinin karşılaştırmalı olarak hesabı için özdeş bir deplasman seviyesi olan 10 mm. değeri seçilmiş, bu seviye için sönümlenen enerji miktarları hesaplanmıştır. Karşılaştırma işlemi için seçilen ‘deplasman değerinin yük-yer değiştirme eğrisi üzerindeki görünümü Şekil 6.2’de verilmektedir.



Şekil 6.2: Karşılaştırmanın yapıldığı deplasman seviyesinin seçilmesi

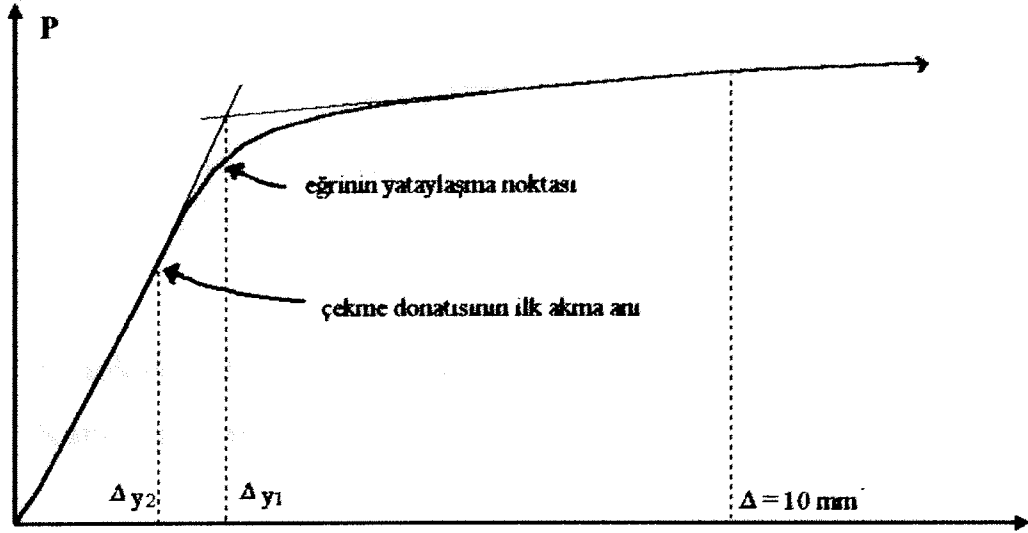
Öngörülen bu yaklaşım çerçevesinde sönmülenen enerji değerleri hesaplanmış ve Çizelge 6.2’de verilmiştir. Çizelge 6.2’den anlaşılacağı gibi sargı ve gövde bölgesinde daha fazla donatı içeren numunelerin sönmülediği enerji miktarları daha yüksektir. Çizelgede verilen değerler kapasite ifade etmemektedir ve bu değerlerin 10 mm. deplasman seviyesine dek geçerli olduğu unutulmamalıdır. Bu seviyeye dek numunelerin hiçbirinde düşen kol oluşmadığı için, daha büyük yük seviyesine ulaşan numunelerin sönmülediği enerji miktarı artmaktadır.

Çizelge 6.2: Numuneler tarafından sönmülenen enerji miktarları

Numune	Enerji (kNmm)	Numune	Enerji (kNmm)	Numune	Enerji (kNmm)
G1_S1	1201.94	G2_S1	1321.56	G3_S1	1795.50
G1_S2	-	G2_S2	1905.00	G3_S2	1891.88
G1_S3	1938.46	G2_S3	2066.62	G3_S3	2285.80
G1_S4	1391.90	G2_S4	1440.06	G3_S4	1723.64

## 6.4 Deplasman Sünekliği Seviyeleri

Deplasman sünekliğinin hesabında ulaşılan en büyük yer değiştirme seviyesi için Bölüm 6.3'te belirtilen 10 mm. değeri esas alınmıştır. Moment eğrilik ilişkileri ve kuramsal kesit çözümlenmeleri sırasında donatının akma anı ile eğrilerin yataylaşmaya başladığı seviyelerin az da olsa birbirinden farklı olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu bu durumun sembolik moment eğrilik ilişkisi üzerinde gösterimi Şekil 6.3'de verilmektedir. Deney numunelerinde farklı seviye ve sayıda donatı bulunması nedeniyle bu durum oluşmaktadır.



Şekil 6.3: Süneklik hesabı için akma anının belirlenmesi

Deplasman sünekliğinin belirlenmesi için çekme donatısının ilk akma anı yerine eğrinin yataylaşma noktası esas alınmış, hesaplamalar bu noktaya göre yapılmıştır. Öngörülen yer değiştirme seviyesi için deplasman sünekliği ifadesi denklem 6.2'de verilmektedir. Elde edilen süneklik değerleri ise Çizelge 6.3'te gösterilmiştir.

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_{10}}{\Delta_{y1}} \quad (6.2)$$

Görüldüğü gibi daha fazla boyuna donatı içeren numunelerde yük deplasman eğrileri daha ileri yer değiştirme seviyelerinde yataylaşmakta, bu da bu elemanların

süneklik seviyesini düşürmektedir. Burada bir noktaya dikkat edilmelidir. Hesaplanan değerler elemanların süneklik kapasitesini değil, 10 mm. yer değiştirme seviyesi için süneklik talebini ifade etmektedir. Bulunan süneklik seviyeleri arasındaki farklılık esas itibari ile eğrilerin yataylaşmaya başladığı yer değiştirme seviyelerindeki farklılaşmadan kaynaklanmaktadır. Numunelerde düşen kolun oluşmasına imkan verecek yer değiştirme seviyeleri için hesaplanacak süneklik kapasitelerinin daha büyük seviyelerde oluşması beklenmelidir.

Çizelge 6.3: Deplasman sünekliği değerleri

Numune	$\mu_{\Delta}$	Numune	$\mu_{\Delta}$	Numune	$\mu_{\Delta}$
G1_S1	5.71	G2_S1	5.26	G3_S1	4.55
G1_S2	-	G2_S2	4.44	G3_S2	3.77
G1_S3	4.44	G2_S3	4.17	G3_S3	3.33
G1_S4	5.56	G2_S4	5.13	G3_S4	4.35

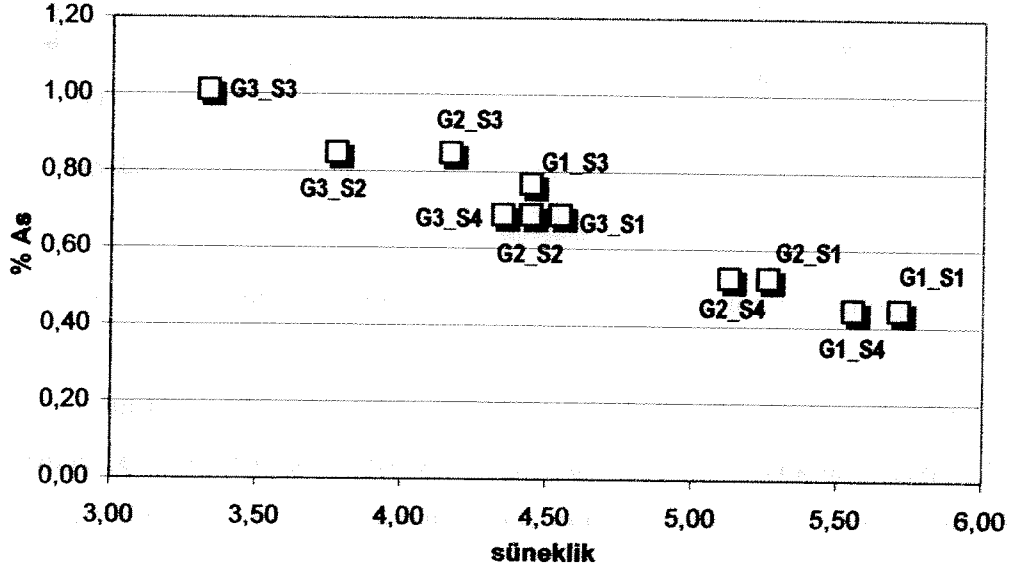
## 6.5 Süneklik, Enerji Sönümlenme ve Dayanım Özelliklerinin Karşılaştırılması

Deplasman sünekliği, ulaşılan deneysel moment seviyeleri, boyuna donatı oranları ve yutulan enerji miktarları Çizelge 6.4’de bir araya getirilmiştir.

Çizelge 6.4: Süneklik, moment, boyuna donatı oranı ve yutulan enerji miktarları

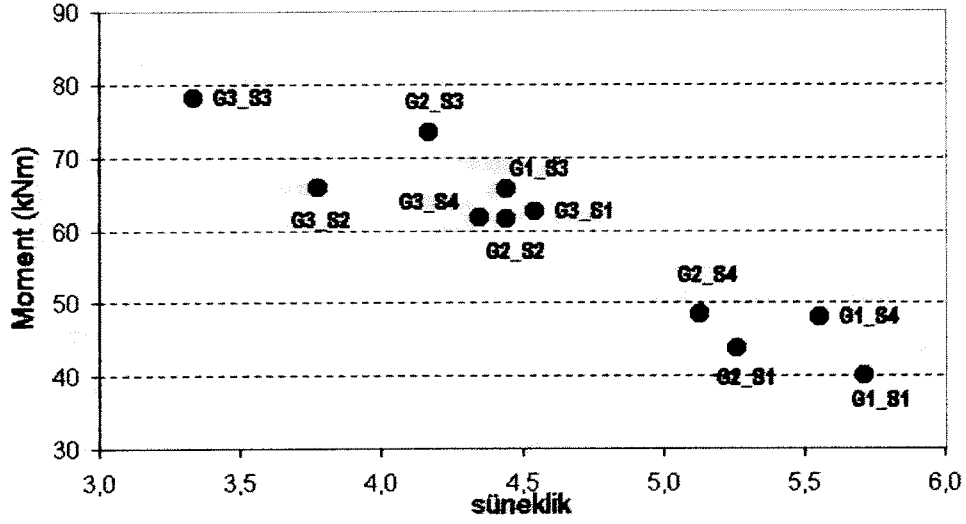
NUMUNE	As %	Süneklik	Enerji (kNmm)	Md (kNm)
G1_S1	0,44	5,71	1201,94	40,11
G2_S2	0,61	-	-	56,19
G1_S3	0,77	4,44	1938,46	65,70
G1_S4	0,44	5,56	1391,90	47,93
G2_S1	0,53	5,26	1321,56	43,65
G2_S2	0,69	4,44	1905,00	61,52
G2_S3	0,85	4,17	2066,62	73,41
G2_S4	0,53	5,13	1440,06	48,38
G3_S1	0,69	4,55	1795,50	62,66
G3_S2	0,85	3,77	1891,88	65,76
G3_S3	1,01	3,33	2285,80	78,08
G3_S4	0,69	4,35	1723,64	61,82

Boyuna donatı miktarı, süneklik ve enerji sönümlenme özellikleri üzerinde etkili görünmektedir. Şekil 6.4'te ulaşılan süneklik seviyelerinin boyuna donatı miktarı ile ilişkisi gösterilmiştir. Boyuna donatı miktarında sağlanan artış, elemanların sünekliği üzerinde önemli kayıplara sebep olmaktadır.



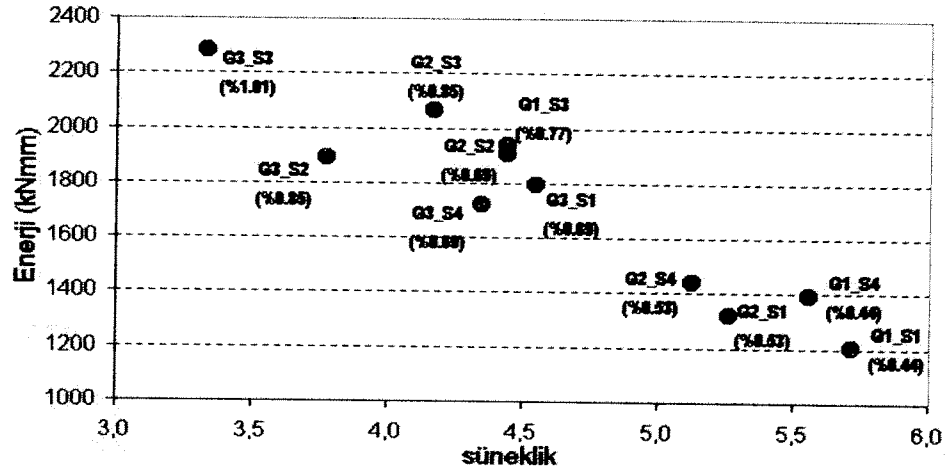
Şekil 6.4: Boyuna donatı miktarı ve süneklik arasındaki ilişki

Deplasman sünekliği seviyeleri ve ulaşılan moment taşıma kapasitelerinin karşılaştırılması ise Şekil 6.5'te verilmiştir. Özdeş geometrik özelliklere ve benzer sargılama etkilerine sahip olan numunelerde artan boyuna donatı miktarları, ulaşılan maksimum moment değerini yükseltmekle birlikte süneklik seviyelerini düşürmektedir. Pratikte 4-5 seviyelerinin deplasman açısından yeterli sünekliği ifade ettiği kabul edilmektedir [6,49]. %0.85 ve %1.01 oranında boyuna donatı içeren G3\_S2 ve G3\_S3 numunelerinin süneklikleri, kabul edilen yer değiştirme seviyesi için öngörülen süneklik seviyelerinin altında kalmaktadır.



Şekil 6.5: Deneysel moment değerleri ve süneklik arasındaki ilişki

Benzer durum enerji sönümlenme özelliklerinde de kendini göstermektedir. Özdeş deplasman seviyesi dikkate alınarak hesaplanan enerji ve süneklik değerleri Şekil 6.6'da verilmektedir. Boyuna donatı miktarının etkisinin de gözlenebilmesi için numunelerin içerdiği donatı oranları şekil üzerinde gösterilmiştir. Göreceli olarak daha fazla boyuna donatı içeren numunelerin sönümlediği enerji miktarı daha yüksek olsa da süneklik seviyeleri daha düşüktür. Farklı gövde ve sargı donatısı uygulamalarının ve farklı boyuna donatı miktarlarının süneklik, dayanım ve enerji sönümlenme özellikleri üzerindeki etkilerini inceleyebilmek amacıyla numuneler sınıflandırılmıştır. Sınıflandırma işlemi yapılırken gövde donatıları özdeş numunelerde sargı donatısının etkileri, sargı donatıları özdeş olan numuneler üzerinde gövde donatısının etkileri incelenmiştir. Göz önüne alınan bu sınıflandırma sonucunda düzenlenen değerler Çizelge 6.5-6.11'de verilmiştir.



Şekil 6.6: Deplasman sünekliği ve yutulan enerji değerlerinin karşılaştırılması

Çizelge 6.5: Farklı sargı şekillerinin G1 gövde donatısı üzerindeki etkileri

Numune	As %	Md (kNm)	Enerji (kNmm)
G1_S1	0,44	40,11	1201,94
G1_S2	0,61	56,19	-
G1_S3	0,77	65,70	1938,46
G1_S4	0,44	47,93	1391,90

Çizelge 6.6: Farklı sargı şekillerinin G2 gövde donatısı üzerindeki etkileri

Numune	As %	Md (kNm)	Enerji (kNmm)
G2_S1	0,53	43,65	1321,56
G2_S2	0,69	61,52	1905,00
G2_S3	0,85	73,41	2066,62
G2_S4	0,53	48,38	1440,06

Çizelge 6.7: Farklı sargı şekillerinin G3 gövde donatısı üzerindeki etkileri

Numune	As %	Md (kNm)	Enerji (kNmm)
G3_S1	0,69	62,66	1795,50
G3_S2	0,85	65,76	1891,88
G3_S3	1,01	78,08	2285,80
G3_S4	0,69	61,82	1723,64

Çizelge 6.8: Farklı gövde şekillerinin S1 sargı donatısı üzerindeki etkileri

Numune	As %	Md (kNm)	Enerji (kNmm)
G1_S1	0,44	40,11	1201,94
G2_S1	0,53	43,65	1321,56
G3_S1	0,69	62,66	1795,50



Çizelge 6.9: Farklı gövde şekillerinin S2 sargı donatısı üzerindeki etkileri

Numune	As %	Md (kNm)	Enerji (kNmm)
G1_S2	0,61	56,19	-
G2_S2	0,69	61,52	1905,00
G3_S2	0,85	65,76	1891,88

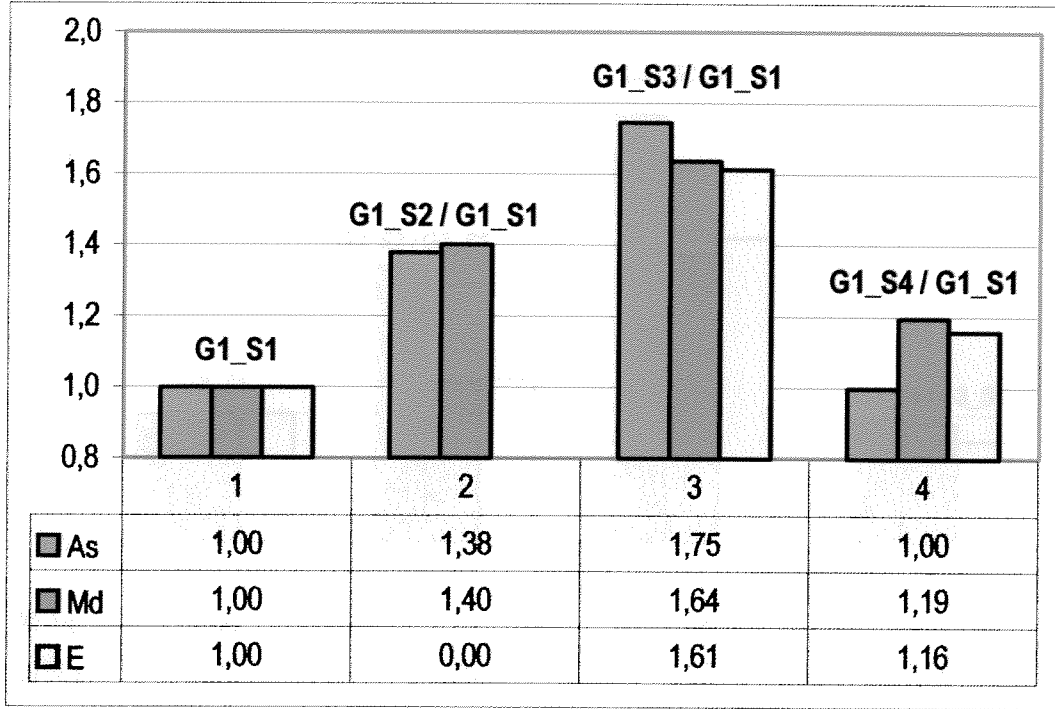
Çizelge 6.10: Farklı gövde şekillerinin S3 sargı donatısı üzerindeki etkileri

Numune	As %	Md (kNm)	Enerji (kNmm)
G1_S3	0,77	65,70	1938,46
G2_S3	0,85	73,41	2066,62
G3_S3	1,01	78,08	2285,80

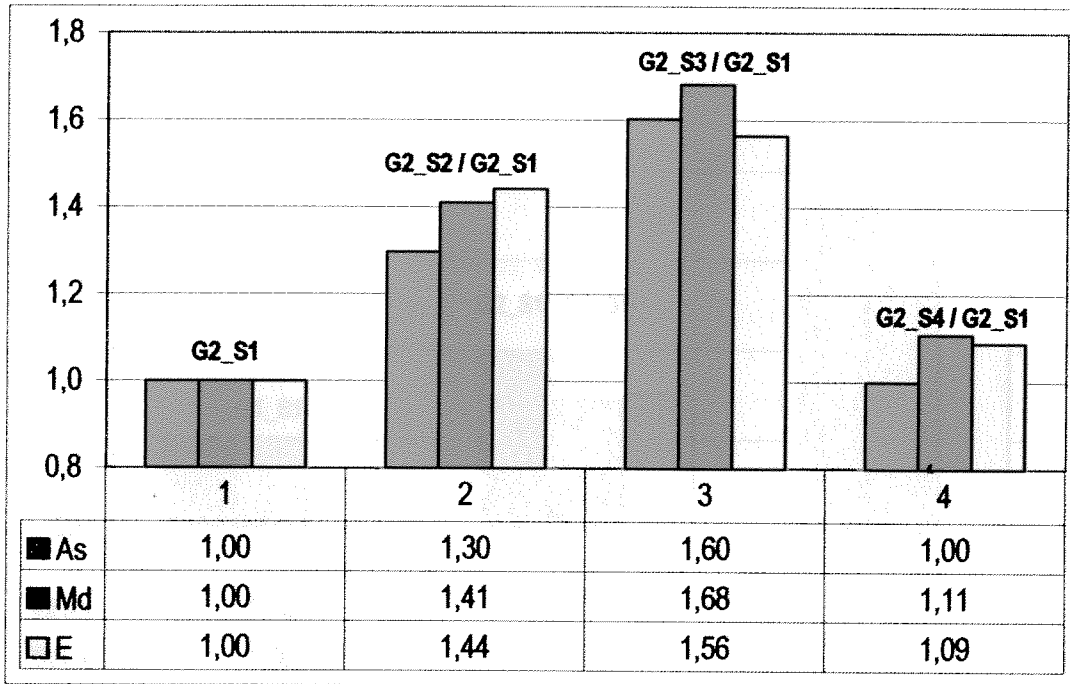
Çizelge 6.11: Farklı gövde şekillerinin S4 sargı donatısı üzerindeki etkileri

Numune	As %	Md (kNm)	Enerji (kNmm)
G1_S4	0,44	47,93	1391,90
G2_S4	0,53	48,38	1440,06
G3_S4	0,69	61,82	1723,64

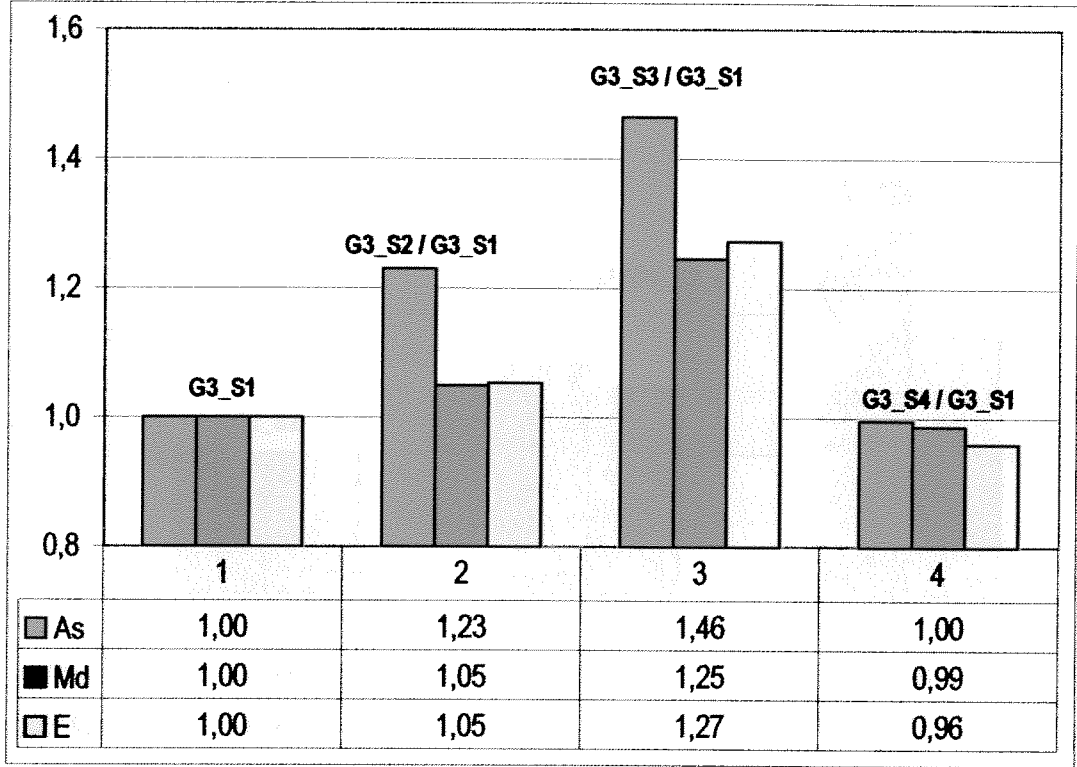
Farklı gövde ve sargı şekilleri içeren numunelerde artan donatı miktarları ile birlikte ulaşılan moment ve sönmölen enerji değeri artmaktadır. Gövde ve sargı bölgelerinde kullanılan boyuna donatı miktarlarında sağlanan artış oranlarının, ulaşılan moment ve sönmölen enerji değeriinde sağlanan artış oranları ile karşılaştırılması yapılmış, böylelikle hangi durumun daha etkili olduğu araştırılmıştır. Artış oranları hesaplanırken en az değeri veren numunelerin donatı oranı, moment ve enerji değeri birim kabul edilmiş, diğeri numunelerden elde edilen sonuçların bu değere bölünmesi ile artış oranları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.7-6.13'te gösterilmektedir. Yük deplasman okumalarının sağlıklı bulunmadığı G1\_S2 numunesi için sönmölen enerji miktarı hesaplanmamış, dolayısıyla Şekil 6.11'de karşılaştırma işlemi boyuna donatı oranı ve ulaşılan moment seviyesi üzerinden yapılmıştır.



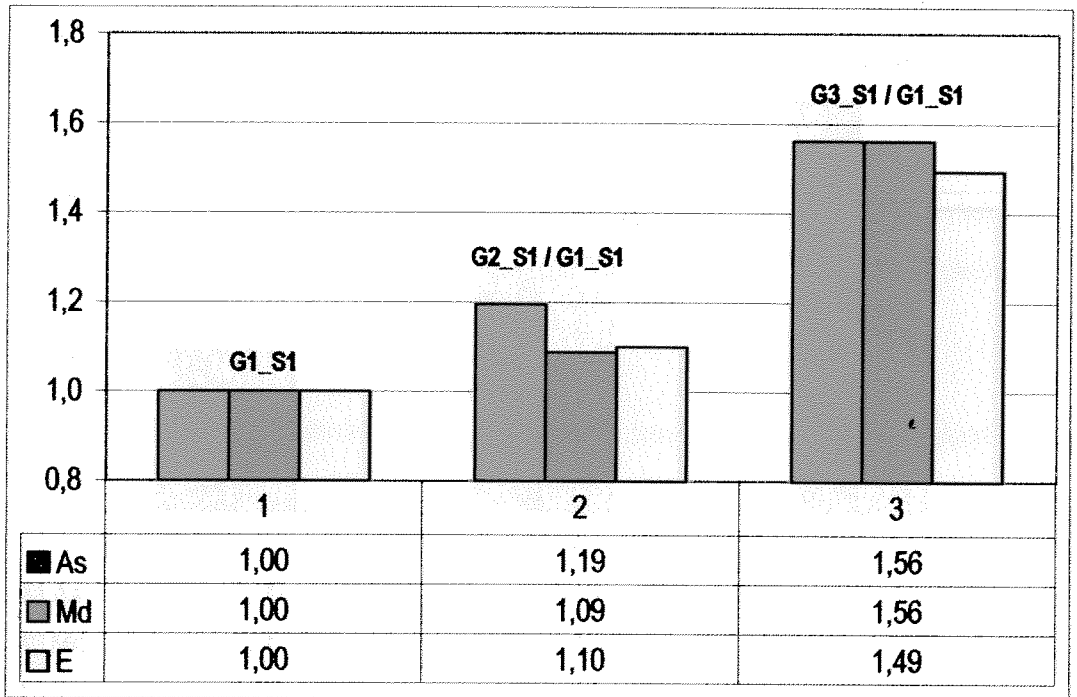
Şekil 6.7: Sargı şekillerinin sebep olduğu artış oranlarının karşılaştırılması (G1)



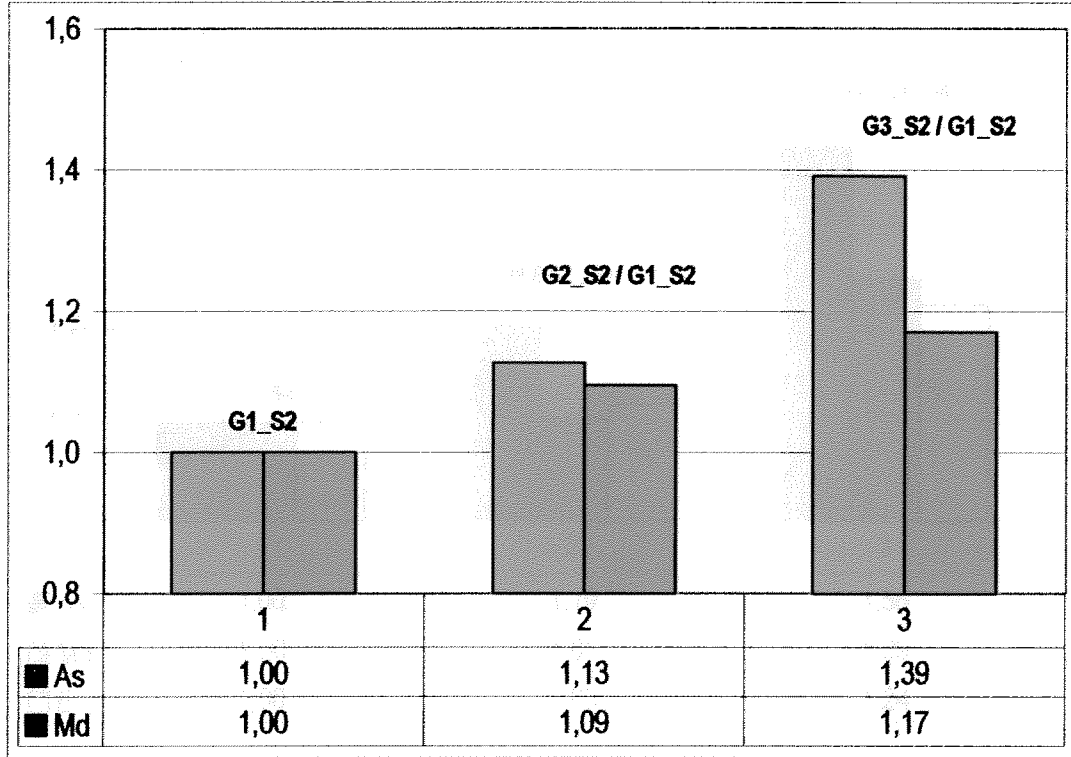
Şekil 6.8: Sargı şekillerinin sebep olduğu artış oranlarının karşılaştırılması (G2)



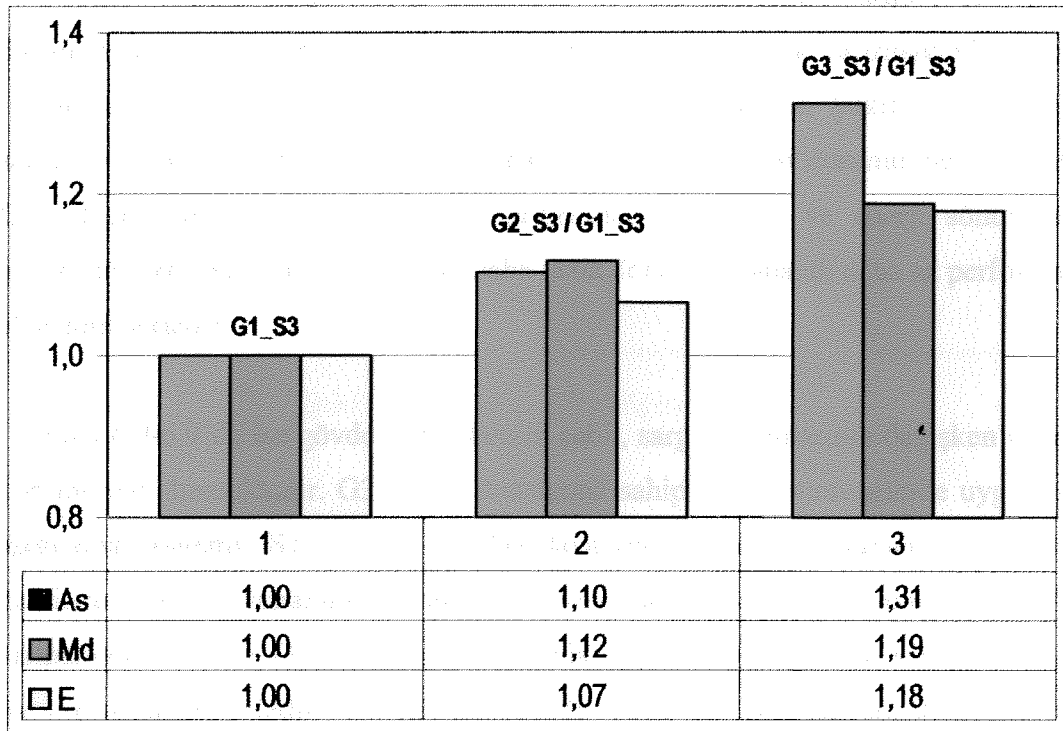
Şekil 6.9: Sargı şekillerinin sebep olduğu artış oranlarının karşılaştırılması (G3)



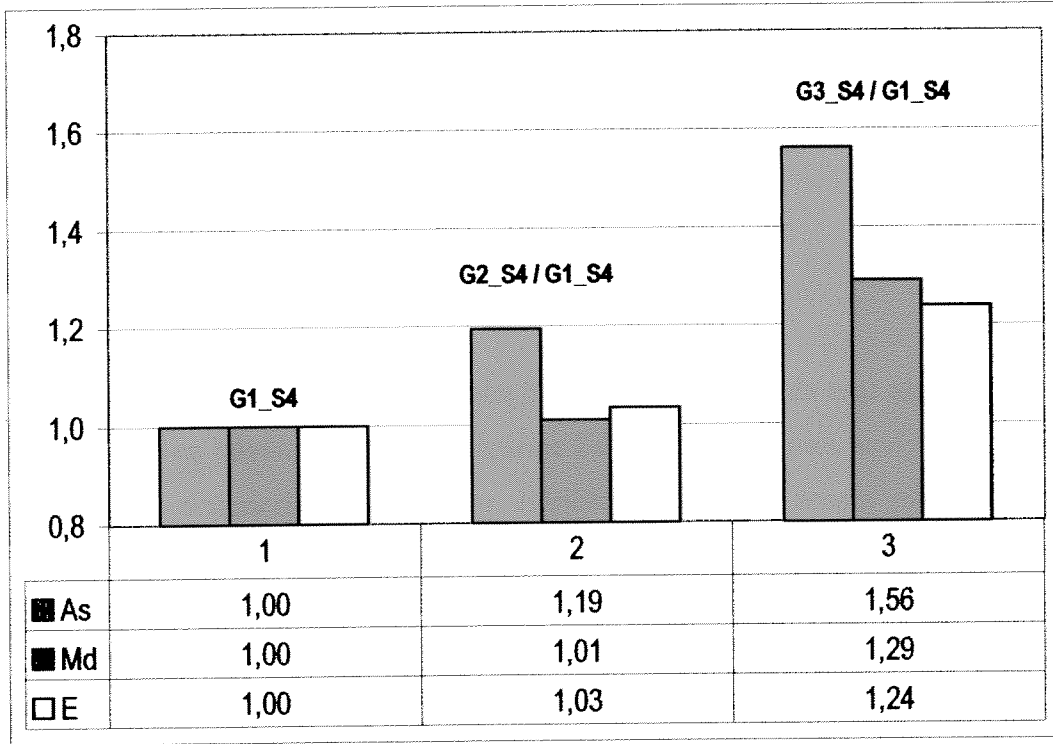
Şekil 6.10: Gövde şekillerinin sebep olduğu artış oranlarının karşılaştırılması (S1)



Şekil 6.11: Gövde şekillerinin sebep olduğu artış oranlarının karşılaştırılması (S2)



Şekil 6.12: Gövde şekillerinin sebep olduğu artış oranlarının karşılaştırılması (S3)



Şekil 6.13: Gövde şekillerinin sebep olduğu artış oranlarının karşılaştırılması (S4)

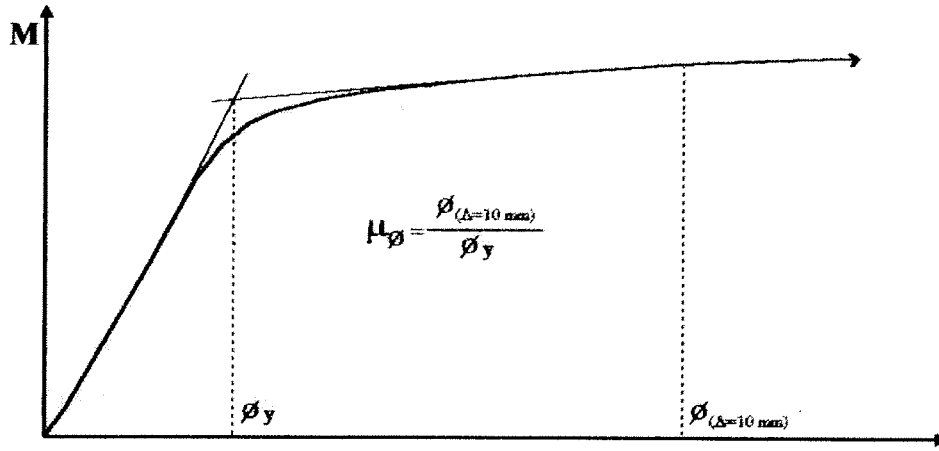
Gövde ve sargı bölgelerinde kullanılan boyuna donatıların arttırılması işlemi dayanım ve enerji sönümlenme özelliklerini göreceli olarak artırmaktadır. Fakat sağlanan artış donatı miktarındaki artışın gerisinde kalmaktadır. Şekil 6.10 - 6.13'te sargı donatılarının sabit, gövde donatılarının değişken olması durumu ele alınmıştır. Görüldüğü gibi gövde donatılarının arttırılması, dayanım ve enerji sönümlenme açısından etkili bir yöntem değildir. Daha fazla donatı kullanarak daha az performans elde edilmektedir.

Şekil 6.7-6.9'da ise gövde donatılarının sabit, sargı donatılarının değişken olması durumu ele alınmaktadır. G3 gövde donatısına sahip bütün numunelerde uygulanan sargılama yöntemi (S1, S2, S3 ve S4) dayanım ve enerji sönümlenme özellikleri üzerinde etkili olamamakta, sağlanan artış donatı artış oranının gerisinde kalmaktadır. G1 ve G2 gövde donatılarında uygulanan sargılama şekillerinde ise durum daha belirsizdir. Gövde bölgesinde daha az boyuna donatı içeren bu numunelerde sargı bölgesindeki boyuna donatının arttırılması ile elde edilen iyileşme

seviyeleri, donatı artış oranlarına daha yakın görünmektedir. Bununla beraber uygulanan sargılama yöntemlerinin enerji sönümlenme ve dayanım artışı üzerinde etkin bir rol oynadığını söylemek mümkün görünmemektedir.

## 6.6 Deneysel ve Kuramsal Eğrilik Süneklikleri

Eğrilik sünekliğinin hesabı için daha önceki hesaplamalarda esas alınan ve bütün numunelerde en büyük ortak yer değiştirme kabul edilen 10 mm. seviyesine karşılık gelen eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Eğrilik sünekliğinin hesabı moment eğrilik ilişkilerinin zarfı kullanılarak Şekil 6.14'teki gibi elde edilmiştir. İtme ve çekme durumları için elde edilen değerler kullanılarak ortalama eğrilik sünekliği değerleri hesaplanmıştır. Şekil değiştirme ölçümlerinin sağlıklı bulunmadığı G1\_S2, G1\_S4 ve G2\_S2 numunelerinde eğrilik sünekliği hesaplanmamıştır. Eğrilik sünekliği değerleri Çizelge 6.12'de verilmektedir.

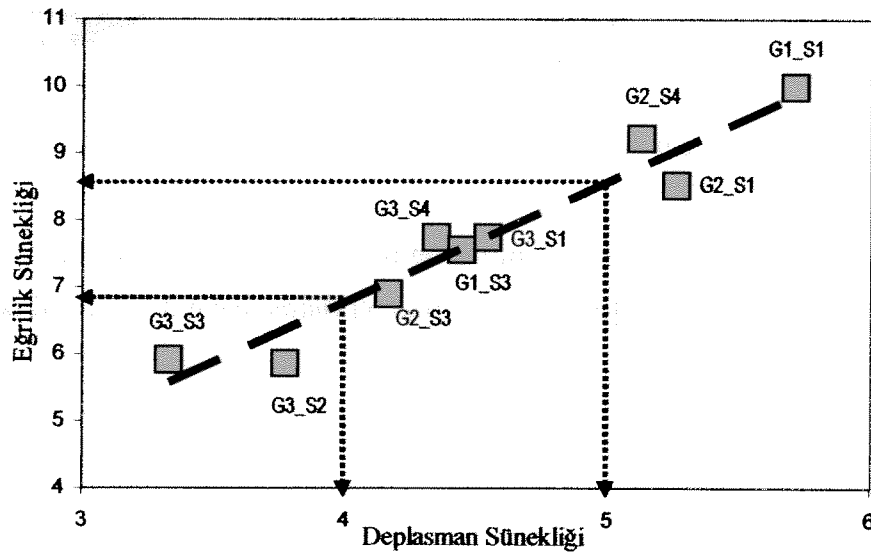


Şekil 6.14: Eğrilik sünekliğinin hesabı

Çizelge 6.12: Eğrilik sünekliği değerleri

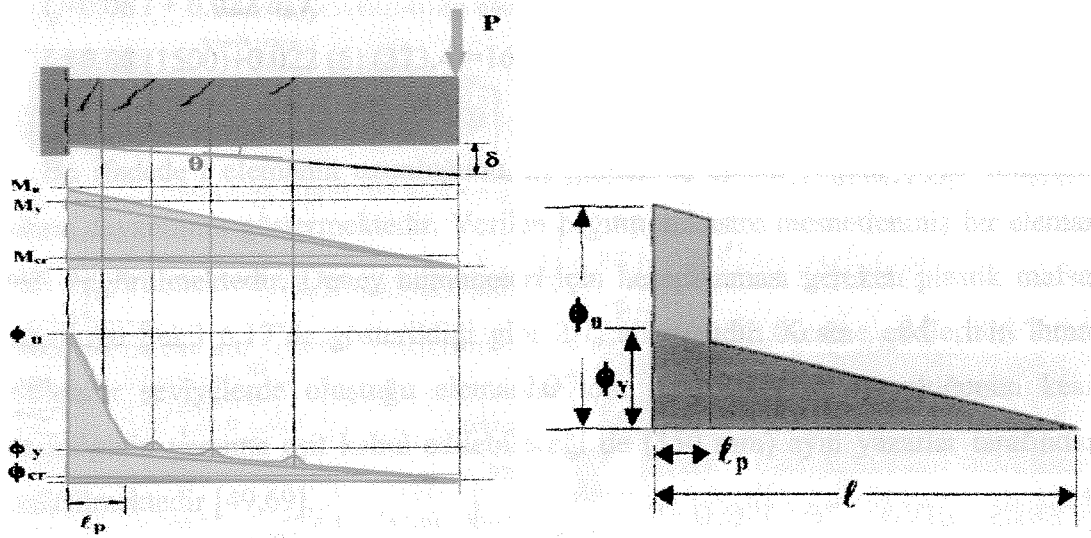
Numune	$\mu_\phi$	Numune	$\mu_\phi$	Numune	$\mu_\phi$
G1_S1	10.00	G2_S1	8.53	G3_S1	7.75
G1_S2	-	G2_S2	-	G3_S2	5.85
G1_S3	7.56	G2_S3	6.90	G3_S3	5.91
G1_S4	-	G2_S4	9.23	G3_S4	7.75

Deplasman ve eğrilik sünekliği değerleri farklı seviyelerde olmasına rağmen benzer sonuçlara götürmektedir. Her iki süneklik ifadesi de artan donatı oranı ile birlikte azalan süneklik seviyelerini işaret etmektedir. Eğrilik ve deplasman sünekliği seviyeleri arasındaki ilişki Şekil 6.15'te gösterilmiştir. Görüldüğü gibi elde edilen sonuçlara göre iki süneklik ifadesi arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Eğrilik sünekliği değerleri deplasman sünekliği değerlerinden daha yüksektir. Pratikte deplasman sünekliği için yeterli kabul edilen 4-5 seviyelerine karşılık gelen eğrilik sünekliği değerleri Şekil 6.15'te gösterilmiştir.



Şekil 6.15: Deplasman ve eğrilik sünekliklerinin karşılaştırılması

Eğrilik ve deplasman sünekliği arasındaki ilişkinin kuramsal olarak ifadesi ile ilgili günümüze kadar pek çok çalışma yapılmıştır [6,46,49]. Şekil 6.16'da ankastre betonarme eleman modelinin moment ve eğrilik davranışı ayrı ayrı gösterilmektedir.  $M_{cr}$  çatlama momentini,  $M_y$  akma momentini,  $M_u$  ulaşılan maksimum moment seviyesini ve  $\phi_{cr}$ ,  $\phi_y$ ,  $\phi_u$  değerleri de bunlara karşılık gelen eğrilik seviyelerini göstermektedir [69]. Akma noktasının geçilmesinden sonra momentte meydana gelen artış, plastik mafsallaşmanın olduğu kısımda elemanın eğriliği üzerinde büyük artışa sebep olmaktadır. Eğrilik belirli bir bölge üzerinde yığılmakta ve davranışın meydana geldiği bu bölge plastik mafsal olarak adlandırılmaktadır. Şekil 6.16'da bu durumun idealize edilmiş hali gösterilmektedir.



Şekil 6.16: Moment - eğrilik davranışı ve plastik mafsall oluşumu

Eğrilik yığılmasının idealize edildiği bu durum için deplasman ve eğrilik sünekliği arasındaki ilişki 6.3-6.6 bağıntıları ile tarif edilmiştir [6].

$$\Delta_y = \frac{1}{3} \phi_y (l) \left( \frac{9}{10} l \right) \quad (6.3)$$

$$\Delta_u = \Delta_y + (\phi_u - \phi_y) (l_p) (l - 0.5l_p) \quad (6.4)$$

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} = 1 + \frac{30}{9l^2} \left( \frac{\phi_u}{\phi_y} - 1 \right) (l_p) (l - 0.5l_p) \quad (6.5)$$

$$\mu_{\phi} = \frac{\phi_u}{\phi_y} = \frac{9}{30} \frac{l^2}{l_p} \frac{(\mu_{\Delta} - 1)}{l - 0.5l_p} + 1 \quad (6.6)$$

Bu ifadelerde  $\mu_{\Delta}$  deplasman sünekliğini,  $\mu_{\phi}$  eğrilik sünekliğini,  $\Delta_y$  ve  $\phi_y$  akma anı için deplasman ve eğrilik değerlerini,  $\Delta_u$  ve  $\phi_u$  maksimum deplasman ve eğrilik değerlerini,  $l$  elemanın boyunu ve  $l_p$  de plastik mafsall uzunluğunu göstermektedir.

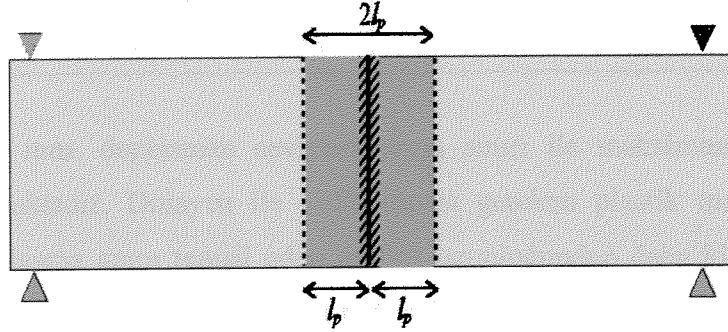
Yapılan deneysel çalışma sırasında uygulanan ölçüm yöntemi ile plastik mafsall uzunluğu tespit edilmemiştir. Mafsall uzunluğunun 6.7 ifadesindeki gibi hesabının yeterli yaklaşımı sağlayacağı farklı araştırmacılar tarafından belirtilmektedir [49,69].



$$l_p = 0.08 l + 0.022 d_b f_y$$

$$l_p = 0.08 (1500) + 0.022 (6) (373.4) = 169.3 \quad (\text{mm}) \quad (6.7)$$

Bu ifadede  $l$  elemanın uzunluğunu,  $d_b$  kullanılan donatı çapını,  $f_y$  ise donatının akma dayanımını göstermektedir. Verilen bağıntı ankastre mesnetlenmiş bir eleman için öngörülmektedir. Deney numuneleri için hesaplanması gereken plastik mafsal uzunluğu Şekil 6.17’de gösterildiği gibi  $2 l_p$  alınmalıdır. Kesme etkilerinin ihmal edilebilir seviyelerde olduğu elemanlar için plastik mafsal uzunluğunun kesit derinliğinin yarısına eşit kabul edilebileceği de (350 mm) aynı yazarlar tarafından belirtilmektedir [49,69].



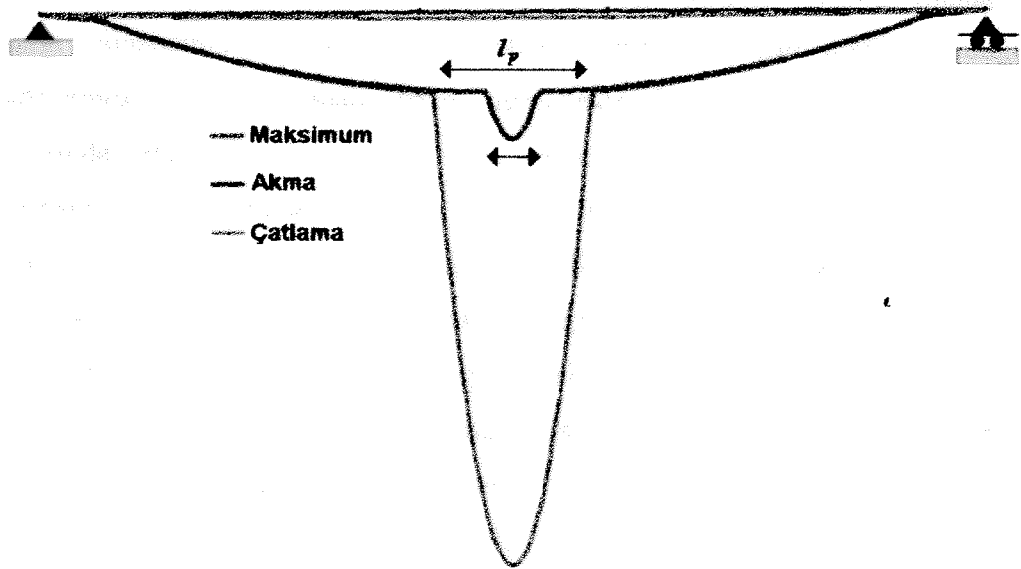
Şekil 6.17: Deney numunelerinde plastik mafsal bölgesinin belirlenmesi

Bu şartlar altında plastik mafsal uzunluğu 338.6 mm. olarak kabul edilmiş, daha önce belirlenen 10 mm. yer değiştirme seviyesi için bulunan deneysel eğrilik sünekliliği değerleri ile kuramsal olarak hesaplanan eğrilik sünekliliği değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 6.13’te verilmiştir. Kuramsal olarak hesaplanan eğrilik süneklilikleri, kabul edilen plastik mafsal uzunluğu için deneysel eğrilik sünekliliklerine göre daha küçük değerler vermektedir. Deneysel eğrilik sünekliliği değerleri kuramsal sonuçların ortalama olarak 1.20-1.30 kat üzerindedir. Meydana gelen bu farklılaşma, bağıntılarda kullanılan plastik mafsal uzunluğundan kaynaklanmaktadır. Şekil 6.18’de çatlama, akma ve maksimuma ulaşma anında kesit üzerinde meydana gelen eğriliğin değişimi idealize edilmektedir [69]. Akma sınırı aşıldıktan sonra plastikleşme bölgesi genişlemekte ve ulaşılan eğrilik seviyeleri bu mafsal genişliği içinde hızla yükselmektedir.

Çizelge 6.13: Kuramsal ve deneysel eğrilik sünekliklerinin karşılaştırılması

Numune	$l_p$	$\mu_{\Delta}$	$\mu_{\phi}$ (deneysel)	$\mu_{\phi}$	Oran
G1_S1	338,6	5,71	10,00	8,06	1,24
G2_S2	338,6	-	-	-	-
G1_S3	338,6	4,44	7,56	6,16	1,23
G1_S4	338,6	5,56	-	7,82	-
G2_S1	338,6	5,26	8,53	7,39	1,16
G2_S2	338,6	4,44	-	6,16	-
G2_S3	338,6	4,17	6,90	5,74	1,20
G2_S4	338,6	5,13	9,23	7,18	1,28
G3_S1	338,6	4,55	7,75	6,31	1,23
G3_S2	338,6	3,77	5,85	5,16	1,14
G3_S3	338,6	3,33	5,91	4,50	1,31
G3_S4	338,6	4,35	7,75	6,02	1,29

Seçilen 10 mm. deplasman seviyesi akma sınırı ile maksimuma ulaşma anı arasında kalmaktadır. Dolayısı ile kullanılması gereken plastik mafsall uzunluğu maksimuma ulaşma anını temsil eden mafsall uzunluğundan daha küçük olmalıdır. Daha küçük plastik mafsall uzunlukları 6.8 bağıntısı ile hesaplanan kuramsal eğrilik değerlerinin yükselmesine ve deneysel ve kuramsal sonuçların daha da yaklaşmasına sebep olacaktır.



Şekil 6.18: Kesit boyunca eğrilik yığılımının değişimi [69]

## YEDİNCİ BÖLÜM

# SONUÇLAR ve ÖNERİLER

### 7.1 Sonuçlar

Bu çalışmada tersinir yükler altında derin betonarme kiriş modellerinin salt eğilme etkileri altındaki davranışları incelenmiştir. Hazırlanan numunelerin laboratuvar ortamında kırılması ile elde edilen sonuçlar, donatı çeliği ve beton üzerine geliştirilmiş davranış modellerinin kullanılması ile bulunan kuramsal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen bu çalışma ile varılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1. Geliştirilen bilgisayar programı ile deneysel olarak yapılan eğrilik ölçümleri kullanılarak kuramsal ve deneysel sonuçların karşılaştırılması yapılmış ve deneysel sonuçların kuramsal sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu gözlenmiştir.
2. Mander yaklaşımı kullanılarak numunelerde uygulanan sargılamanın gerilme-şekil değiştirme dağılımı üzerindeki etkileri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sargı donatısının dayanım ve süneklik üzerinde olumlu etkileri olduğunu göstermektedir. Hazırlanan deney numunelerinde, sargılama etkisi dayanım üzerinde ortalama %5 civarında artış sağlarken, dayanıma karşılık gelen şekil değiştirme değerlerinde %30'lara yaklaşan artışlara sebep olmuştur. Bu durum standart silindir basınç deneylerinde elde edilen gerilme şekil değiştirme eğrisinin özellikle düşen kolunda yataylaşmaya sebep olarak, elemanın daha büyük şekil değiştirme değerlerinde yük taşıma kapasitesinin göreceli olarak korunmasını sağlamaktadır. Dolayısı ile sargılama etkisi betonun sünekliğini arttırmakta ve enerji yutma kapasitesini yükseltmektedir.
3. Deneyler sırasında artan genliklerdeki itme ve çekme yer değiştirmeleri ile yüklenen numunelerden elde edilen yük deplasman ve moment-eğrilik ilişkileri, sünek olarak modellenen numunelerin donatı aktıktan sonra da yük taşımaya

devam ettiğini göstermektedir. Donatı aktıktan sonra yük taşıma kapasitesinin az da olsa artan oranlarda yükselmeye devam etmesi, deney numunelerinde farklı seviye ve sayıda kullanılan boyuna donatıların pekleşme özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Kullanılan yumuşak çeliğin daha belirgin olan pekleşme davranışı bu durumu daha da belirgin hale getirmektedir.

4. Belirlenen sabit deplasman seviyesi altında düşen kolun oluşmadığı numuneler üzerinde yapılan inceleme, artan boyuna donatı oranının sönmölenen enerji miktarını artırdığını fakat deplasman ve eğrilik sünegliği seviyelerini düşürdüğünü göstermiştir.
5. Enerji sönmöleme ve dayanım özellikleri üzerinde yapılan incelemeler, boyuna donatı oranını arttırmanın etkili bir yöntem olmadığını göstermiştir. Enerji sönmöleme ve dayanım değerlerinde sağlanan artışlar, boyuna donatı oranlarında sağlanan artış oranlarının gerisinde kalmaktadır. Bu durum gövde bölgesinde daha fazla boyuna donatı içeren numunelerde daha belirgindir.
6. Deplasman ve eğrilik sünegliği üzerinde yapılan incelemeler, her iki sünegliğin de benzer sonuçlara işaret ettiğini göstermiştir. Deneysel olarak tespit edilen eğrilik sünegliği değerlerinin deplasman sünegliği değerlerinden yüksek olduğu gözlenmiştir.
7. Deneyle sırasında numuneler üzerinde genel itibari ile meydana gelen çatlaklar benzer biçimde oluşmuştur. Gerçekleştirilen sünek eleman tasarımı ve yükleme düzeneğinin eleman ortasında kesmeden arındırılmış bir bölge oluşturması sebebiyle bütün numunelerde eğilme çatlakları oluşmuştur. Yükleme çevrimleri boyunca yükleme açıklığı bölgesinde oluşan az sayıdaki çatlaklar deney boyunca açılmış, yeni çatlakların oluşması gerçekleşmemiş ve başlangıçta oluşan bu az sayıdaki çatlakların (2 veya 3 adet) büyümesi ile deneyle sona ermiştir. Çatlak oluşumu ve ilerlemesinde karşılaşılan bu durumun kesit geometrisi ve kullanılan düz yüzeyli donatı şekli ve yerleşimi ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Göreceli olarak büyük yükseklik/genişlik oranı ve kesit yüksekliğine göre dar yükleme açıklığı sebebi ile sabit moment bölgesi üzerinde yoğunlaşan etkilerin, çatlak oluşumlarını bu seviyelerde bıraktığına inanılmaktadır. Ayrıca nervürlü yerine düz yüzeyli donatı kullanılması sebebiyle azalan aderans etkileri az sayıda fakat

göreceli olarak daha geniş çatlak oluşumlarına sebep olmuştur. İlerleyen çatlak oluşumlarına rağmen numunelerde ani dayanım düşüşlerine rastlanmamıştır.

## 7.2 Öneriler

1. Kare hasır şeklinde donatıların kullanıldığı düzlemsel derin kiriş deneyleri sonucunda, uç bölgelerinde kullanılan boyuna donatıların eleman davranışı üzerinde çok etkili olmadığı anlaşılmıştır. Yapılan kuramsal analizler ise uç bölgelerinde uygulanacak sargılama işleminin özellikle elemanların sünekliği üzerinde önemli faydalar sağladığını göstermektedir. Bu durum değişik donatılı betonarme kiriş elemanların özellikle deprem etkileri altında enerji yutma kapasitelerini arttırması bakımından önemlidir.
2. Deneyler sırasında artan yer değiştirme seviyesi ve ilerleyen çatlak oluşumları ile birlikte elemanlarda düzlem dışına doğru hareket etme eğilimi gözlenmiştir. Bu durum muhtemel bir göçmenin stabilite kaybı sebebiyle oluşabileceğini göstermektedir. Düzlem dışına hareketin mümkün olabileceği durumlar düşünülmeli, stabilite kaybı sebebiyle oluşabilecek muhtemel bir göçmeye izin verilmemelidir.

## KAYNAKLAR

1. Abrams, D.P., Laboratory Definitions Of Behavior For Structural Components and Building Systems, in Earthquake -Resistant Concrete Structures Inelastic Response and Design, pp. 91-152, American Concrete Institute,1991
2. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, İmar ve Iskan Bakanlığı Deprem Araştırma Enstitüsü Başkanlığı, Ankara,1998.
3. Akbay, Z., and Aktan, H.M., Seismic Safety Assesment of Reinforced Concrete Frame Wall Buildings, ACI Journal, Title No. 87-S71, 693-699,1991.
4. Aktan, A.E., and Pecknold, D.A., Response Of A Reinforced Concrete Section to Two Dimensional Curvature Histories, ACI Journal, Title No. 71-16, 246-250,1974.
5. Aktan, A.E., Karlson, B.I. and Sozen, M.A., Stress-Strain Relationships of Reinforced Concrete Bars Subjected to Large Strain Reversals, Civil Engineering Studies, Structural Research Series, No.397, University of Illinois, 1973
6. Atımtay, E. Tuna, M. E., Designing the Concrete Dual Systems, Structural Engineering, Mechanics and Computation, Elsevier Science Ltd., Vol 2, 1009-1015, 2001
7. Atımtay, E., Açıklamalar ve Örneklerle Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (Betonarme Yapılar),Cilt 1-2, Bizim Büro Basımevi, Ankara, 2000
8. Attard, M.M. and Setunge, S., Stress-Strain Relationship of Confined and Unconfined Concrete, ACI Materials Journal, V .93, No.5, 432-442 ,1996.
9. Banon, H., Biggs, J.M. and Irvine, H.M., Seismic Damage in Reinforced Concrete Frames, ASCE Jounal of the Structural Division, V 01. 1 07 , No. ST9, 1713-1729,1981.
10. Barda, F., Hanson, J.M., Corley, W.G., An Investigation of the Design and Repair of Low-rise Shear Walls, Preprints of the 5th WCEE paper no:104, Rome, 1973.

11. Bayülke, N., Depremler ve Depreme Dayanıklı Betonarme Yapılar, Teknik Yayınevi, Mühendislik Mimarlık Bilgisayar Yayınları, 314 s., 1989
12. Bayülke, N., Depreme Dayanıklı Betonarme ve Yığma Yapı Tasarımı, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Yayın No:27, Genişletilmiş 3. Baskı, 245s., İzmir, 1998.
13. Bazant, Z.P. and Bhat, P.D., Prediction of Hysteresis of Reinforced Concrete Members, ASCE Journal of the Structural Division, V. 103, No. ST1, 153-167,1977.
14. Bertero, V., Seismic Behavior of Reinforced Concrete Wall Structural Systems, Proceedings of the 7th WCEE, Istanbul, Vol. 6, 323-330, 1980
15. Blume, J.A., Newmark, N.M. and Corning, L.H., Design of Multi-story Reinforced Concrete Buildings for Earthquake Motions, Portland Cement Association, Chapter 5, Chicago,1961.
16. Bresler , B. and Bertero, V., Behavior of Reinforced Concrete Under Repeated Load, ASCE Journal of the Structural Division, V. 94, No. ST6, 1567- 1590, 1968.
17. Burns, N.H. and Siess, C.P., Repeated and Reversed Loading in Reinforced Concrete, ASCE Journal of the Structural Division, V. 92, No. ST5, 65-78, 1966.
18. Cardenas, A.E., Hanson, J.M., Corley, W.G., Hognestad, E., Design Provisions for Shear Walls, Journal of the American Concrete Institute, Vol.70, No:3, 221-230, March 1973.
19. Chang, G.A. and Mander, J.B., Seismic Energy Fatigue Damage Analysis of Bridge Columns: Part I -Evaluation of seismic capacity , Technical Report, NCEER-94-0006, State University of New York at Buffalo, 1994.
20. Considere, A., Experimental Researches on Reinforced Concrete, Translated and Arranged by Leon S. Moisseiff, McGraw Pub. Co.,New York, 1903.
21. Dilger,W.H., Koch, R.and Kowalczyk,R.,Ductility of Plain and Confined Concrete Under Different Strain Rates, Journal of the American Concrete Institute,V.81,73-81,1984
22. Endo, T., Adachi, H., Nakanishi, M., Force-Deformation Hysteresis Curves of Reinforced Concrete Shear Walls, Proceedings of the 7th WCEE, Istanbul, Vol. 6, pp 315-322, 1980

23. Ersoy, U., Betonarme, Evrim Basım- Yayım-Dağıtım, İstanbul, 1987
24. Ersoy,U. Özcebe,G. Betonarme, Evrim Yayınevi, İstanbul, 2001
25. Ersoy, U., Özcebe,G., Tankut, T., Önüretimli Yapı Hasarları, Marmara ve Düzce Depremleri Mühendislik Raporu, Ankara, 105-115 s.,2000.
26. Farrar, C., Baker, W., Damping in Low Apect Ratio, Reinforced Concrete Shear Walls, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.24, 439-455, pp 439-454, 1993
27. Ferguson, P.M., Breen J.E., Jirsa, J.O., Reinforced Concrete Fundamentals, John Wiley & Sons, USA,1988
28. Goodsir, W.J., The Design of Coupled Frame Wall Structures for Seismic Actions, Research Report 85-8, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand,383 p., 1985.
29. Gülkan, P., Yapılardaki Hasar Sebepleri ve Sonuçları, Marmara ve Düzce Depremleri Mühendislik Raporu, Ankara, 83-105 s.,2000.
30. Hognestad, E., A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members, University of Illinois Engineering Experimental Station, Bulletin Series No. 399, Urbana,1951.
31. Hognestad, E., Hanson, N.W. and McHenry, D., Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design, Journal of the American Concrete Institute, V. 52, No. 4, 455-480, 1955.
32. İlki, A., Betonarme Elemanların Yön Değiştiren Tekrarlı Yükler Altında Doğrusal Olmayan Davranışı, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000.
33. Johnston, C.D., Strength and Deformation of Concrete in Uniaxial Tension and Compression, Magazine of Concrete Research, V. 22, No. 70, 5-16, 1970.
34. Karsan, D. and Jirsa, J.O., Behavior of Concrete Under Compressive Loadings, ASCE Journal of the Structural Division, V. 95, No. ST12, 2543.: 2563, 1969.
35. Kato, B., Akiyama, .H.and Yamanouchi, Y., Predictable Properties of Material Under Incremental Cyclic Loading, IABSE Reports, V.13, 119-124, 1973.
36. Kent, D.C. and Park, R., Flexural Members With Confined Concrete, ASCE Journal of the Structural Division, V. 91, No. ST7, 1969-1990, 1971.



37. Kent, D.C. and Park, R., Cyclic Load Behavior of Reinforcing Steel, *Strain*, Vol. 9, No.3, pp 98-103, 1973
38. Leslie, P.D. and Park R., Ductility of Reinforced Concrete Bridge Piers, ME. Report, University of Canterbury, New Zealand, 1974.
39. Mander, J.B., Seismic Design of Bridge Piers, A Thesis Submitted In Partial Fulfilment Of The Requirements For The Degree Of PhD, University of Canterbury , Christchurch, New Zealand, 1983.
40. Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R., Theoretical stress-strain model of confined concrete, *ASCE Journal of the Structural Division*, V. 114, No. 8, 1804-1826, 1988a.
41. Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R., Observed Stress-Strain Behavior Of Confined Concrete, *ASCE Journal of the Structural Division*, V. 114, No. 8, 1827-1849, 1988b.
42. Menegotto, M. and Pinto, P.E., Method Of Analysis For Cyclically Loaded R.C. Plane Frames Including Changes In Geometry And Non-Elastic Behavior Of Elements Under Combined Normal Force And Bending, *IABSE Reports*, V. 13, 15-22, 1973.
43. Mugurama, H., Watanabe, F., Iwashimizu, T. and Mitsueda, R., Ductility Improvement Of High Strength Concrete By Lateral Confinement, - *Transactions Of Japan Concrete Institute*, V .5, 403-410, 1983.
44. Murayama, Y., Furuichi, K., Sivasubramaniyam, S. and Mahin, S.A., Effect Of Steel Models On M- $\phi$  Analysis Of Reinforced Concrete Columns. *Transactions Of Japan Concrete Institute*, V. 16, 225-232, 1994.
45. Park, R., Kent, D.C. and Sampson, R.A., Reinforced Concrete Members With Cyclic Loading, *ASCE Journal of the Structural Division*, V. 98, No. ST7, 1341-1359, 1972.
46. Park, R., and Paulay,T., *Reinforced Concrete Structures*, A Wiley Interscience Publication, Newyork, 1975.
47. Paulay, T., Seismic Displacement Compatibility in Mixed Structural Systems, Uğur Ersoy Symposium, 275-292, METU-Ankara, 1999
48. Paulay, T. , *The Design Of Ductile Reinforced Concrete Structural Walls for Earthquake Resistance*, *Earthquake Spectra*, Vol.2, No.4, pp 738-824, 1986

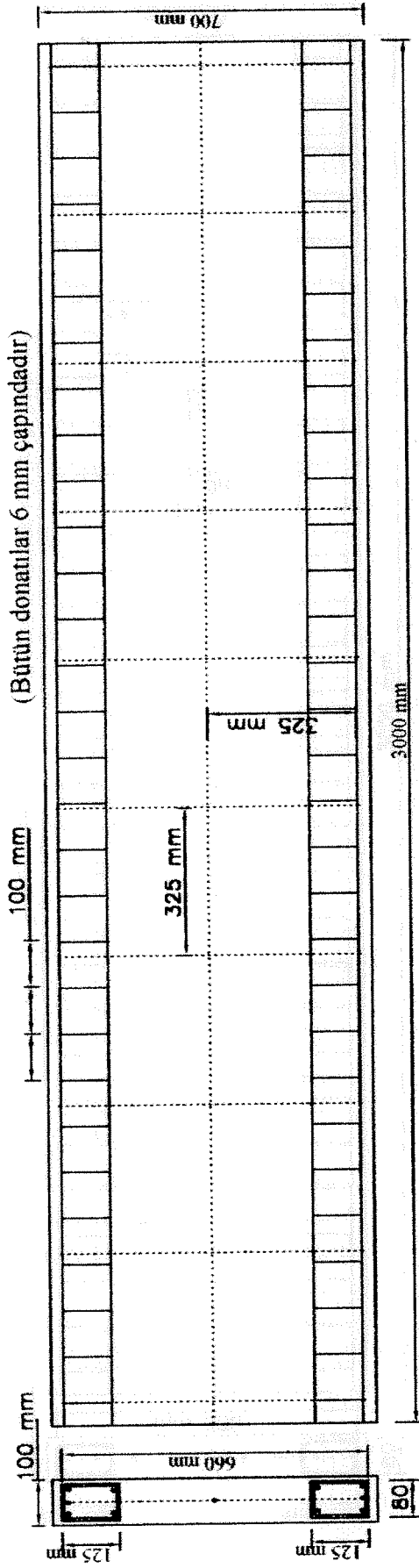
49. Paulay, T. and Priestley, M.J.N, Sismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, John Wiley and Sons Inc., USA, 1992.
50. Peterson, H. and Popov, E.P., Constitutive Relations For Generalized Loadings, ASCE Journal of Engineering Mechanics, 1977
51. Pilakoutas,K.,and Elnashai, A., Cyclic Behavior of Reinforced Concrete Cantilever Walls, Part 1: Experimental Results, ACI Structural Journal, Title No. 92-S25, pp 271-281, 1995.
52. Popovics, S., A Numerical Approach To The Complete Stress-Strain Curve Of Concrete, Cement and Concrete Research, 3(5), 583-599, 1973.
53. Razvi, S. R. and Saatcioglu, M., Strength and Deformability Of Confined High Strength Concrete Columns, ACI Structural Journal, V: 91, No. 6, 678- 687, 1994.
54. Richart, F.E., Brandtzaeg, A. and Brown, R.L., A Study Of Failure Of Concrete Under Combined Compressive Stresses, Engineering Experiment Station Bulletin, No. 185, University of Illinois, Urbana, 1928.
55. Richart, F.E., Brandtzaeg, A. and Brown, R.L., The Failure Of Plain and Spirally Reinforced Concrete in Compression, Engineering Experiment Station Bulletin, No. 190, University of Illinois, Urbana, 1929.
56. Roufaiel, S.L. and Meyer, C., Analytical Modeling Of Hysteretic Behavior of R/C Frames, ASCE Journal of Structural Engineering, V 01. 113, N 0. 3, 429-444, 1987.
57. Roy, H.E.H. and Sozen M.A., Ductility of Concrete, Flexural Mechanics of Reinforced Concrete, SP12, ACI/ASCE, pp 213-224, 1964.
58. Saatcioglu, M., Takayanagi, T. And Derecho, A.T., Dynamic Response of Reinforced Concrete Wall Systems, Proceedings of the 7th WCEE, Istanbul, Vol.5, pp 49-56, 1980
59. Saatcioglu, M., Modelling Hysteretic Force-Deformation Relationships For Reinforced Concrete Elements. SP 127-5, 153-198, American Concrete Institute, Detroit, 1991.
60. Saatcioglu, M. and Razvi, S.R., Strength and Ductility of Confined Concrete, ASCE Journal of the Structural Division, V .118, No. 6, 1590-1607, 1992 .

61. Saatcioglu, M., Salamat, A.H. and Razvi, S.R., Confined Columns Under Eccentric Loading, ASCE Journal of Structural Engineering, V .121, No.II, 1547-1556, 1995.
62. Sargin, M., Ghosh, K. and Handa, V.K., Effects Of Lateral Reinforcement , Upon The Strength and Deformation Properties Of Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol. 23, No. 75-76, 99-110, 1971.
63. Sato, H., Fukumoto, Y., Assa, B.B. and Nishiyama, M., Stress-Strain Characteristics of Confined Concrete Under Flexural Compression, Transactions of Japan Concrete Institute, V. 16, 303-310, 1994.
64. Scott, B.D., Park, R. and Priestley, M.J.N., Stress-Strain Behavior Of Concrete Confined By Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates, Journal of the American Concrete Institute, V. 79, 13-27, 1982.
65. Sezen, H., Elwood., K.J., Whittaker, A.S., Mosalam, K.M., Wallace, J.W., Stanton, J.F., Structural Engineering Reconnaissance of the August 17,1999 Earthquake: Kocaeli (Izmit), Turkey, PEER Report 2000/9, University of California, Berkeley, December 2000
66. Sinha, B.P., Gerstle, K.H. and Tulin, L.G., Stress-Strain Relation for Concrete Under Cyclic Loading, ACI Structural Journal, Vol.61, No.2, 195-211, 1964
67. Sheikh, S.A. and Uzumeri, S.M., Strength and Ductility Of Tied Concrete Columns, ASCE Journal of the Structural Division, V .1 06, N 0. STS, 1079-1102, 1980.
68. Sheikh, S.A., A Comparative Study Of Confinement Models, Journal of the American Concrete Institute, V. 79, No. 3, 296-305, 1982.
69. Sözen, M., Ramirez J.A., Stiffness of Reinforced Concrete Members, Lecture Notes of CE 676: Behavior of Reinforced Concrete Members, "<http://bridge.ecn.purdue.edu/~ce676/>", Purdue University, School of Civil Engineering, West Lafayette, USA, 2001.
70. Stanton, J.F. and McNiven, H.D., The Development of a Mathematical Model to Predict the Flexural Response of Reinforced Concrete Beams to Cyclic Loadings, EERC, Report No.79/02, 1979.

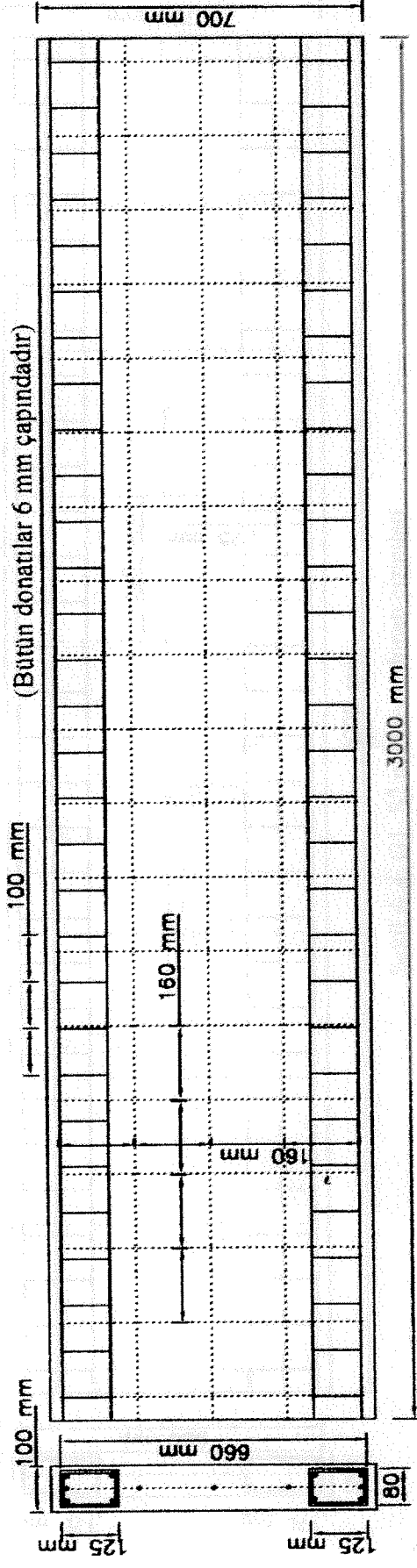
71. Takeda, T., Sozen, M.A. and Nielsen N.N., Reinforced Concrete Response To Simulated Earthquakes, ASCE Journal of the Structural Division, V .96, No. ST12, 2557-2573, 1970.
72. Taucer , F.F., Spacone, E. and Filippou, F.C., A Fiber Beam-Column Element For Seismic Response Analysis Of Reinforced Concrete Structures, Report No. UCBIERC-91/17, Earthquake Engineering Research Center, California, Berkeley,1991.
73. Thompson, K.J., Park,R., Stress-Strain Model for Grade 275 Reinforcing Steel with Cyclic Loading, Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, vol.11, No.2, 1978.
74. TS-500, Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1981.
75. Tulin, L.G. and Gerstle, K.H., Equation For The Stress-Strain Curve Of Concrete (Discussion), Journal of the American Concrete Institute, V . 61, No. 9, 1236-1238, 1964.
76. Vallenias, J., Bertero, V.V.and Popov, E.P., Concrete Confined By Rectangular Hoops Subjected to Axial Loads, Report No:UBCIEERC-77113, University of California, Berkeley, 1977.
77. Wallace, J.W., New Methodology For Seismic Design of RC Shear Walls, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.120, No.3, pp 863-884, 1994
78. Wallace, J.W., Seismic Design of RC Shear Walls, Part I: New Code Format, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.121, No.1, pp 75-87, 1995
79. Wood, S.L., Observed Behavior of Slender Reinforced Concrete Walls Subjected to Cyclic Loading, in Earthquake -Resistant Concrete Structures Inelastic Response and Design, pp. 453-478, American Concrete Institute,1991
80. Yamada, M., Kawamura, H. and Kondoh, K., Elasto-Plastic Cyclic Horizontal Sway Behaviours of Reinforced Concrete Unit Rigid Frames Subjected To Constant Vertical Loads, IABSE Reports, V .13, 199-204,1973.

**EK - A**

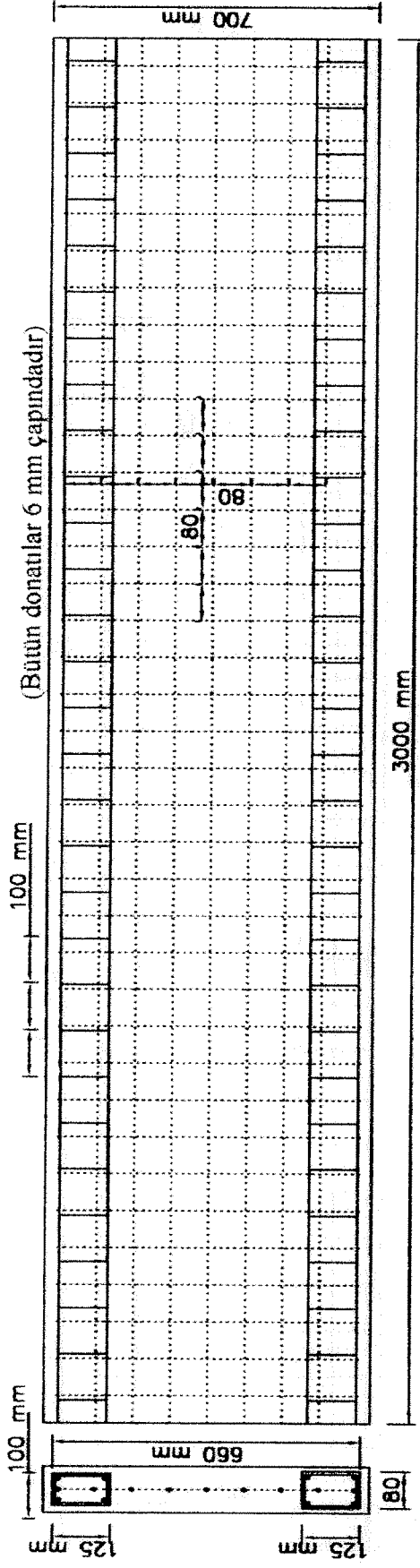
**NUMUNELERİN DONATI ÇİZİMLERİ VE  
FOTOĞRAFLARI**



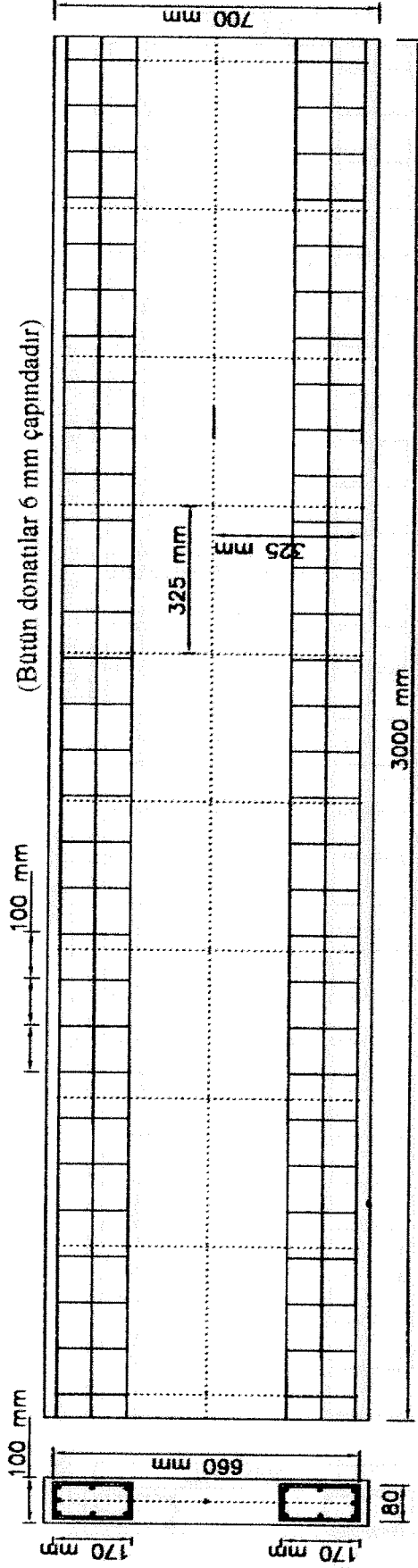
Şekil A.1: G1\_S1 numunesi donatı çizimleri



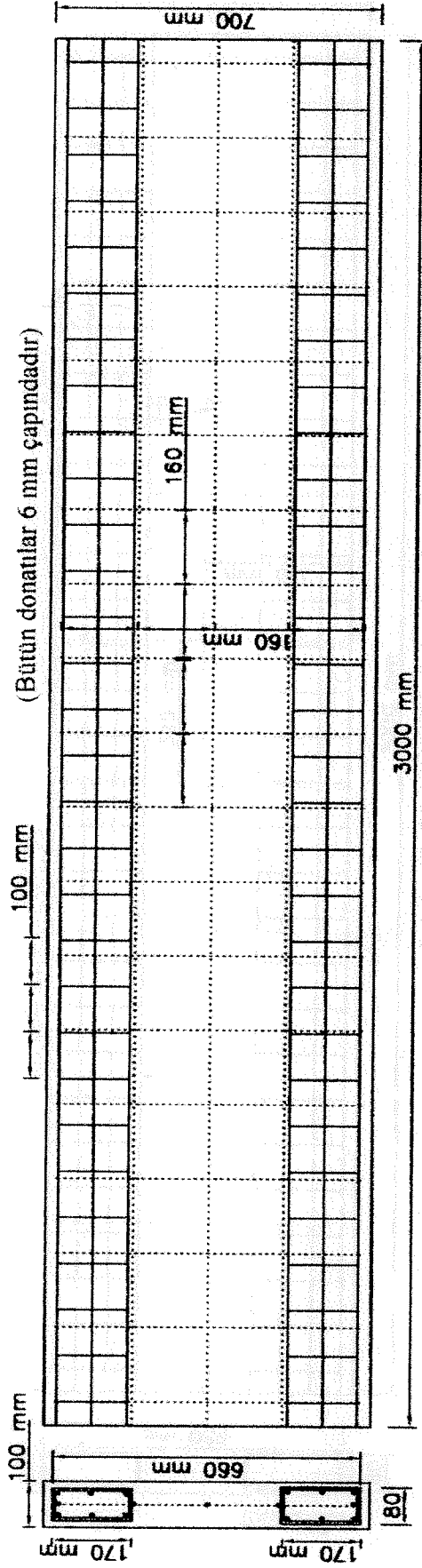
Şekil A.2: G2\_S1 numunesi donatı çizimleri



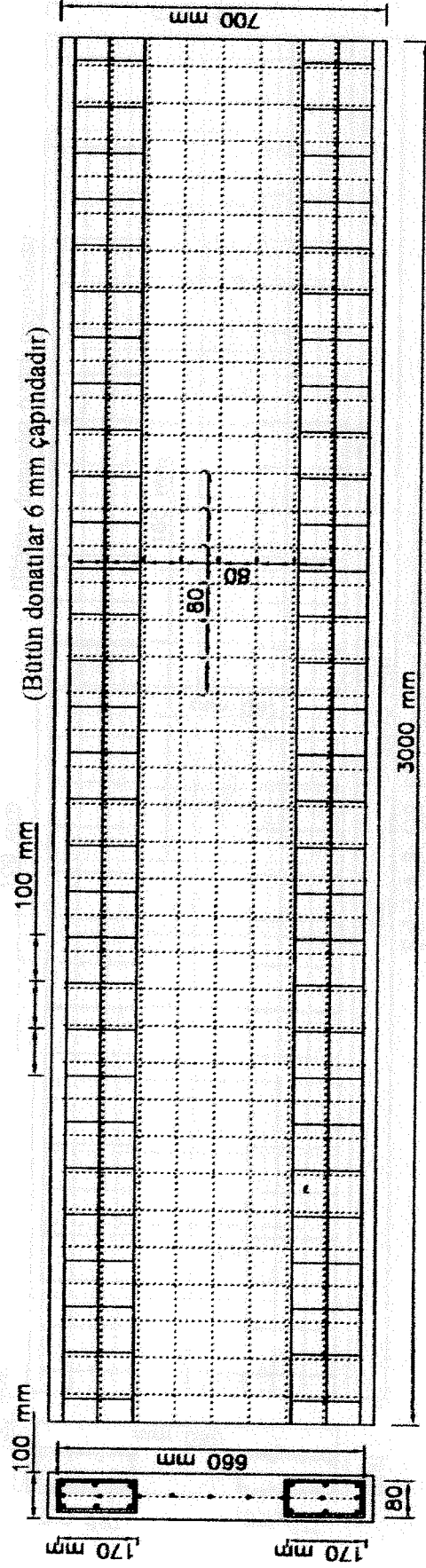
Şekil A.3: G3\_S1 numunesi donatı çizimleri



Şekil A.4: G1\_S2 numunesi donatı çizimleri

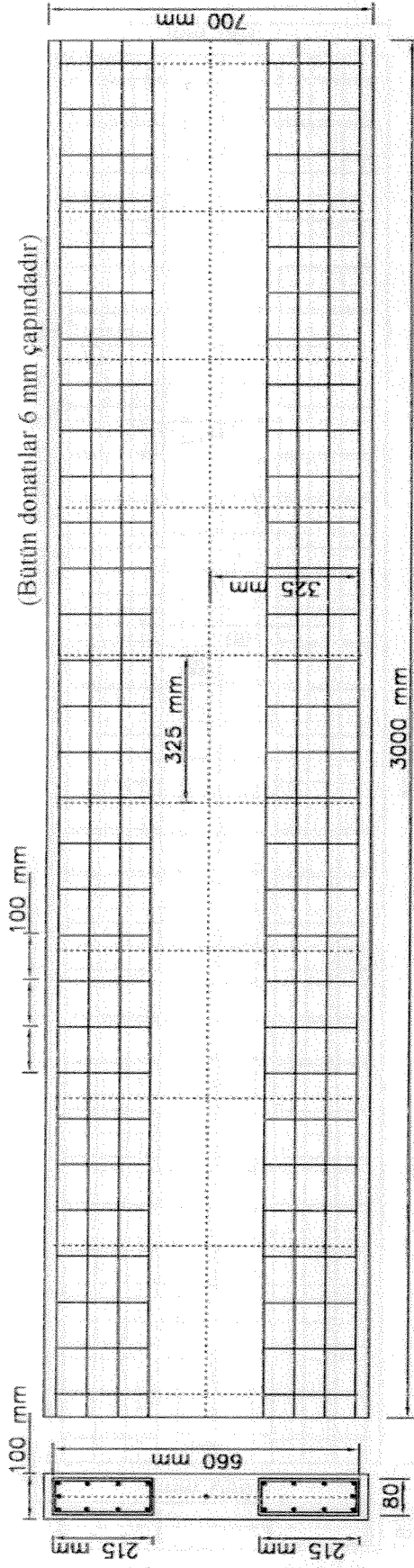


Şekil A.5: G2\_S2 numunesi donatı çizimleri

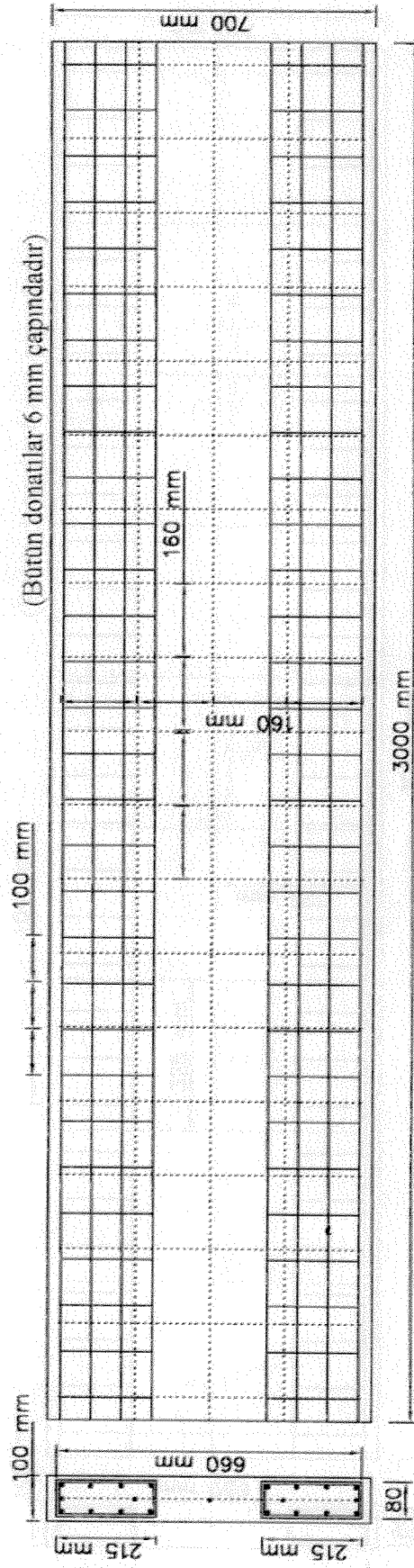


Şekil A.6: G3\_S2 numunesi donatı çizimleri

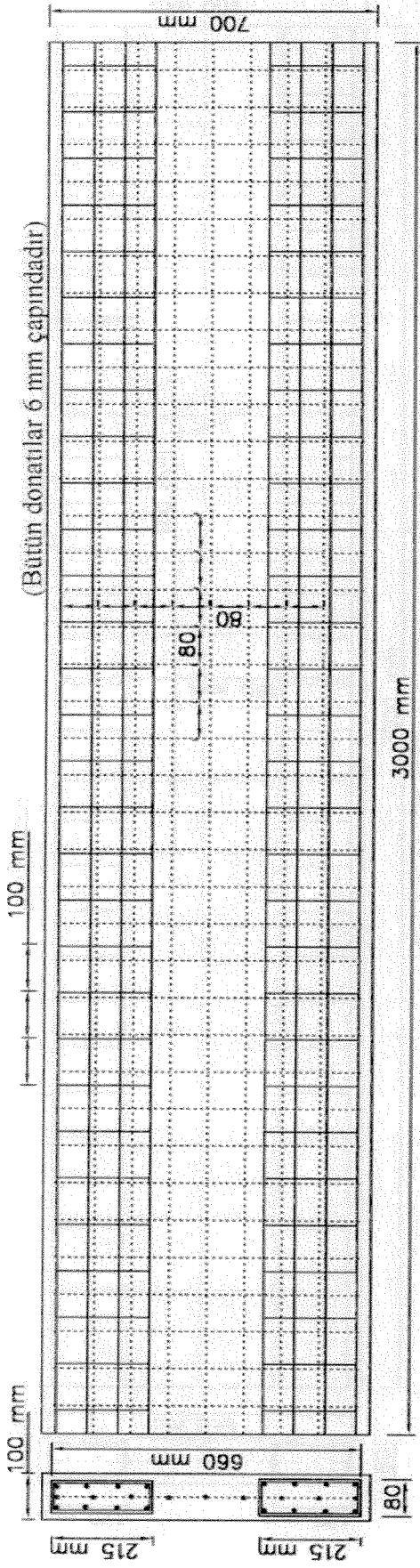




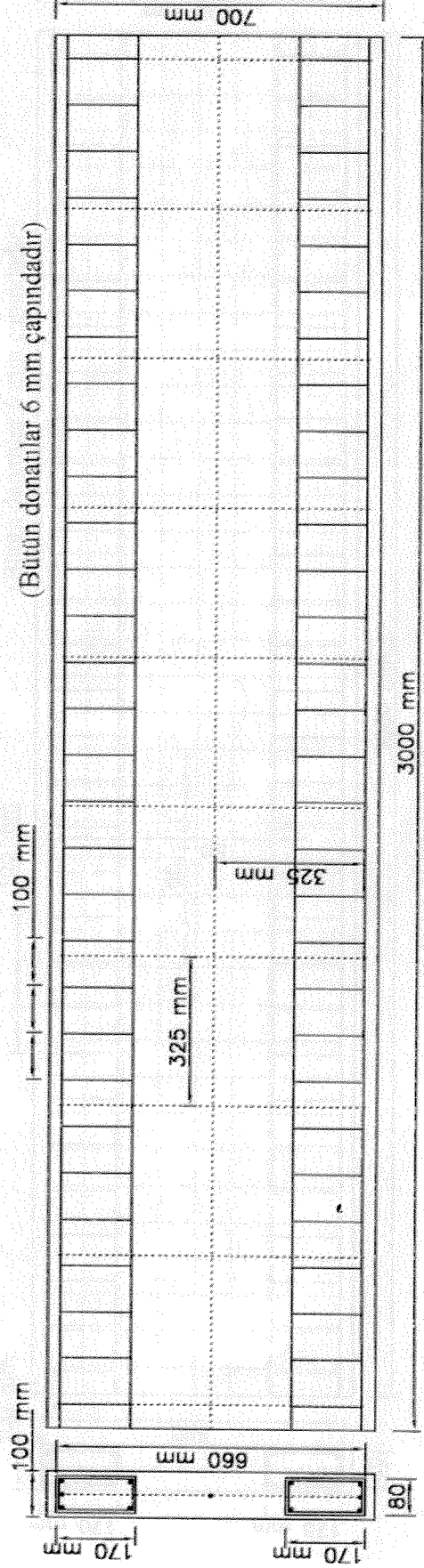
Şekil A.7: G1\_S3 numunesi donatı çizimleri



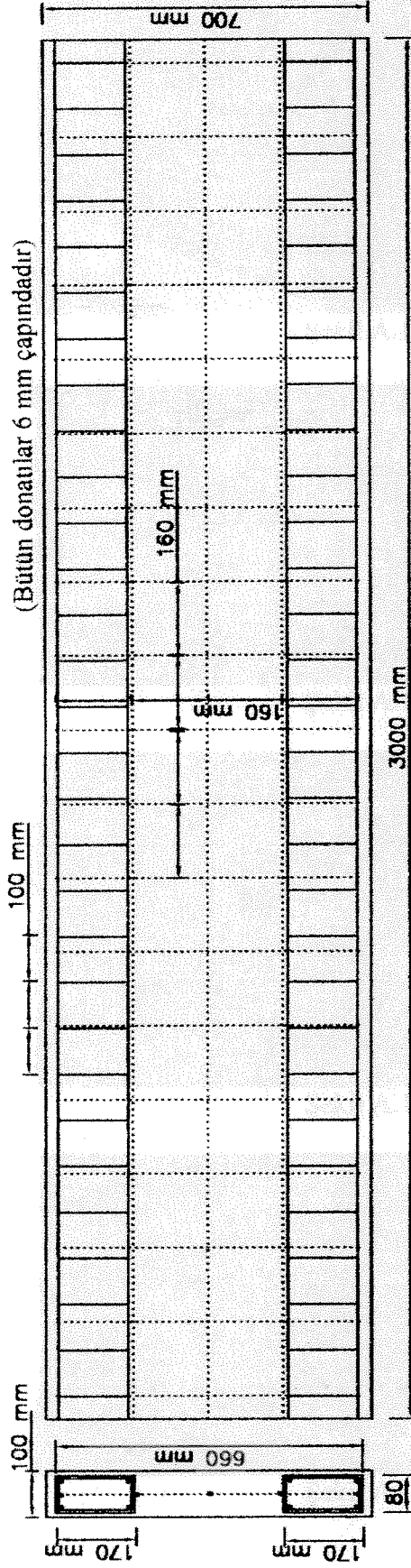
Şekil A.8: G2\_S3 numunesi donatı çizimleri



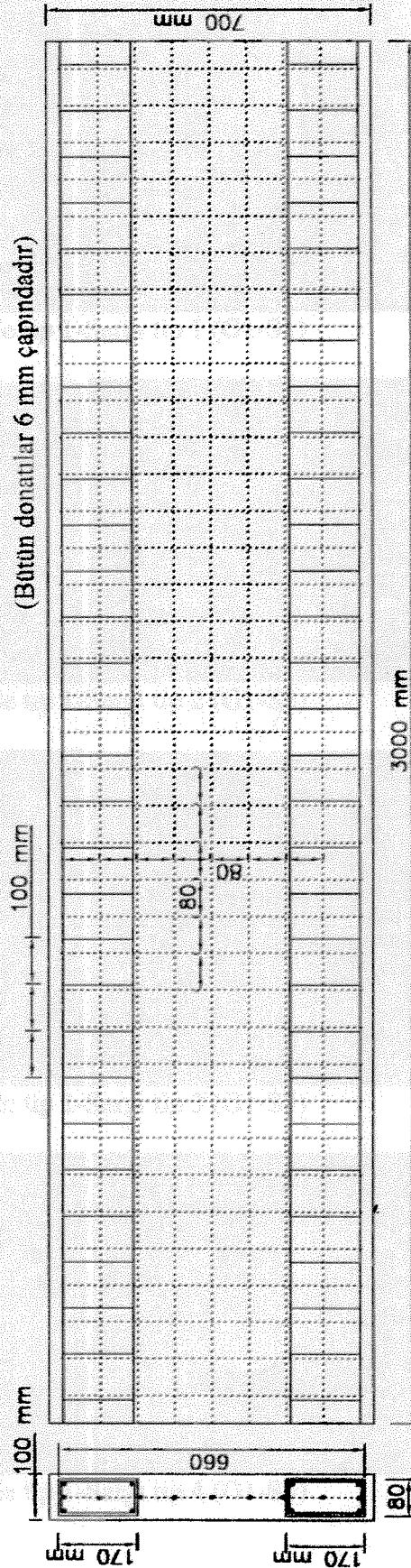
Şekil A.9: G3 S3 numunesi donatı çizimleri



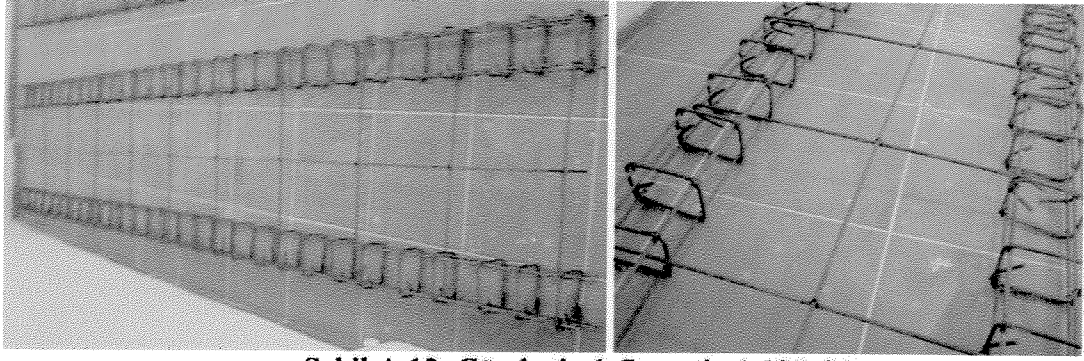
Şekil A.10: G1 S4 numunesi donatı çizimleri



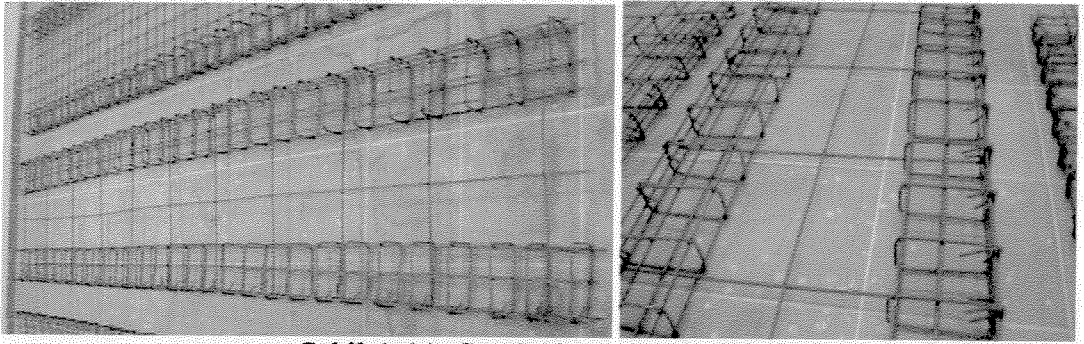
Şekil A.11: G2\_S4 numunesi donatı çizimleri



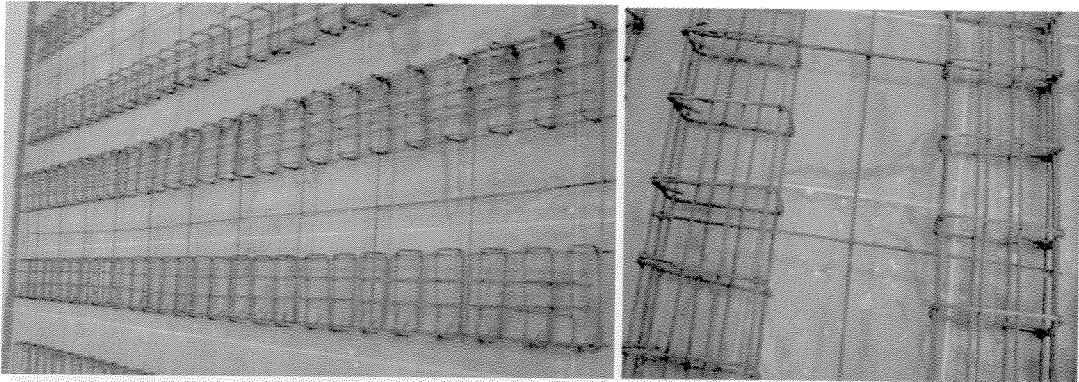
Şekil A.12: G3\_S4 numunesi donatı çizimleri



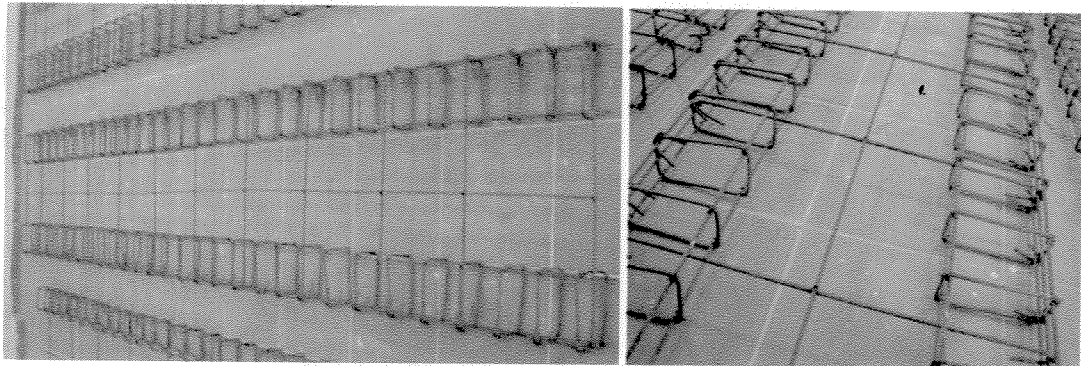
**Şekil A.13: Gövde tip 1-Sargı tip 1 (G1-S1)**



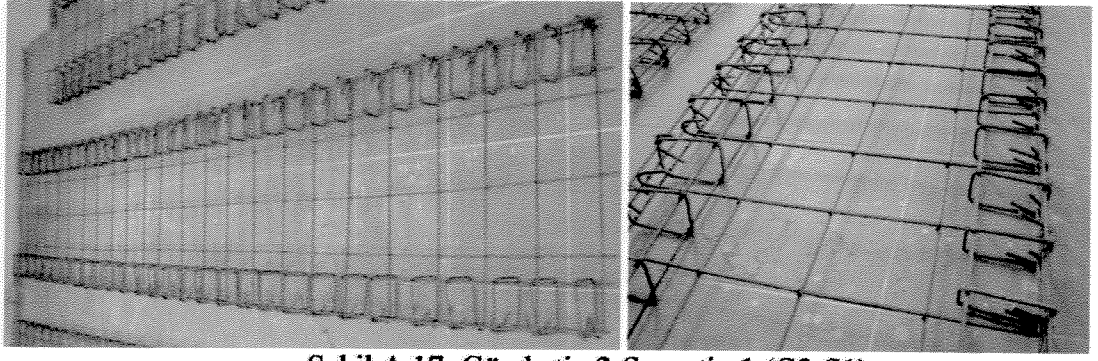
**Şekil A.14: Gövde tip 1-Sargı tip 2 (G1-S2)**



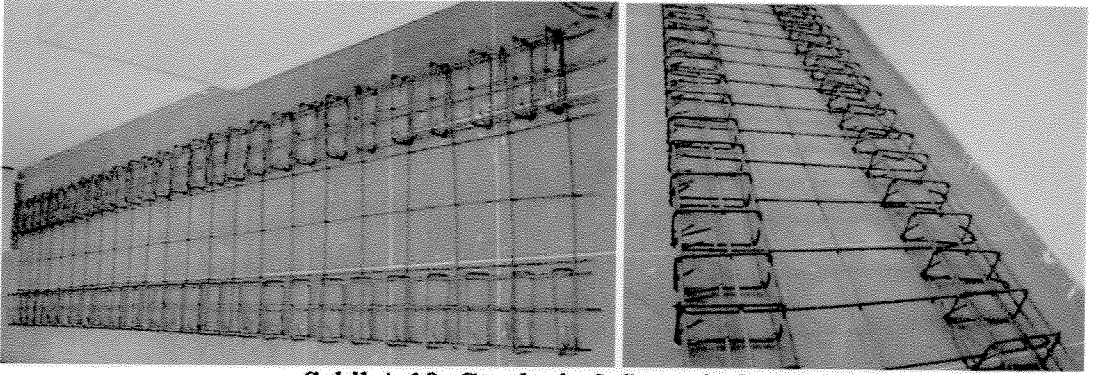
**Şekil A.15: Gövde tip 1-Sargı tip 3 (G1-S3)**



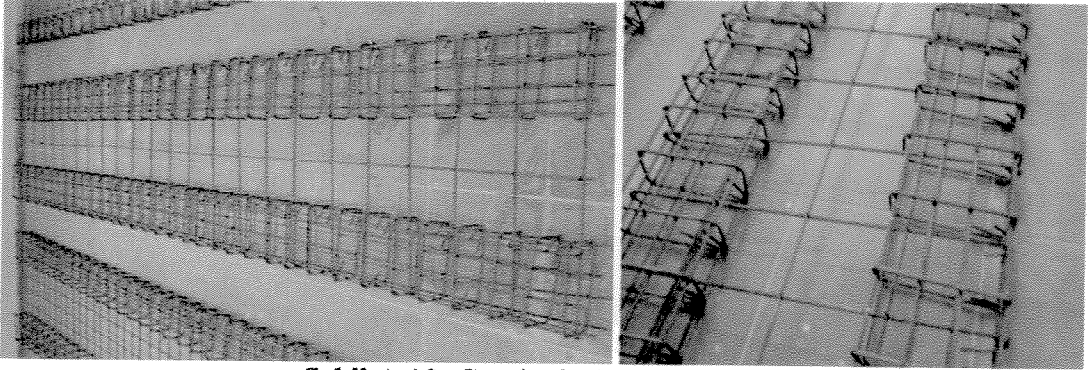
**Şekil A.16: Gövde tip 1-Sargı tip 4 (G1-S4)**



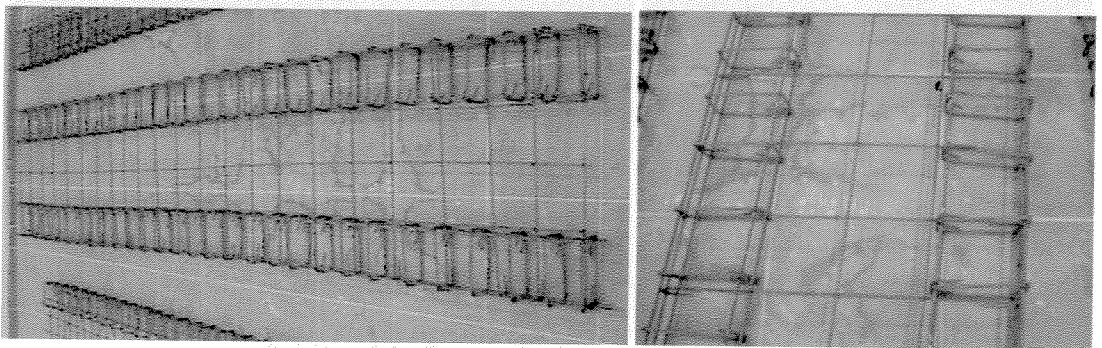
Şekil A.17: Gövde tip 2-Sargı tip 1 (G2-S1)



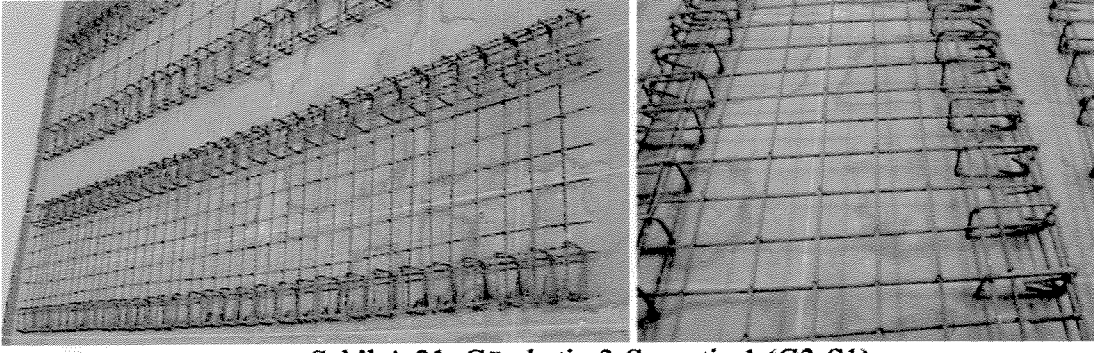
Şekil A.18: Gövde tip 2-Sargı tip 2 (G2-S2)



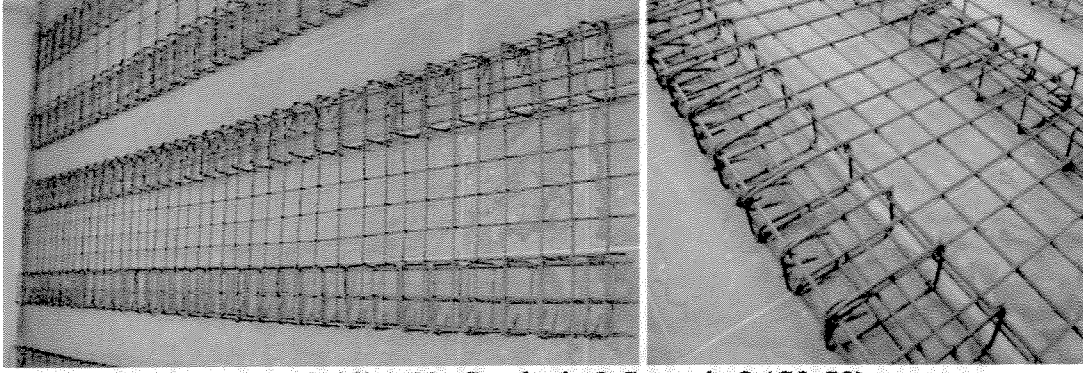
Şekil A.19: Gövde tip 2-Sargı tip 3 (G2-S3)



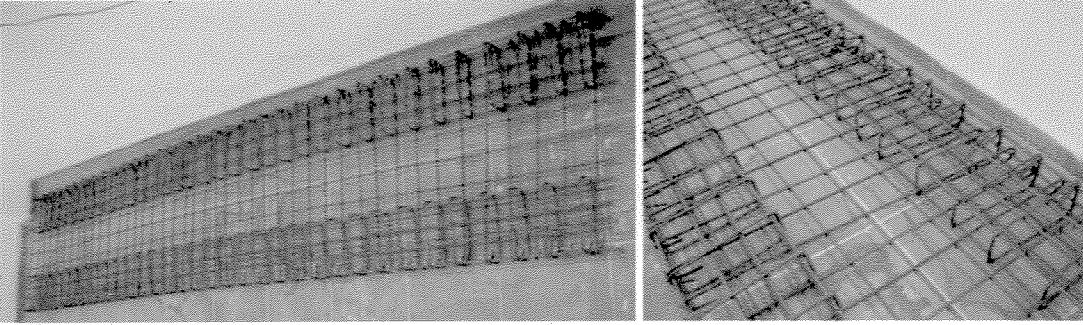
Şekil A.20: Gövde tip 2-Sargı tip 4 (G2-S4)



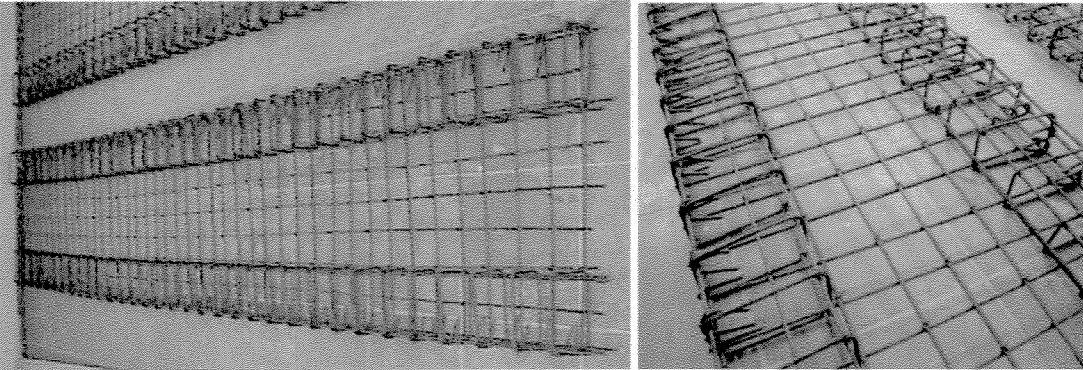
Şekil A.21: Gövde tip 3-Sargı tip 1 (G3-S1)



Şekil A.22: Gövde tip 3-Sargı tip 2 (G3-S2)



Şekil A.23: Gövde tip 3-Sargı tip 3 (G3-S3)



Şekil A.24: Gövde tip 3-Sargı tip 4 (G3-S4)

**EK - B**

**DONATI ÇELİĞİ ÇEKME DENEYLERİ**

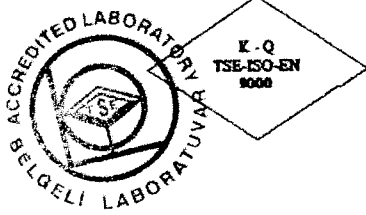
1442

T.C.  
SANA YI VE TİCARET BAKANLIĞI  
**KOSGEB**  
KÜÇÜK VE ORTA ÖLÇEKLİ SANA YI GELİŞTİRME MERKEZİ  
**DENİZLİ KÜGEM**  
KÜÇÜK İŞLETMELER GELİŞTİRME MERKEZİ  
SÖMER MAH. İŞ VE İŞÇİ BULMA KURUMU GİRİŞ KATI NO:38, DENİZLİ  
TEL: (0 258) 268 37 51 - 251 42 88 - 268 72 99 FAX: (258) 268 61 24  
E - mail: denizli.kosgob@service.caksmst.com.tr

<b>FİRMA ADI</b> : Ş.MURAT ŞENEL	
<b>FİRMA ADRESİ</b> : Pamukkale Üniversitesi İnşaat Fakültesi DENİZLİ	
<b>TALEP TARİHİ</b> : 11/05/2001	<b>RAPOR TARİHİ</b> : 11/05/20001
<b>NUMUNE NO</b> : 610 Ç	<b>RAPOR NO</b> : 786
<b>NUMUNE ADI</b> : Clekik Cubuk	<b>STANDART</b> : EN- 10 002

**ÇEKME TEST SONUÇLARI**

<b>ALAN</b>	: 28.30 mm <sup>2</sup>
<b>ÇAP</b>	: 6.0 mm
<b>MAKSİMUM YÜK</b>	(Fm) : 13.8 kN
<b>ÇEKME DAYANIMI</b>	(Rm) : 489 N/mm <sup>2</sup>
<b>ÜST AKMA STRES DEĞERİ</b>	(ReH) : 380 N/mm <sup>2</sup>
<b>ALT AKMA STRES DEĞERİ</b>	(ReL) : 365 N/mm <sup>2</sup>
<b>TOP. UZ. DEN. GERİLME D.</b>	(Rt % 5) : 376 N/mm <sup>2</sup>
<b>AKMA NOKTASI UZAMA DEĞERİ</b>	(Ae) : 0.5 %
<b>5 60 UZAMA DEĞERİ</b>	(A 5.65) : %
<b>TOPLAM BOY UZAMASI</b>	(Ae) : 20.0 %
<b>KESİT DARALMASI</b>	(Z) : %



**ANALİZİ YAPAN**  
**ENGİN TÜMER**

*Engin Tümer*

**ONAY**  
**NERMIN İLHAN**

*Nermin İlhan*

**AÇIKLAMALAR**

- 1- Bu Analiz 60 Tonluk "DARTEC" marka test cihazında yapılmıştır.
  - 2- KOSGEB' ce " ASLININ AYNESİDİR " Onayını taşımayan kopyalar geçersizdir.
  - 3- Analiz firma tarafından getirilen numuneden yapılmıştır.
  - 4- Bu rapor (BEŞ) sayfa olarak düzenlenmiştir.
- F-039-00

2/5

Şekil B.1: Çekme testi raporu (Örnek 1)



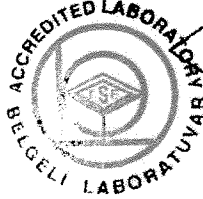
1445

T.C.  
SANA YI VE TICARET BAKANLIĞI  
KOSGEB  
KÜÇÜK VE ORTA ÖLÇEKLİ SANA YI GELİŞTİRME MERKEZİ  
DENİZLİ KÜGEM  
KÜÇÜK İŞLETİMLER GELİŞTİRME MERKEZİ  
SİMER MAH. İŞ VE İŞÇİ HULMA KURUMU GİRİŞ KATI NO:36, DENİZLİ  
TEL: 0 258 268 37 51 - 251 42 88 - 258 72 99 FAX: 0 258 268 61 24  
E- mail: denizli.kosgub@service.sakmat.com.tr

FİRMA ADI	: Ş.MURAT ŞENEL
FİRMA ADRESİ	: Pamukkale Üniversitesi İncirli Fakültesi DENİZLİ
TALEP TARİHİ: 11/05/2001	RAPOR TARİHİ: 11/05/2001
NUMUNE NO : 613 Ç	RAPOR NO: 789
NUMUNE ADI : Çelik Çubuk	STANDART: EN- 10 002

## ÇEKME TEST SONUÇLARI

ALAN	: 28.30 mm <sup>2</sup>
ÇAP	: 6.0 mm
MAKSİMUM YÜK	(Fm) : 13.4 kN
ÇEKME DAYANIMI	(Rm) : 475 N/mm <sup>2</sup>
ÜST AKMA STRES DEĞERİ	(ReH) : 369 N/mm <sup>2</sup>
ALT AKMA STRES DEĞERİ	(ReL) : 357 N/mm <sup>2</sup>
TOP. UZ. DEN. GERİLME D.	(Rt. % 5) : 352 N/mm <sup>2</sup>
AKMA NOKTASI UZAMA DEĞERİ	(Ae) : %
5 d0 UZAMA DEĞERİ	(A 5.65) : %
TOPLAM BOY UZAMASI	(Ae) : 20.5 %
KESİT DARALMASI	(Z) : 3.4 %



K-Q  
TSE-ISO-EN  
9000

ANALIZI YAPAN  
ENGİN TÜMER

*E.T.*

ONAY  
NERMİN İLHAN

*N.İ.*

5/5

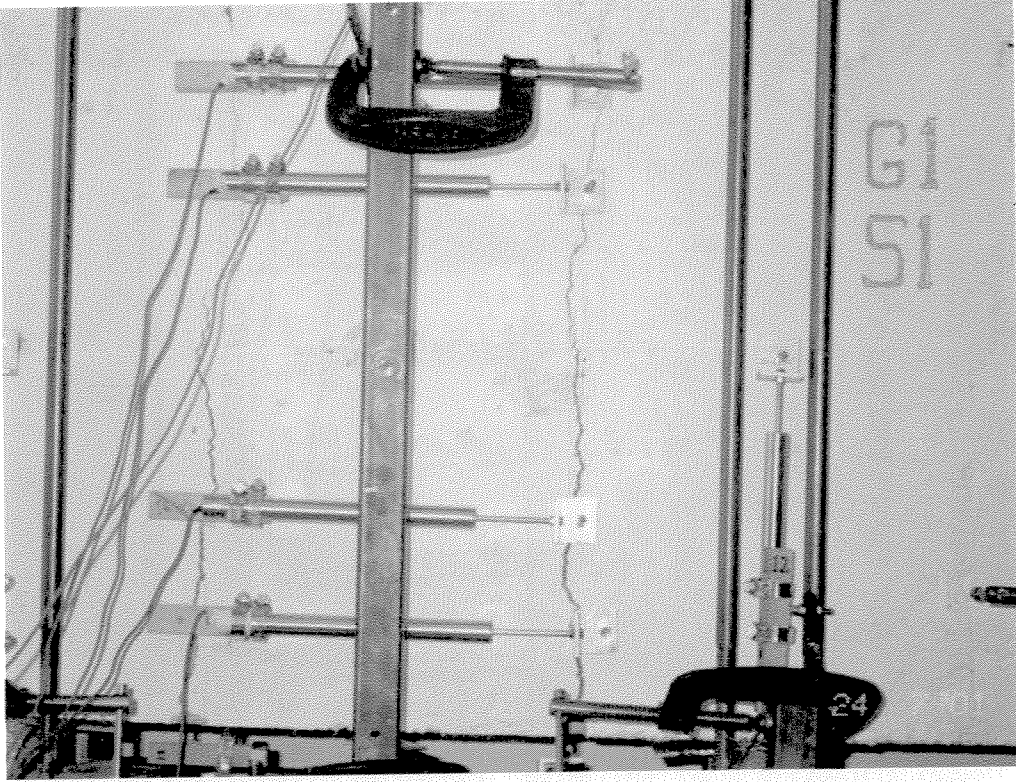
## AÇIKLAMALAR

- 1- Bu Analiz 60 Tonluk "DARTEC" marka test cihazında yapılmıştır.
  - 2- KOSGEB' ce " ASLININ AYNIYDUR " Onayını taşımayan kopyalar geçersizdir.
  - 3- Analiz firma tarafından getirilen numuneden yapılmıştır.
  - 4- Bu rapor (BEŞ) sayfa olarak düzenlenmiştir.
- F-039-00

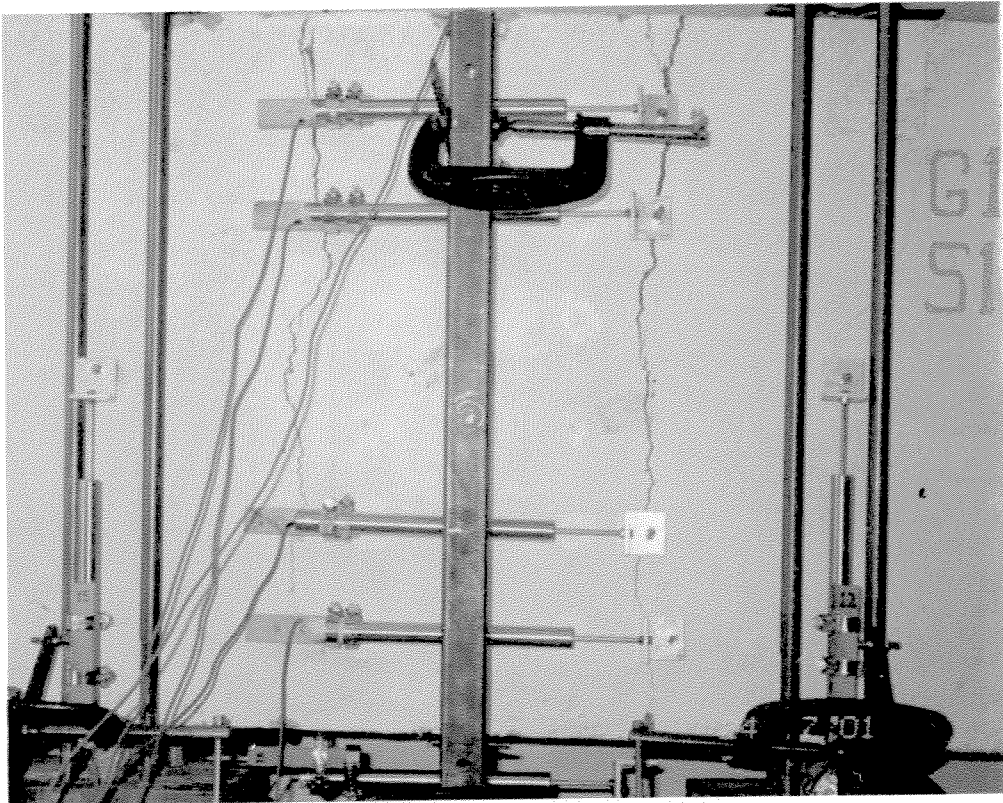
Şekil B.2: Çekme testi raporu (Örnek 2)

**EK – C**

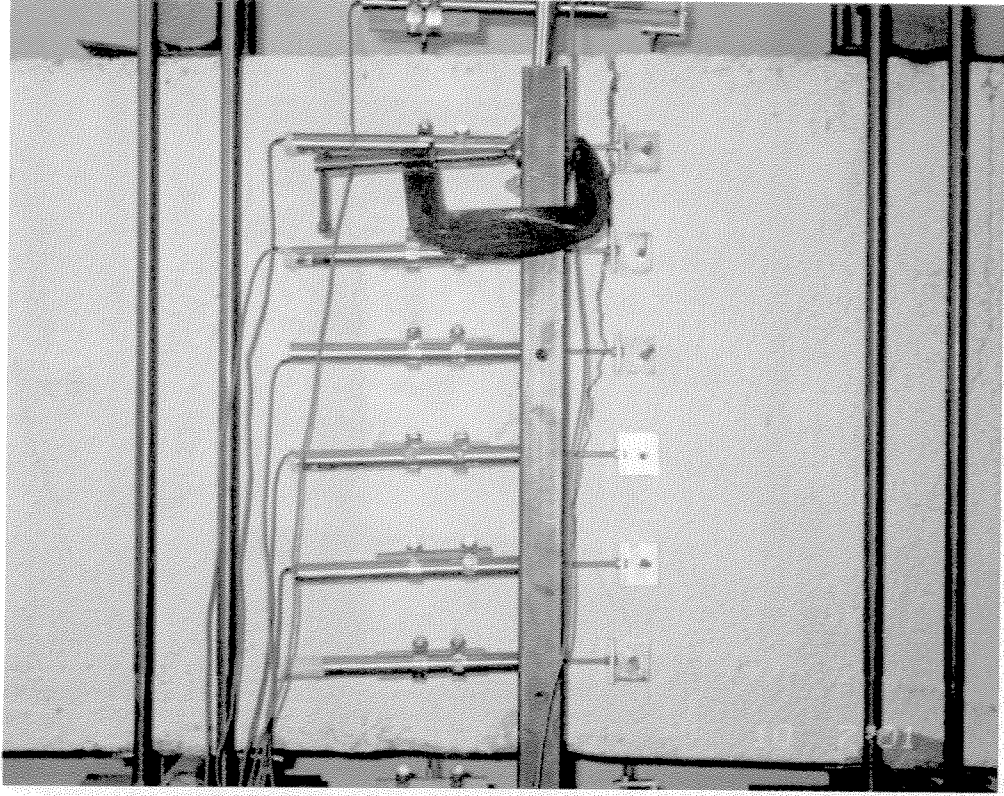
**DENEY FOTOĞRAFLARI**



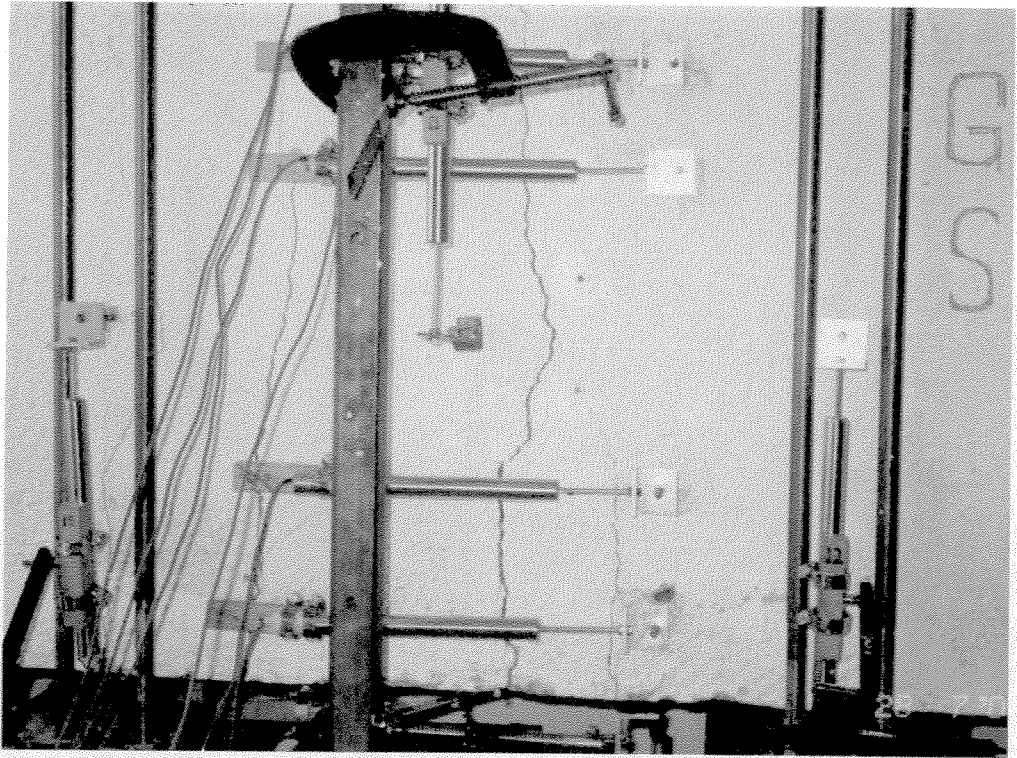
Şekil C.1: Numune G1\_S1 (itme)



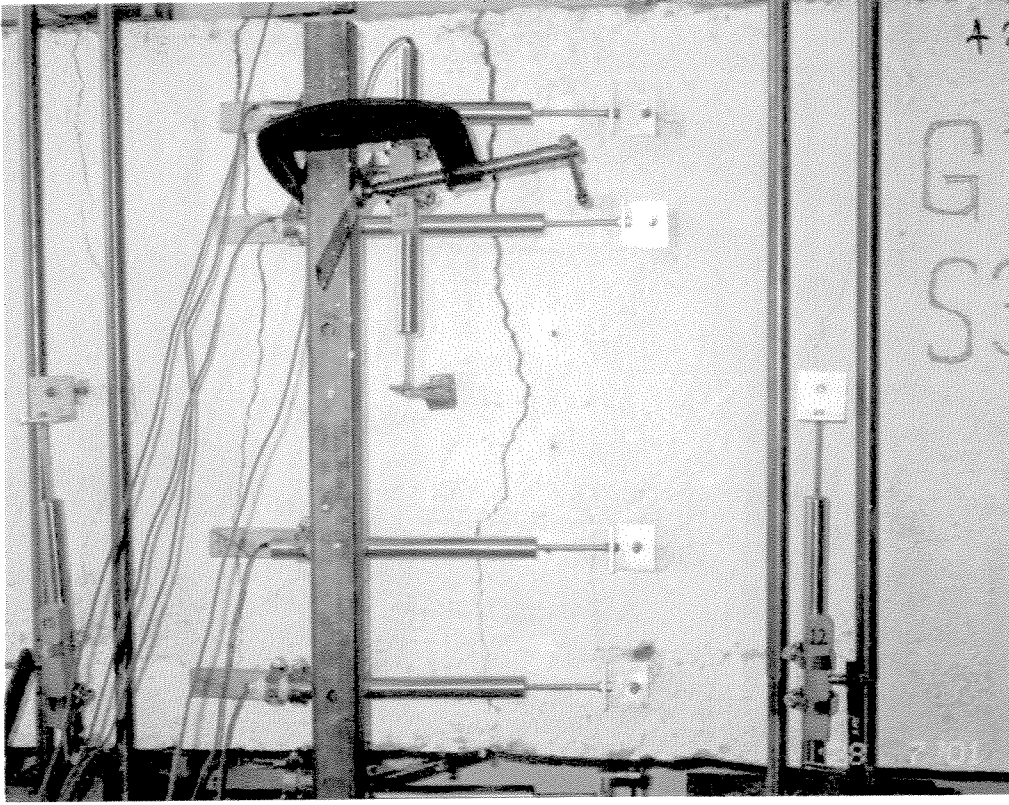
Şekil C.2: Numune G1\_S1 (çekme)



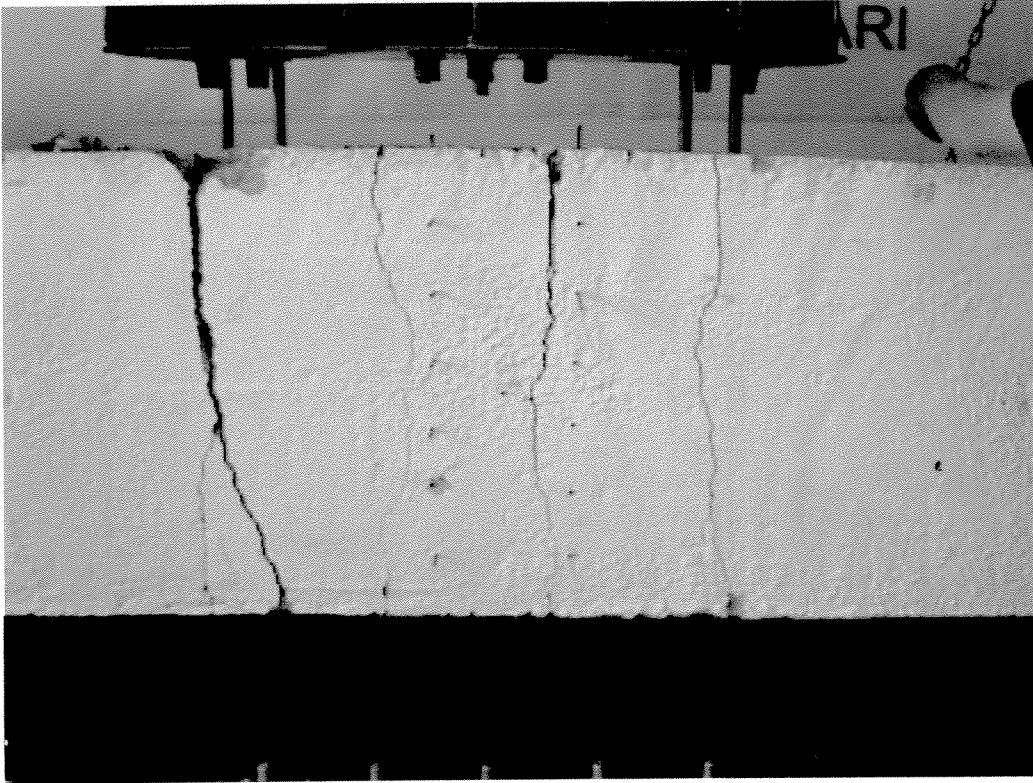
Şekil C.3: Numune G1\_S2 (çekme)



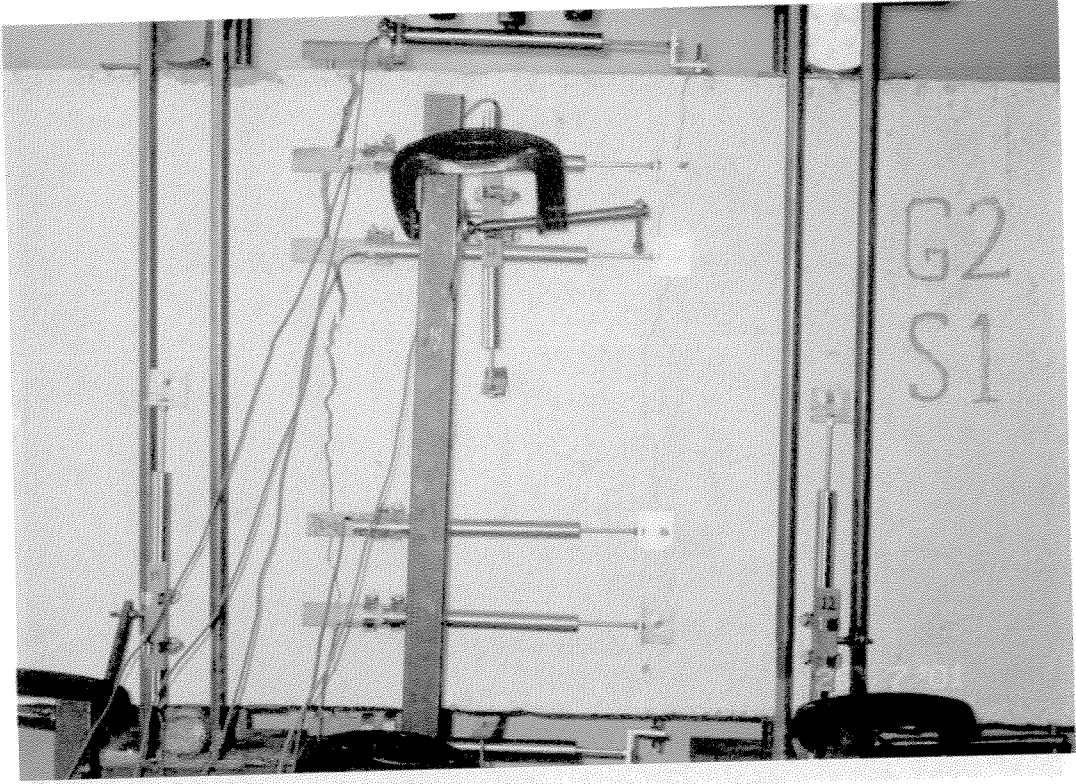
Şekil C.4: Numune G1\_S3 (itme)



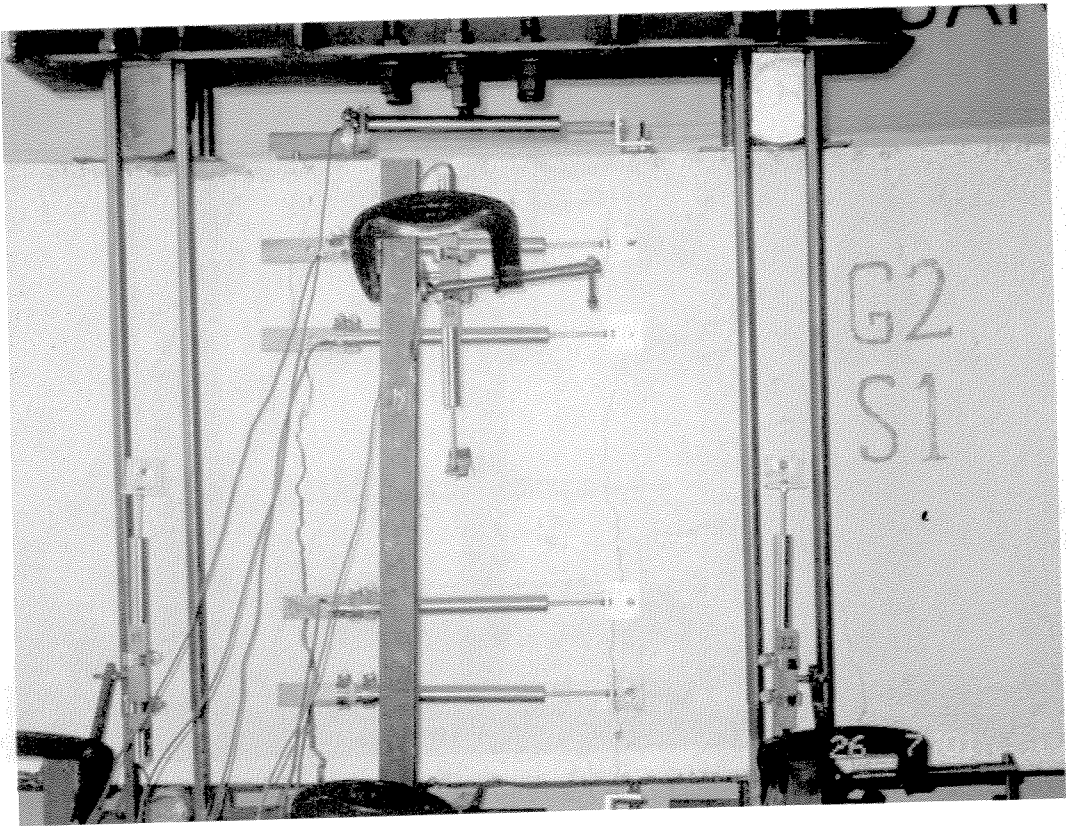
Şekil C.5: Numune G1\_S3 (çekme)



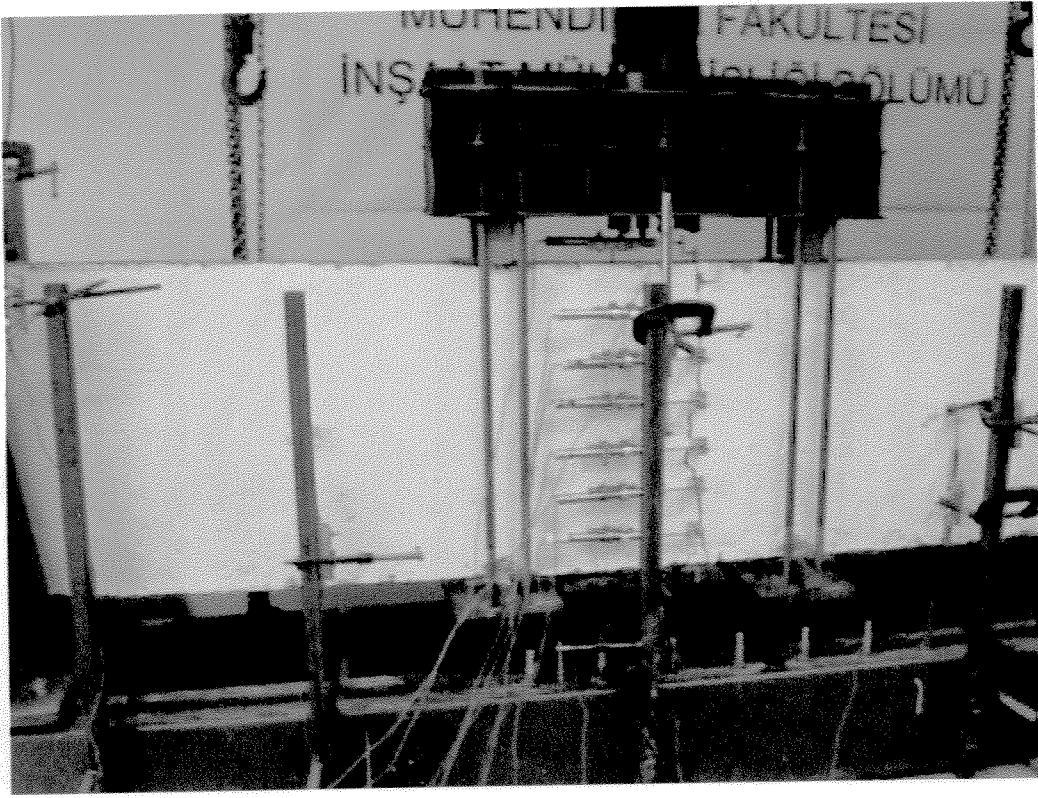
Şekil C.6: Numune G1\_S4 (deney sonu)



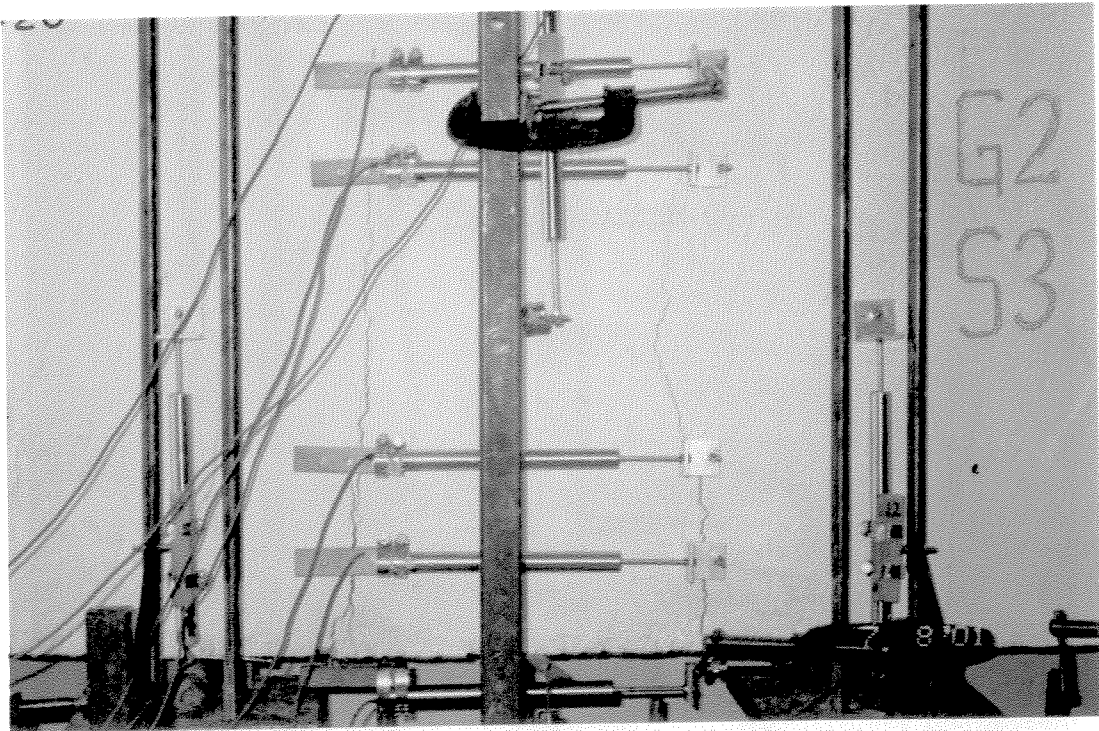
Şekil C.7: Numune G2\_S1 (çekme)



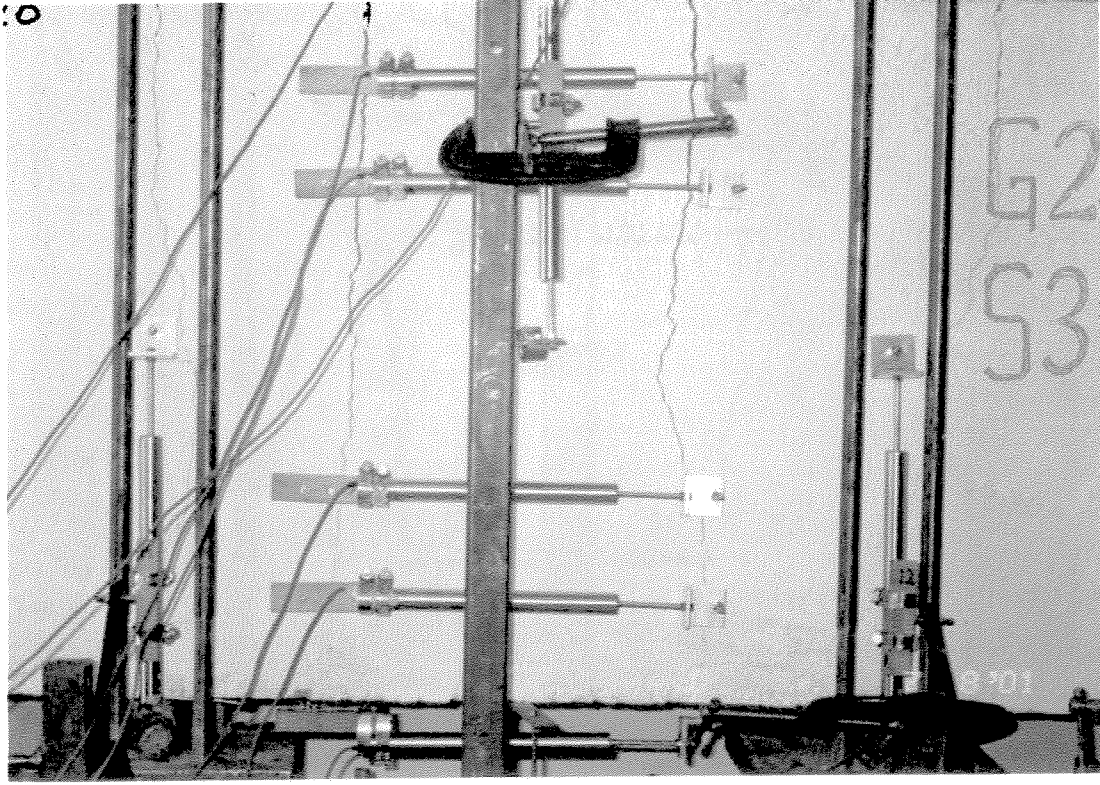
Şekil C.8: Numune G2\_S1 (itme)



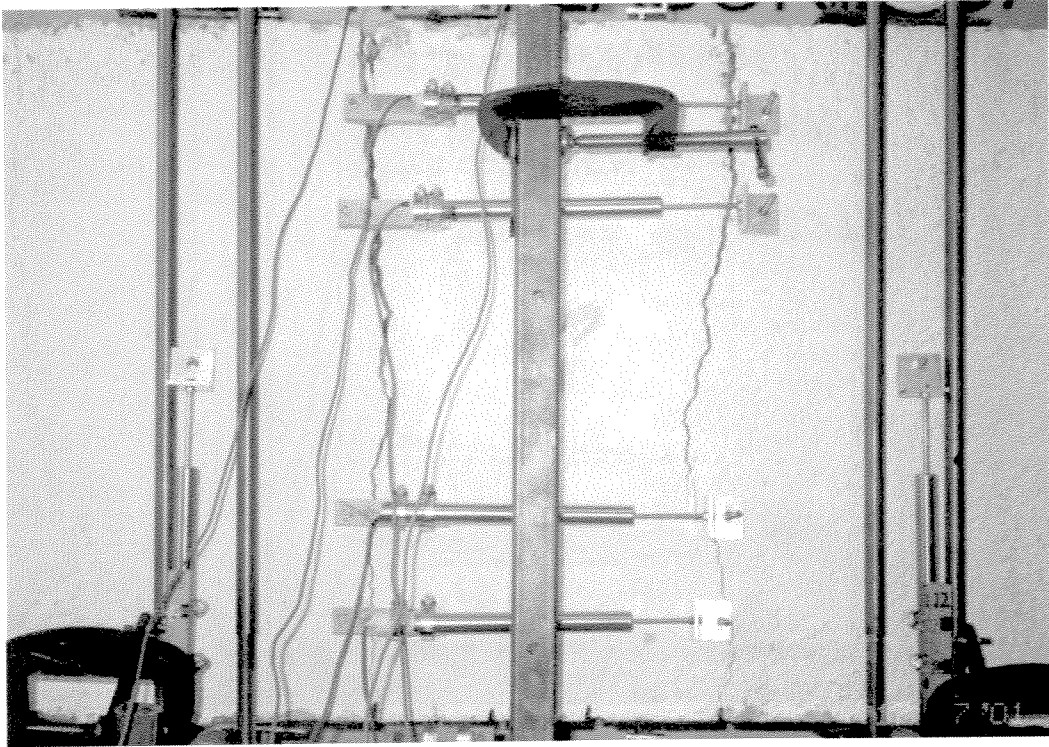
Şekil C.9: Numune G2\_S2



Şekil C.10: Numune G2\_S3 (itme)

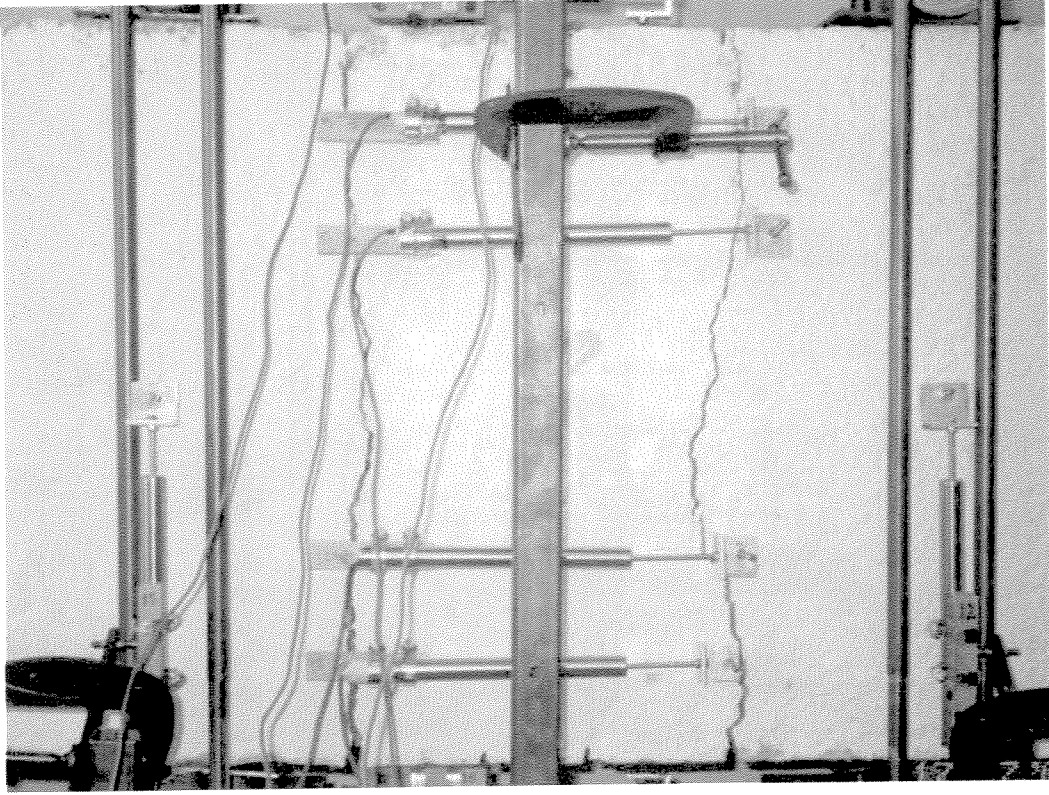


Şekil C.11: Numune G2\_S3 (çekme)

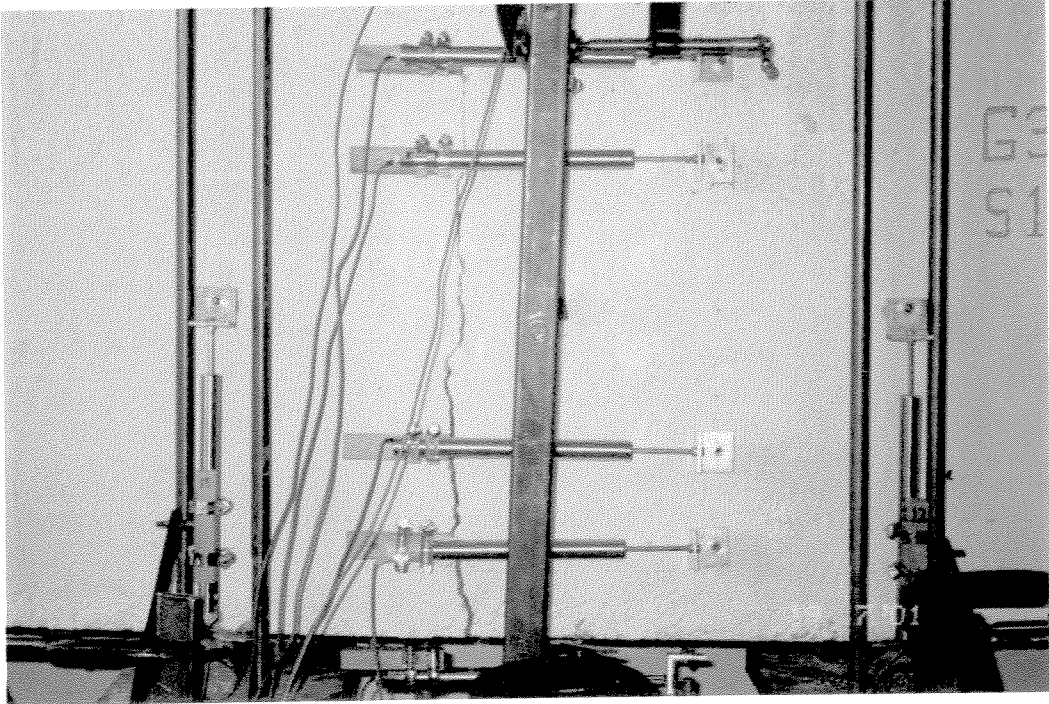


Şekil C.12: Numune G2\_S4 (çekme)

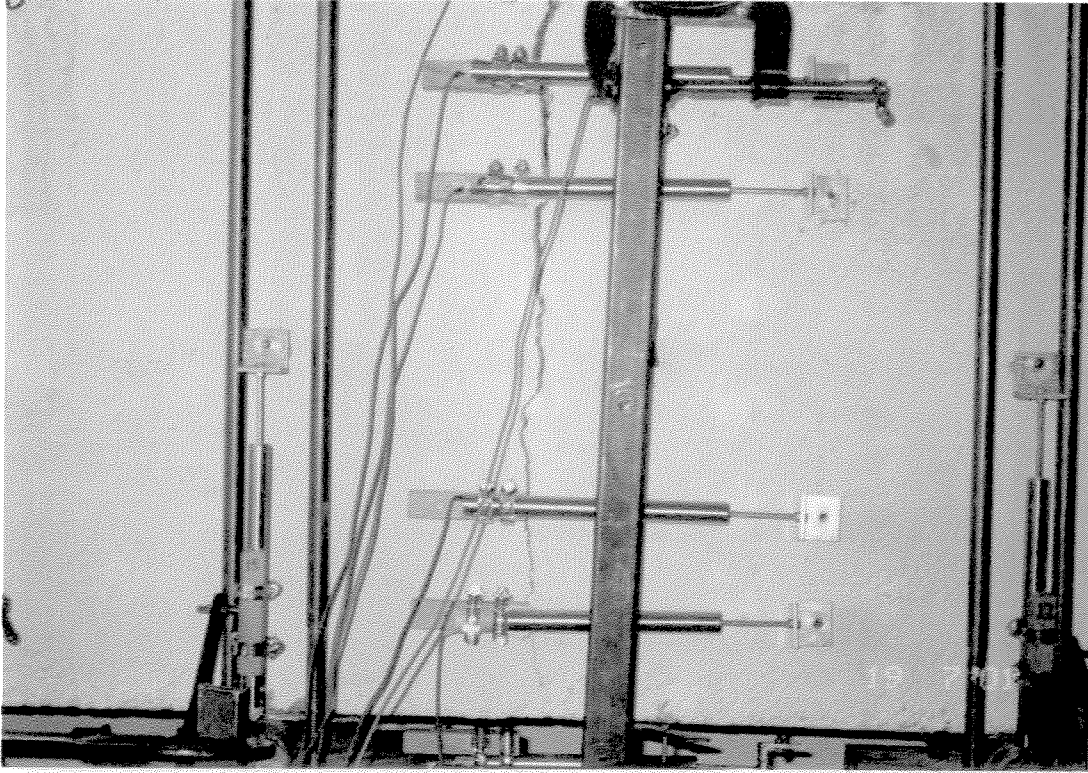




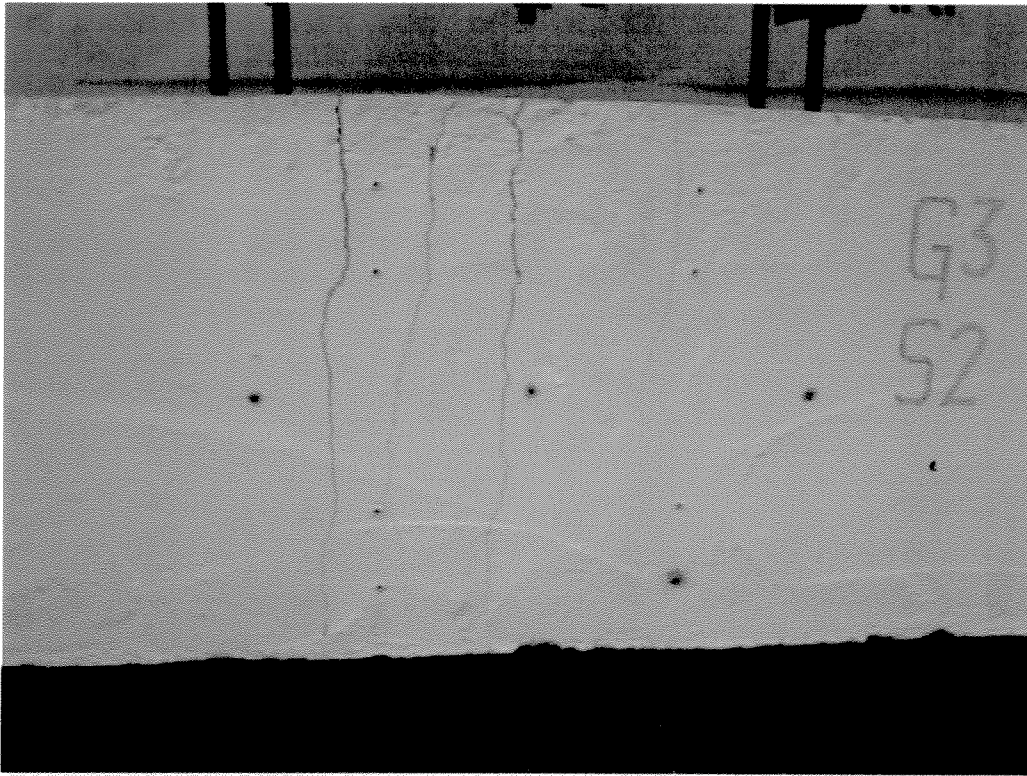
Şekil C.13: Numune G2\_S4 (itme)



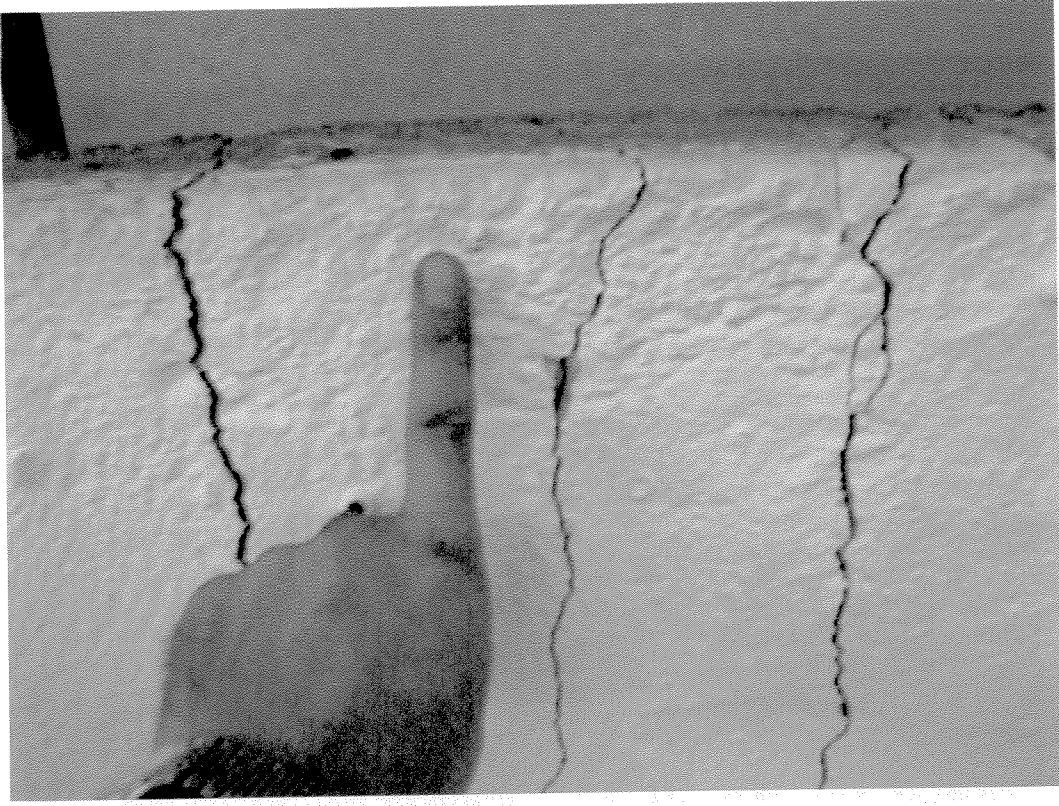
Şekil C.14: Numune G3\_S1 (itme)



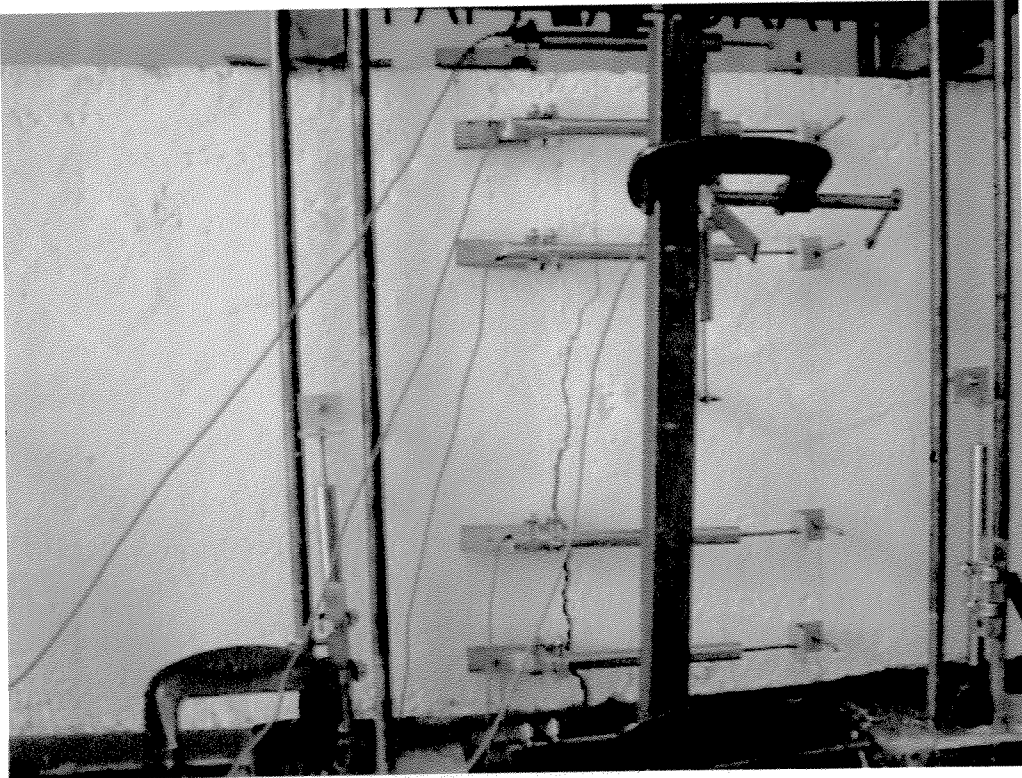
Şekil C.15: Numune G3\_S1 (çekme)



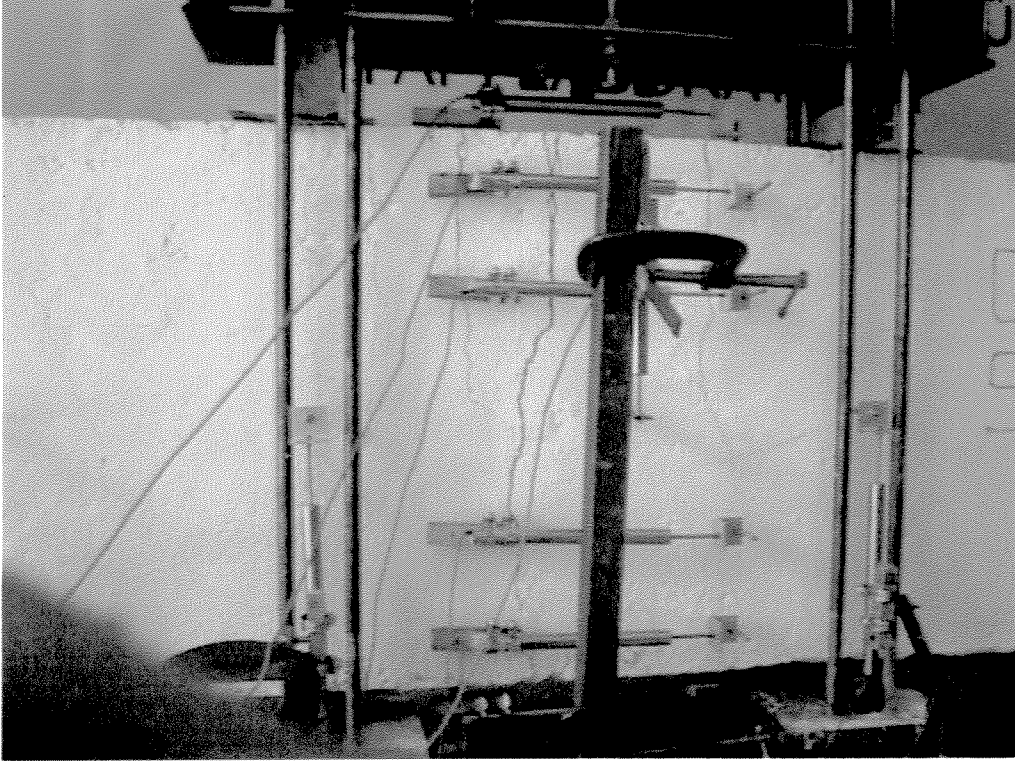
Şekil C.16: Numune G3\_S2 (Deney Sonu)



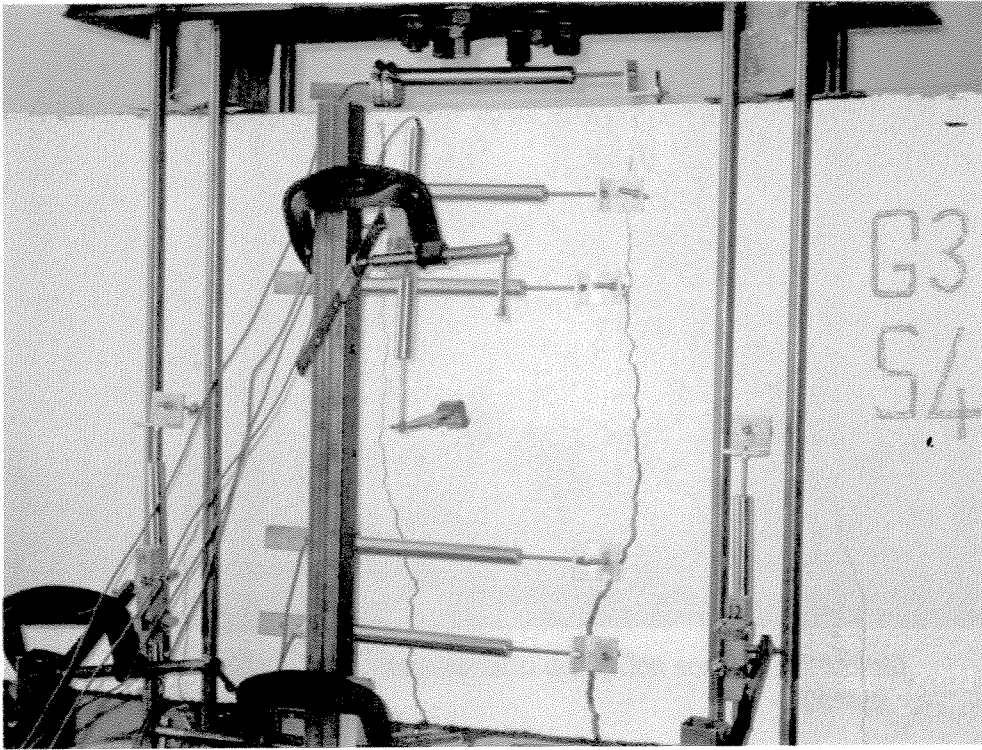
Şekil C.17: Numune G3\_S2



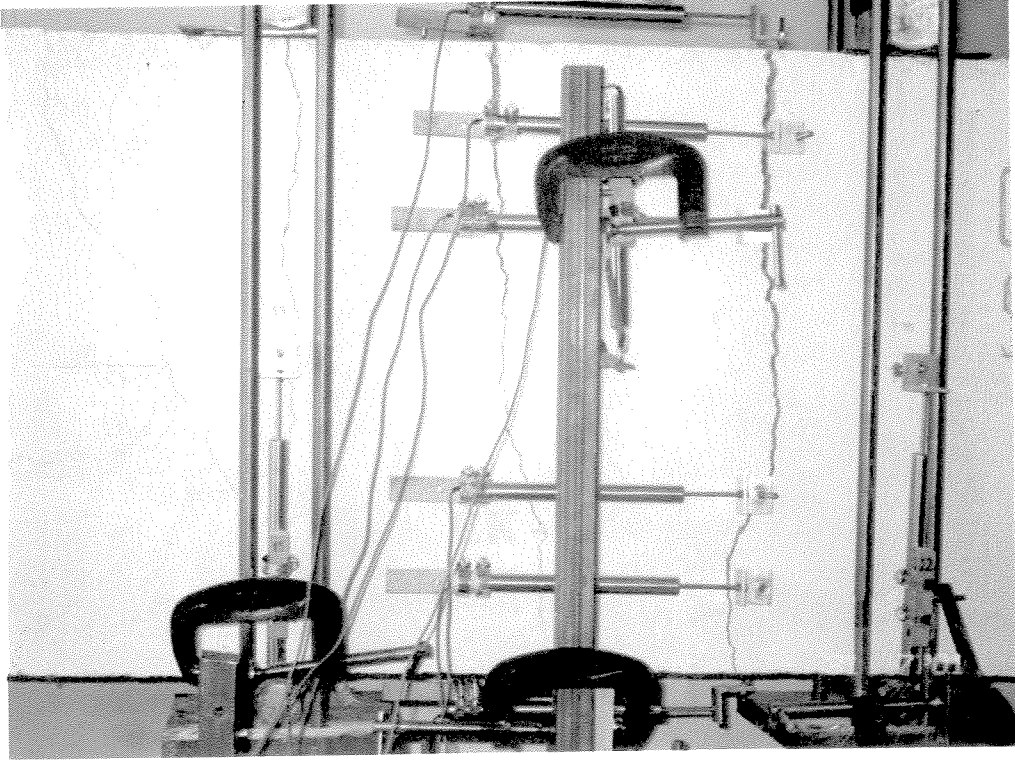
Şekil C.18: Numune G3\_S3 (itme)



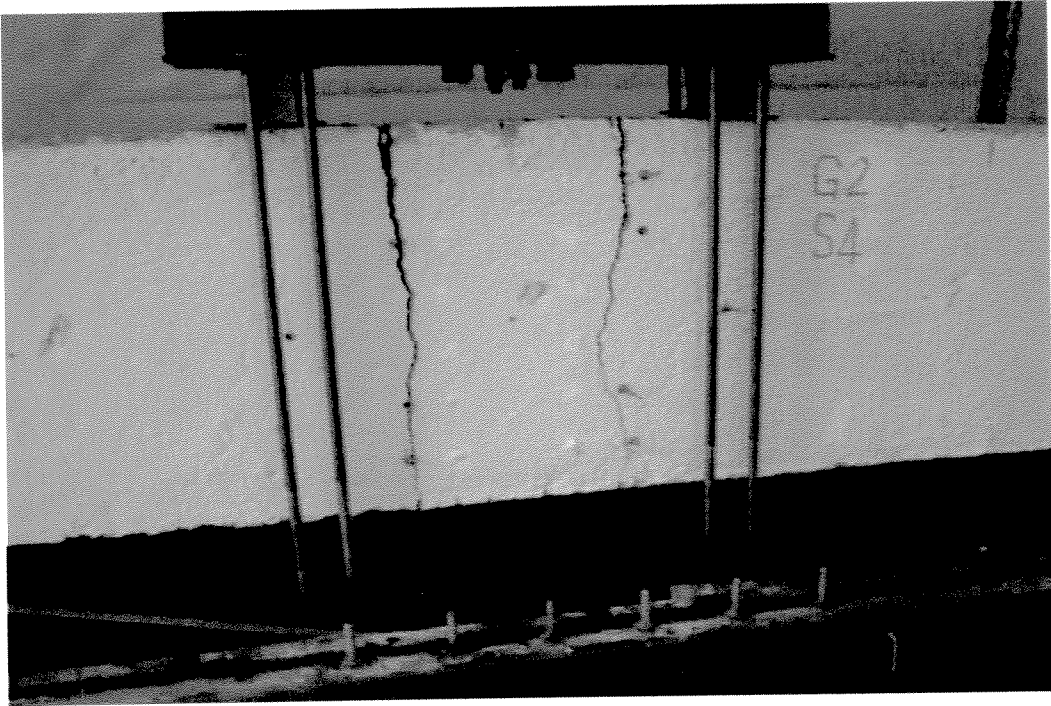
Şekil C.19: Numune G3\_S3 (çekme)



Şekil C.20: Numune G3\_S4 (itme)



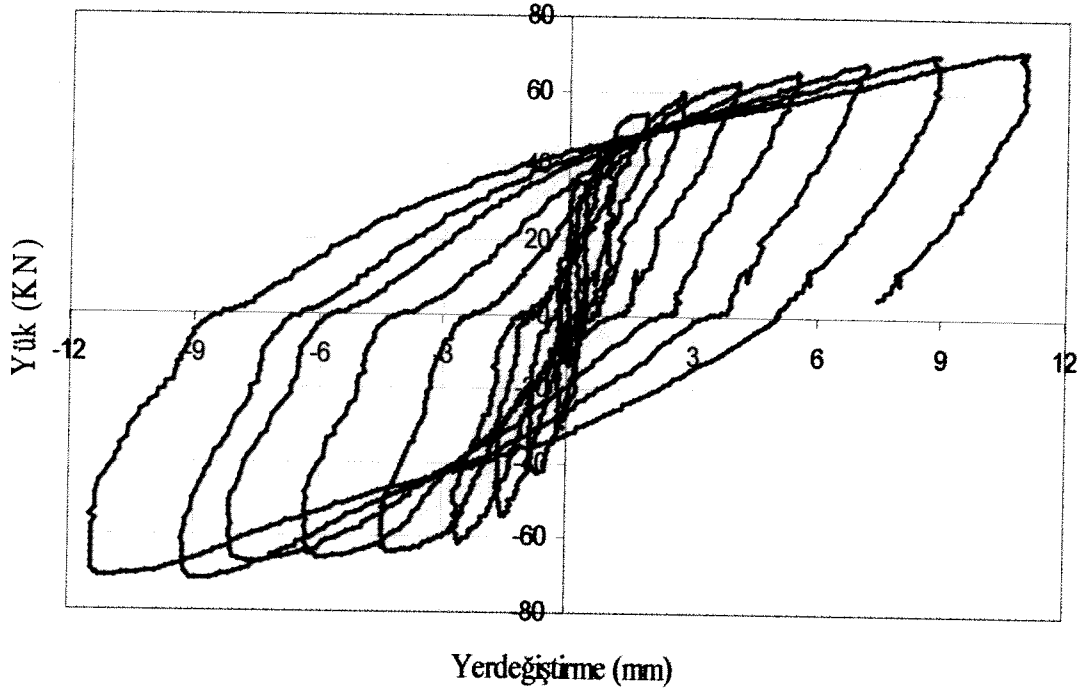
Şekil C.21: Numune G3\_S4 (çekme)



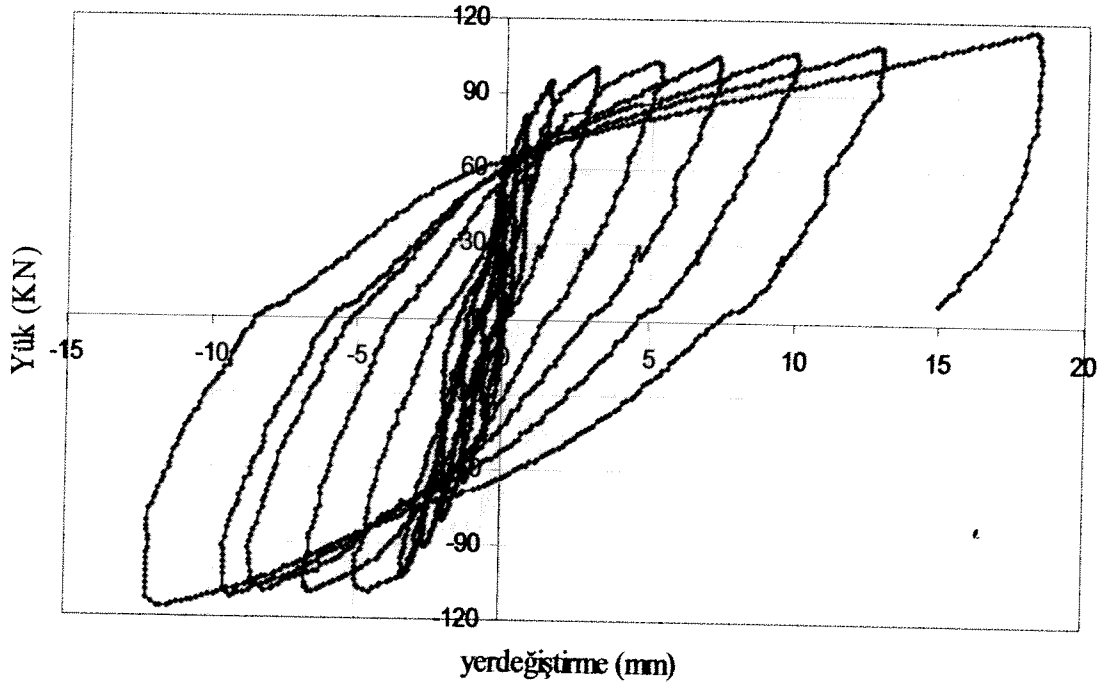
Şekil C.22: G2\_S4 numunesinin deneyden sonraki görünümü

**EK - D**

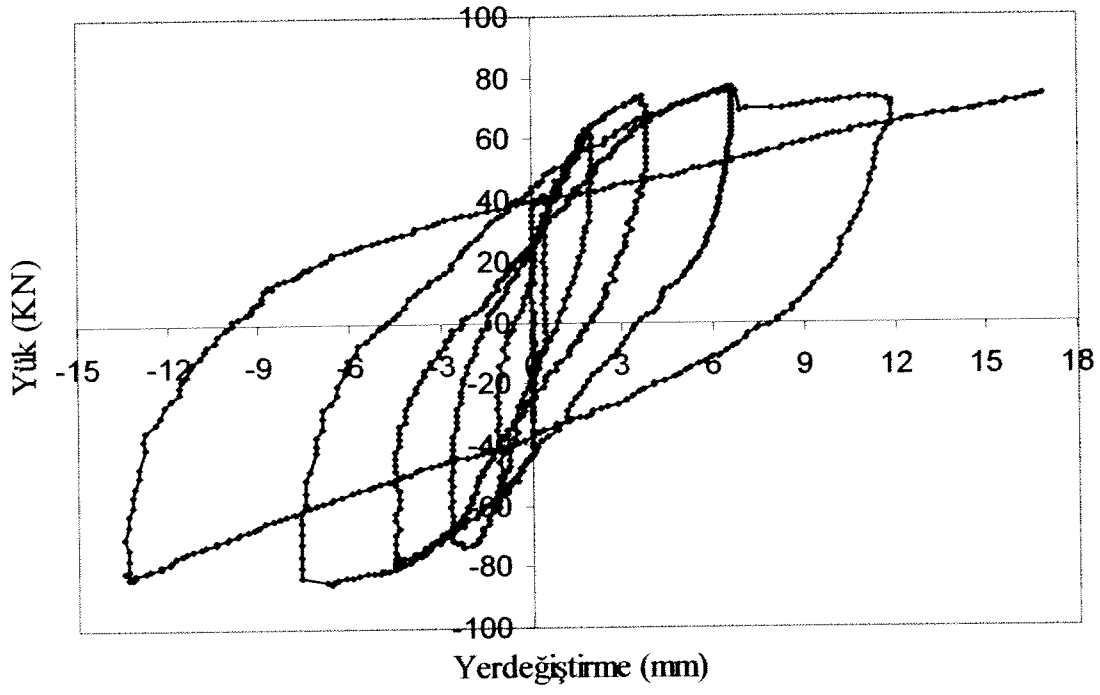
**YÜK-DEPLASMAN VE MOMENT-EĞRİLİK  
İLİŞKİLERİ**



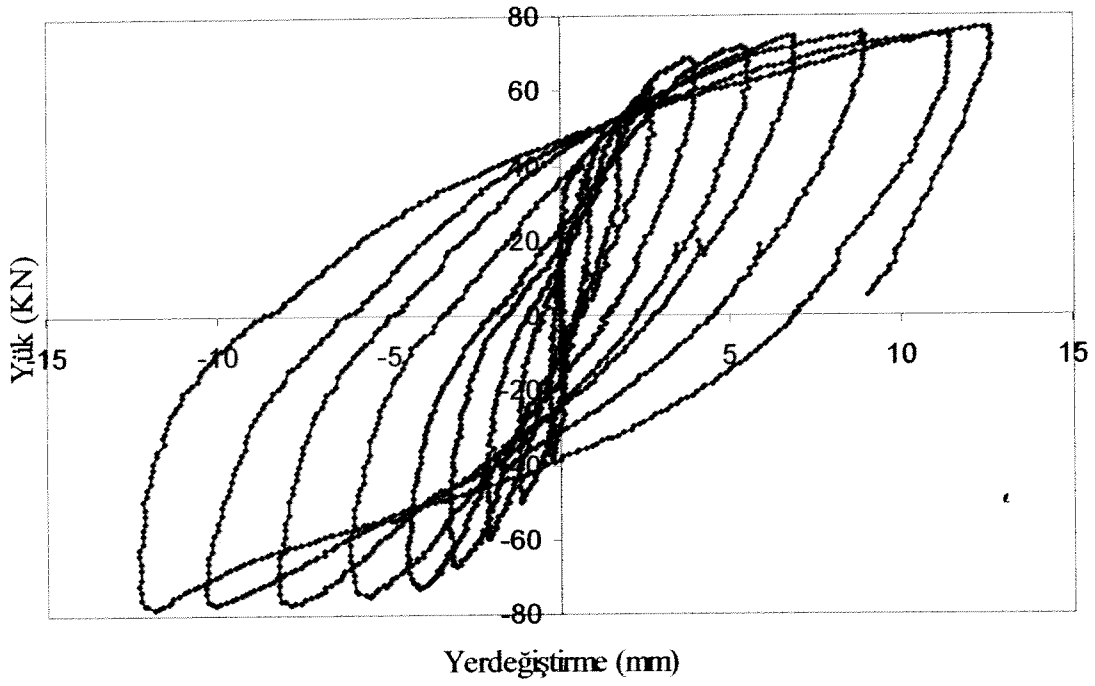
Şekil D.1: G1\_S1 Numunesi yük-deplasman ilişkisi



Şekil D.2: G1\_S3 Numunesi yük-deplasman ilişkisi

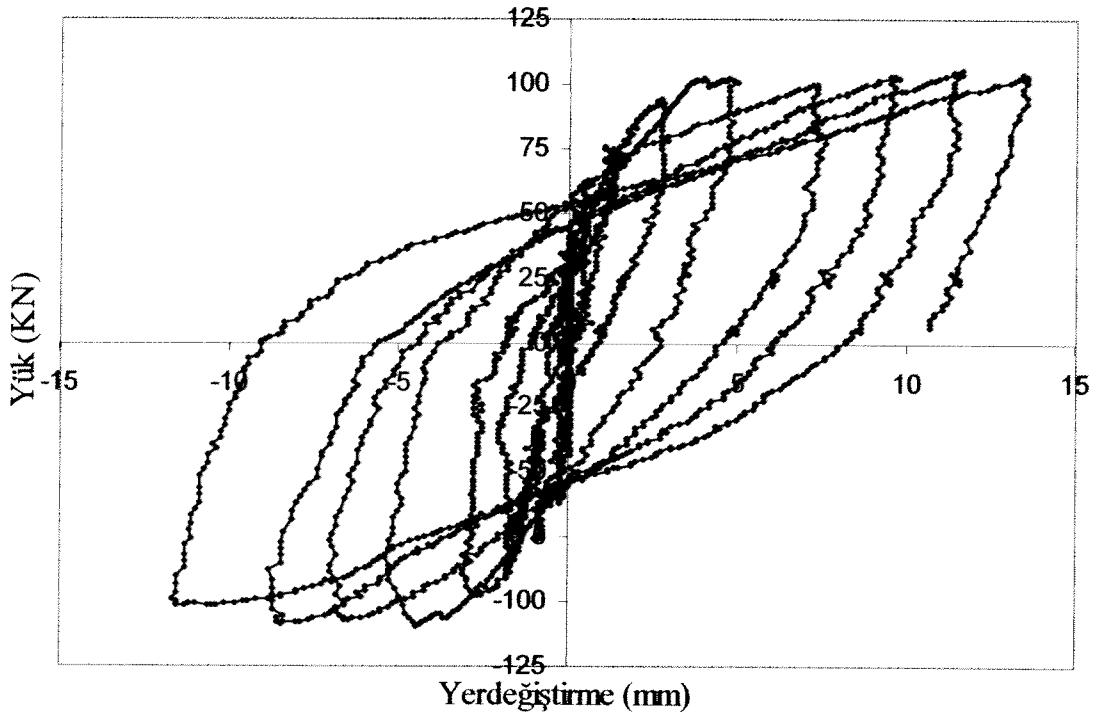


Şekil D.3: G1\_S4 Numunesi yük-deplasman ilişkisi

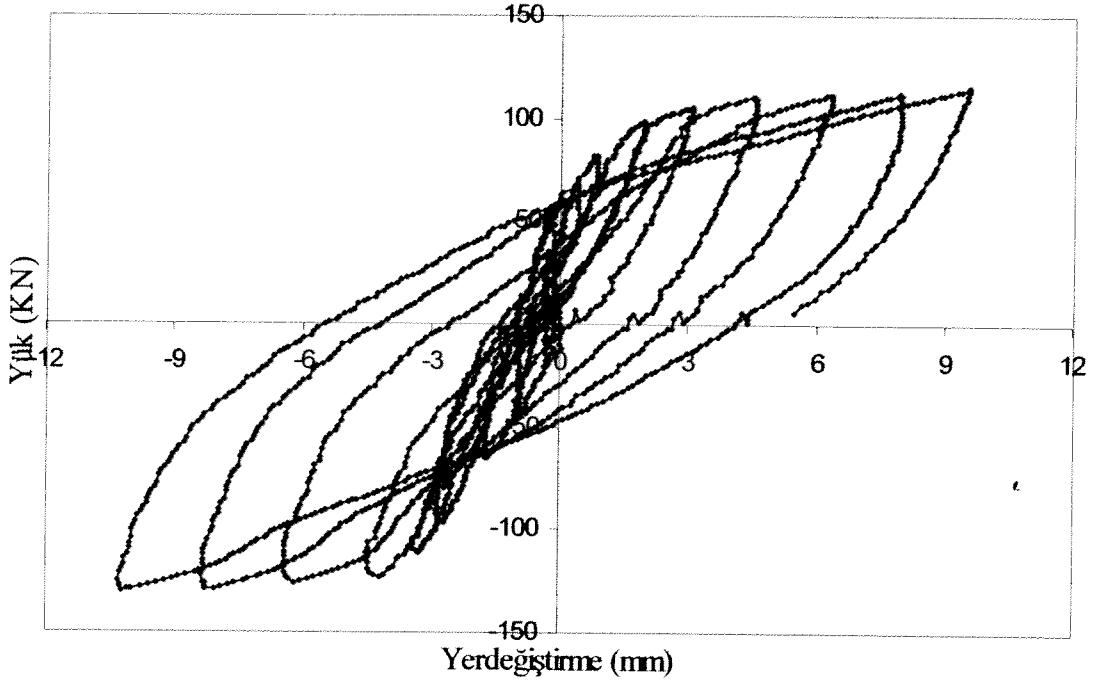


Şekil D.4: G2\_S1 Numunesi yük-deplasman ilişkisi

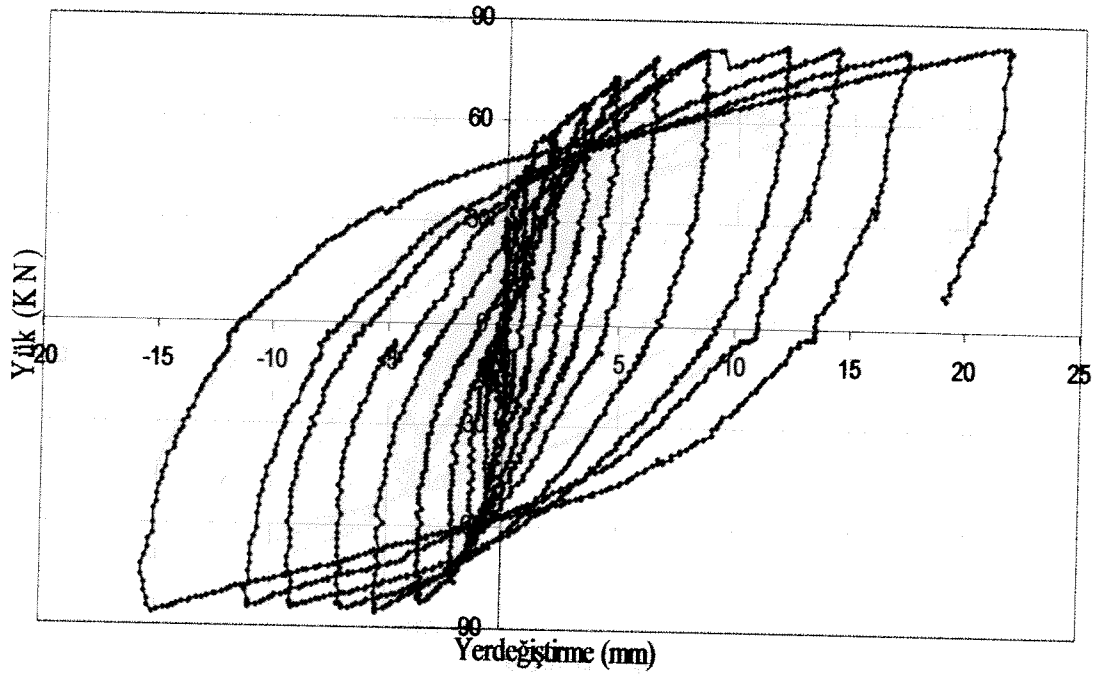




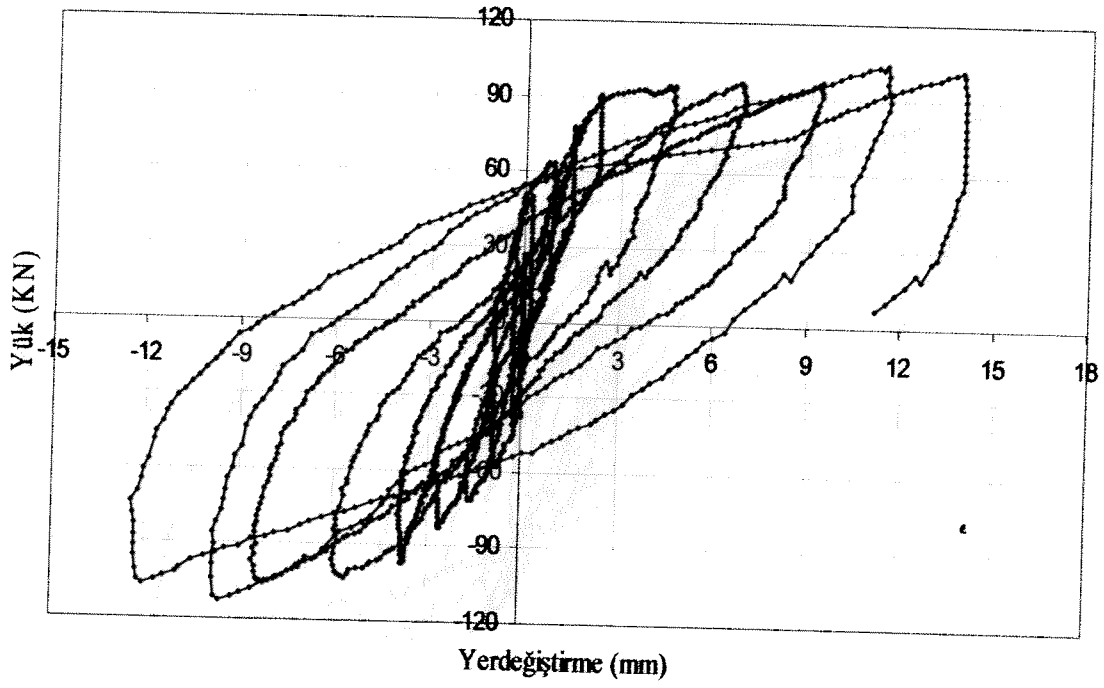
Şekil D.5: G2\_S2 Numunesi yük-deplasman ilişkisi



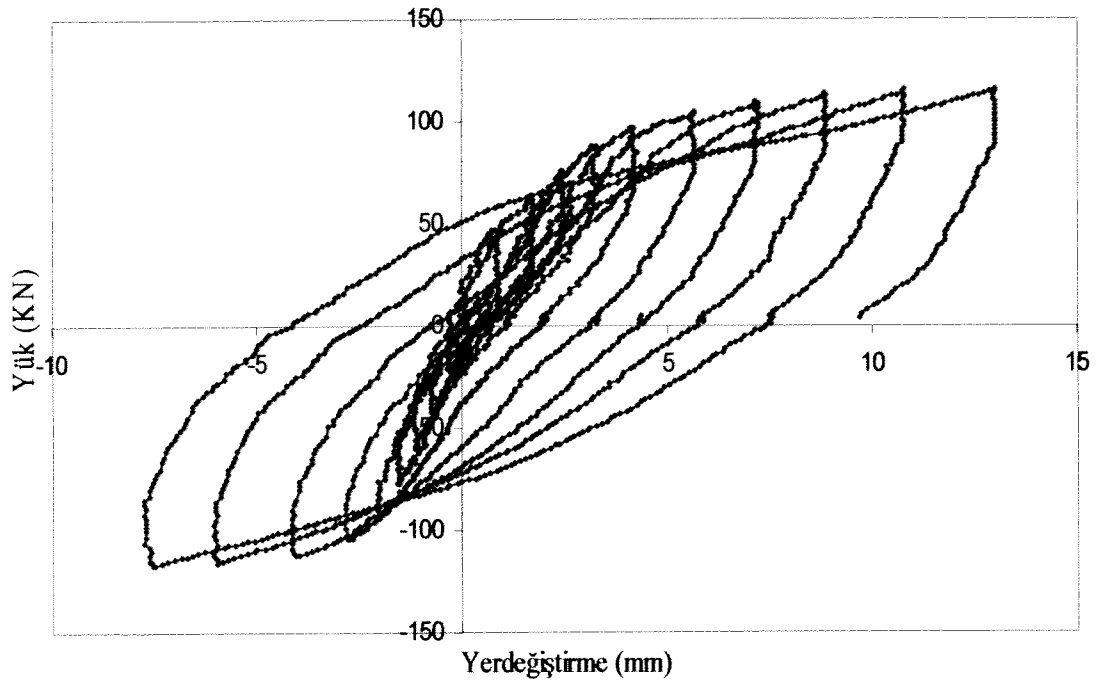
Şekil D.6: G2\_S3 Numunesi yük-deplasman ilişkisi



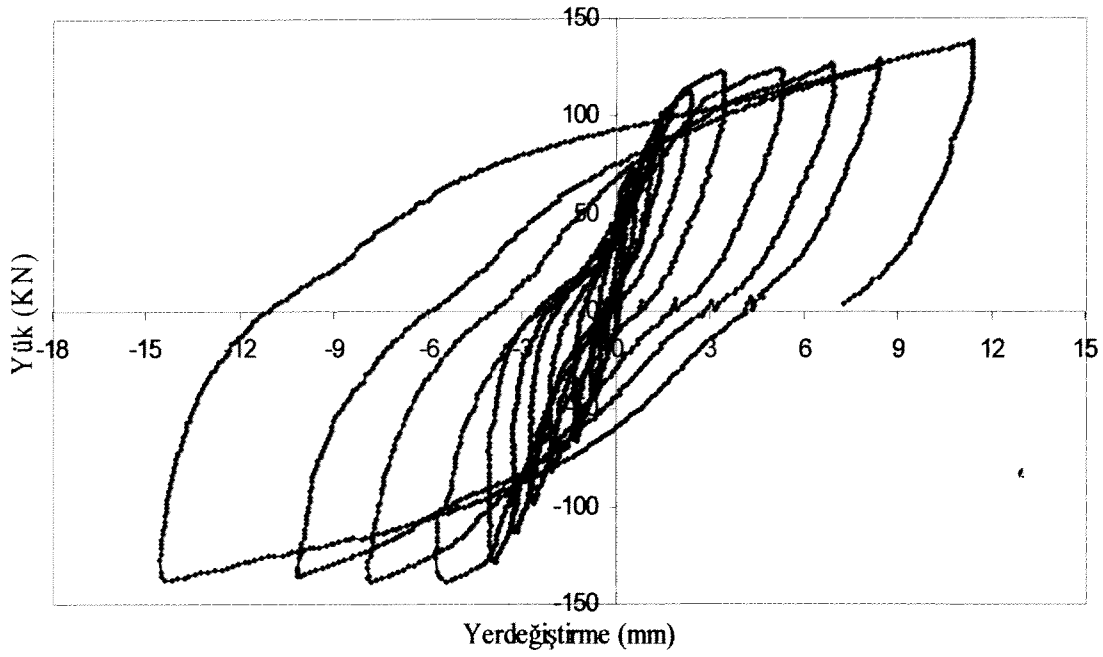
Şekil D.7: G2\_S4 Numunesi yük-deplasman ilişkisi



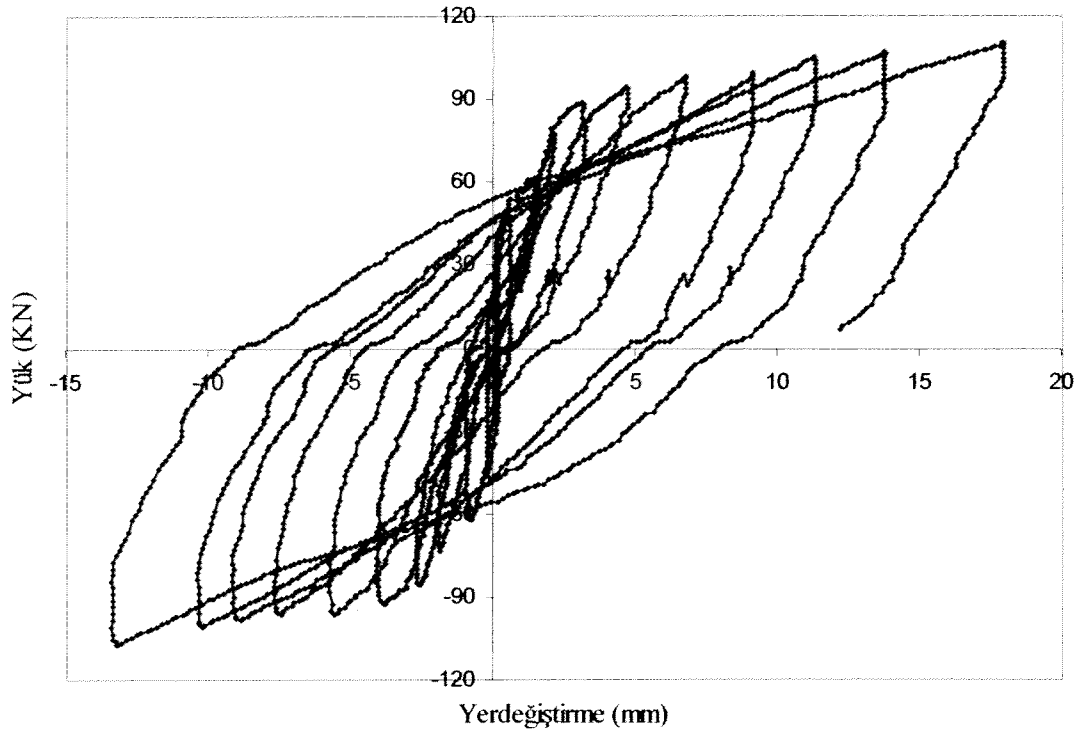
Şekil D.8: G3\_S1 Numunesi yük-deplasman ilişkisi



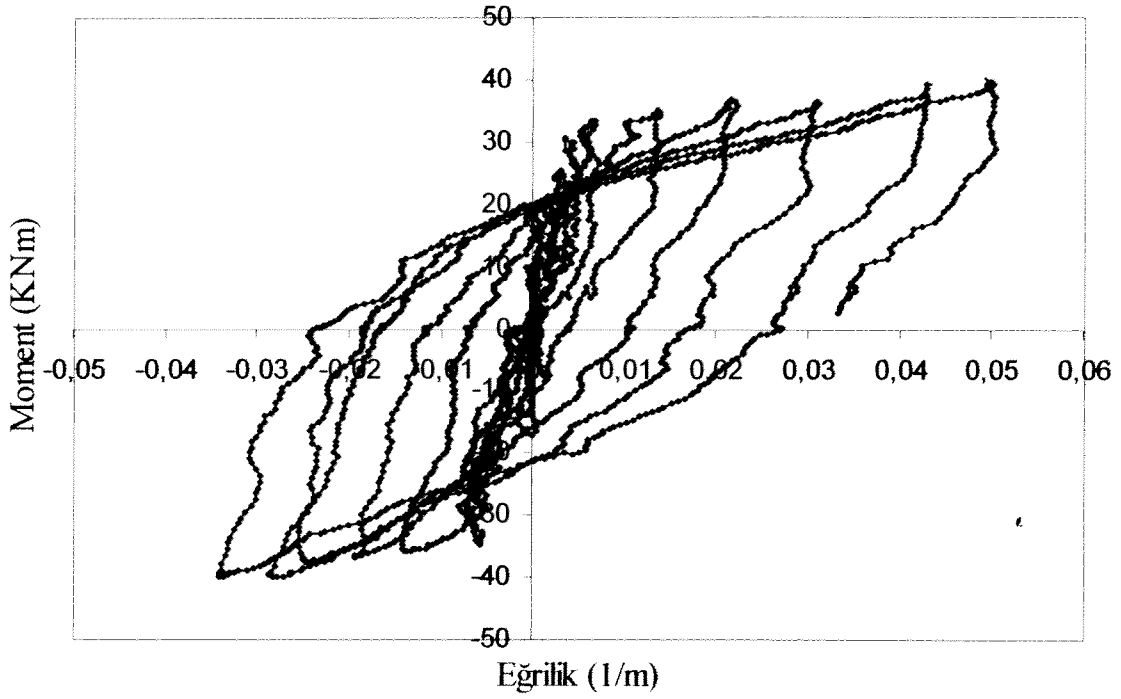
Şekil D.9: G3\_S2 Numunesi yük-deplasman ilişkisi



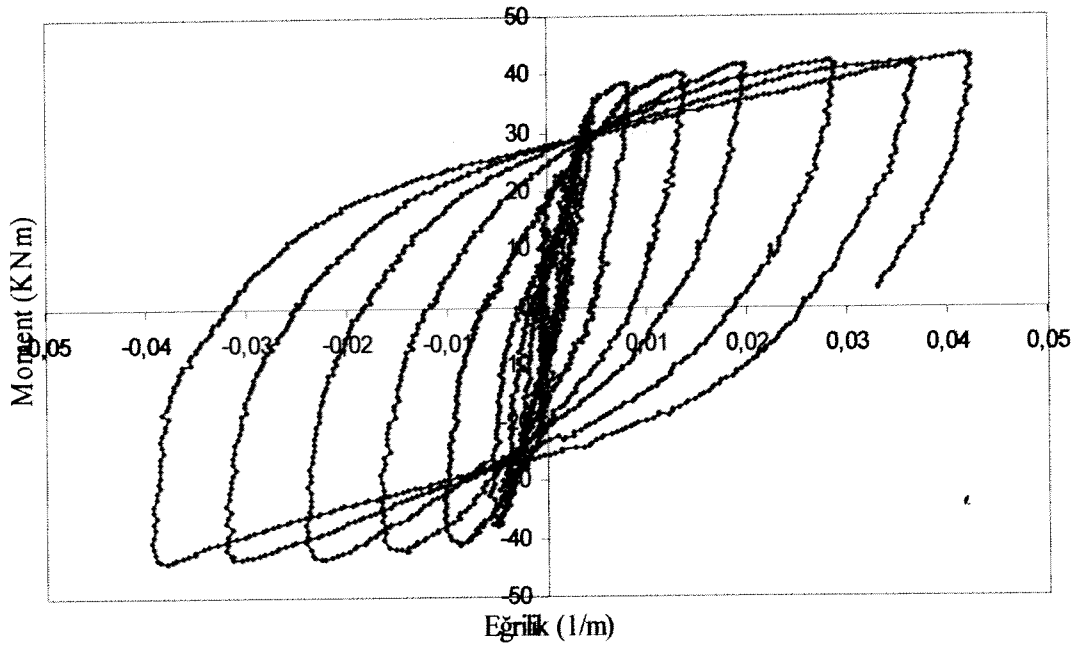
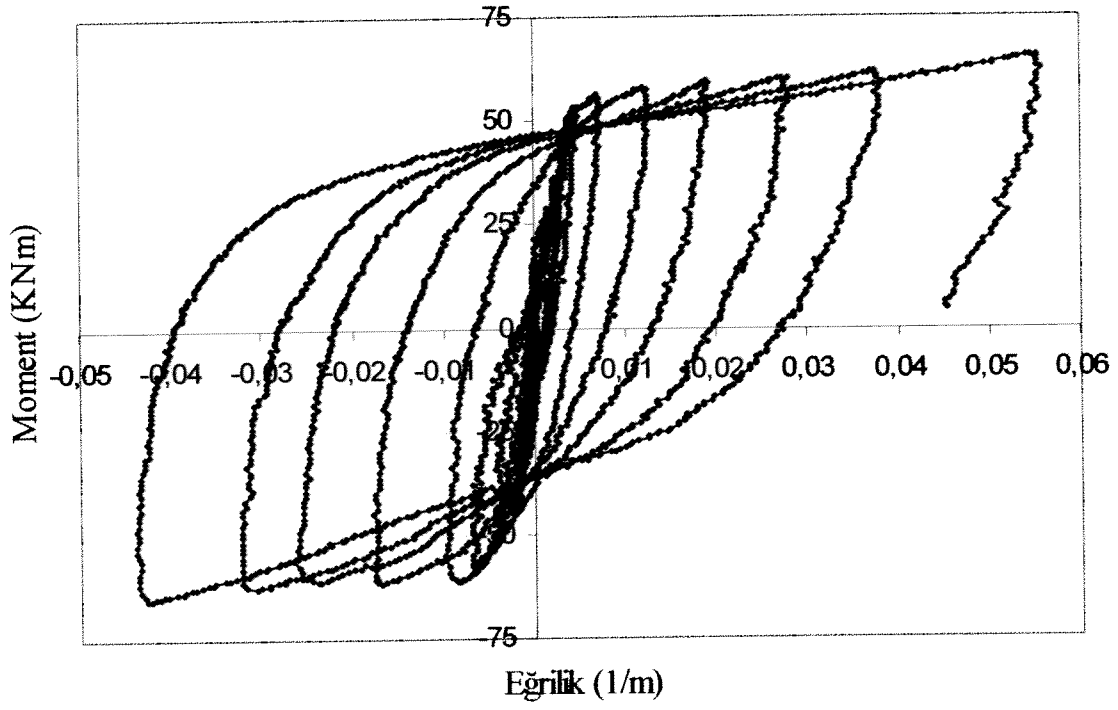
Şekil D.10: G3\_S3 Numunesi yük-deplasman ilişkisi

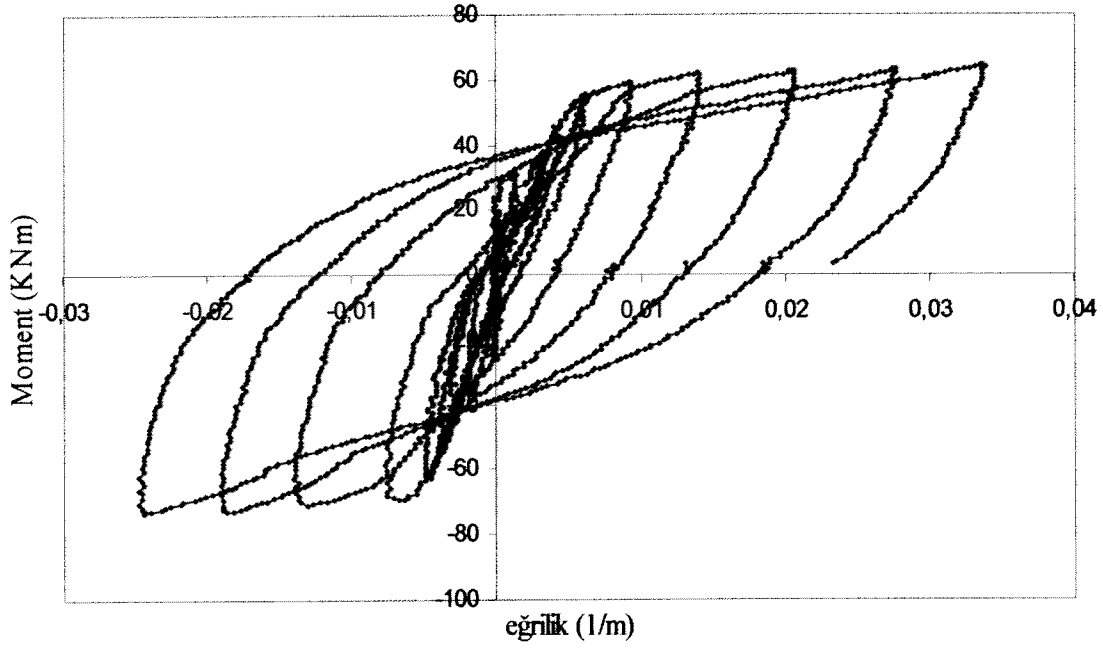


Şekil D.11: G3\_S4 Numunesi yük-deplasman ilişkisi

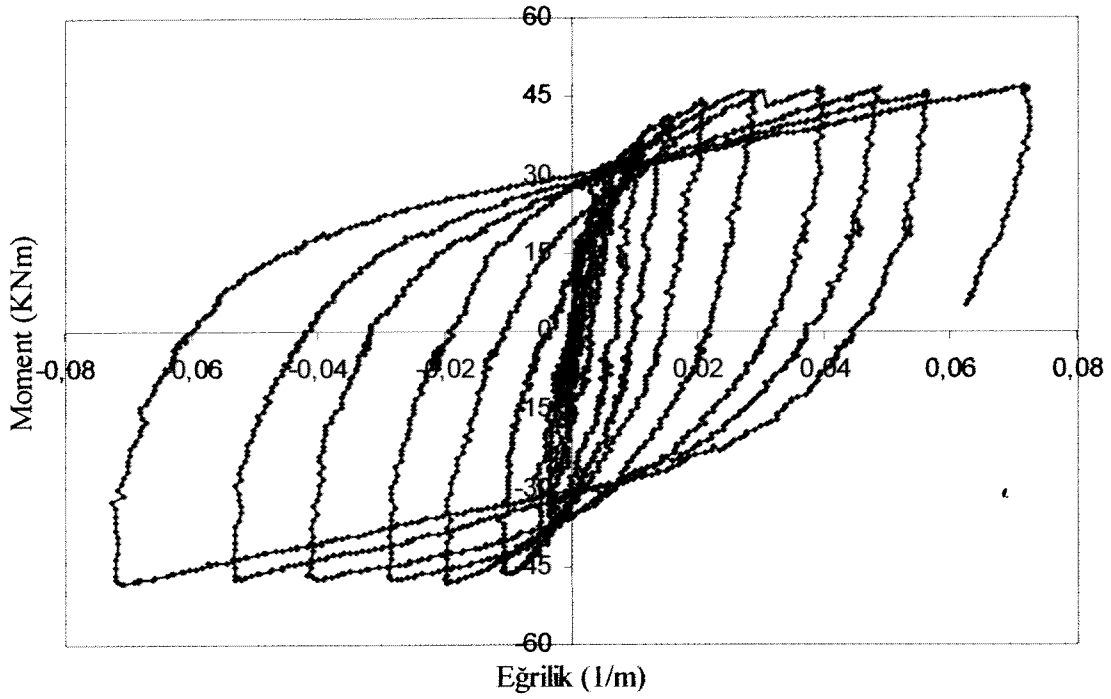


Şekil D.12: G1\_S1 Numunesi moment-eğrilik ilişkisi

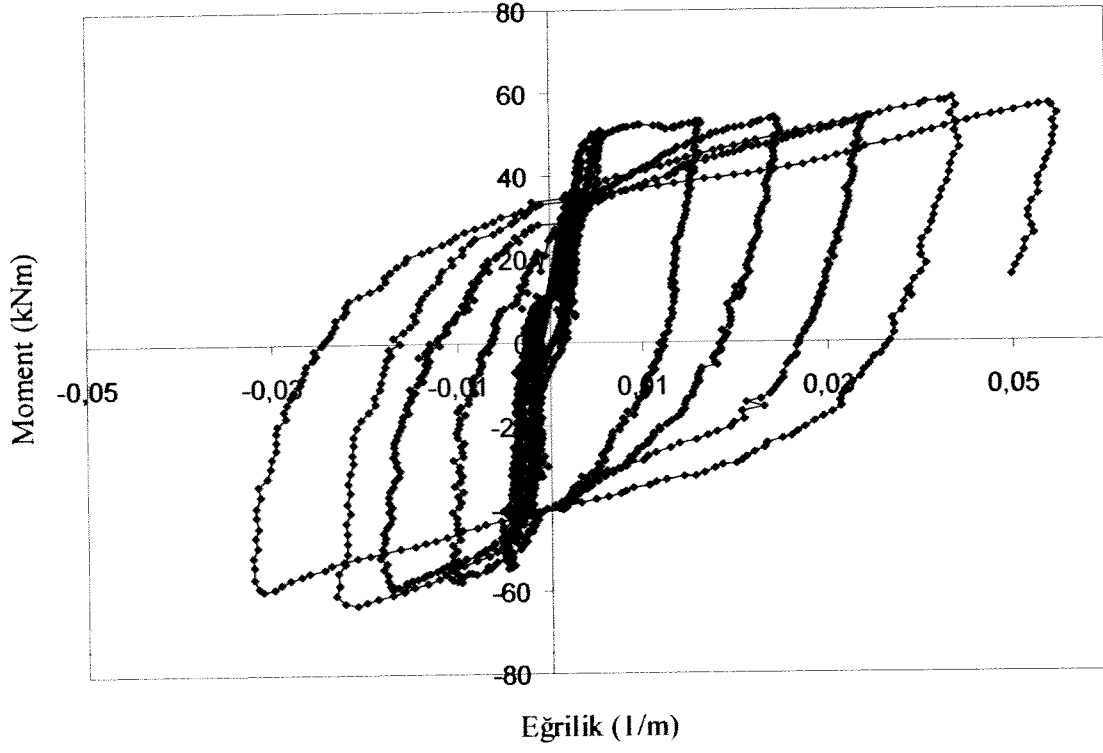




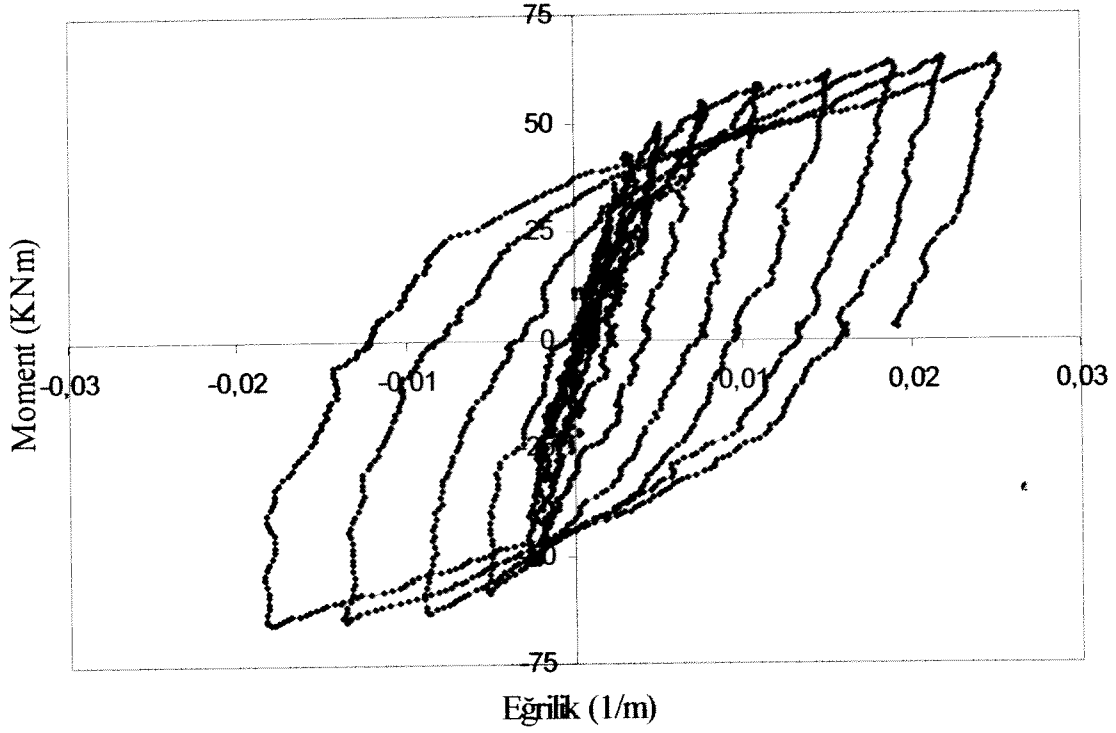
Şekil D.15: G2\_S3 Numunesi moment-eğrilik ilişkisi



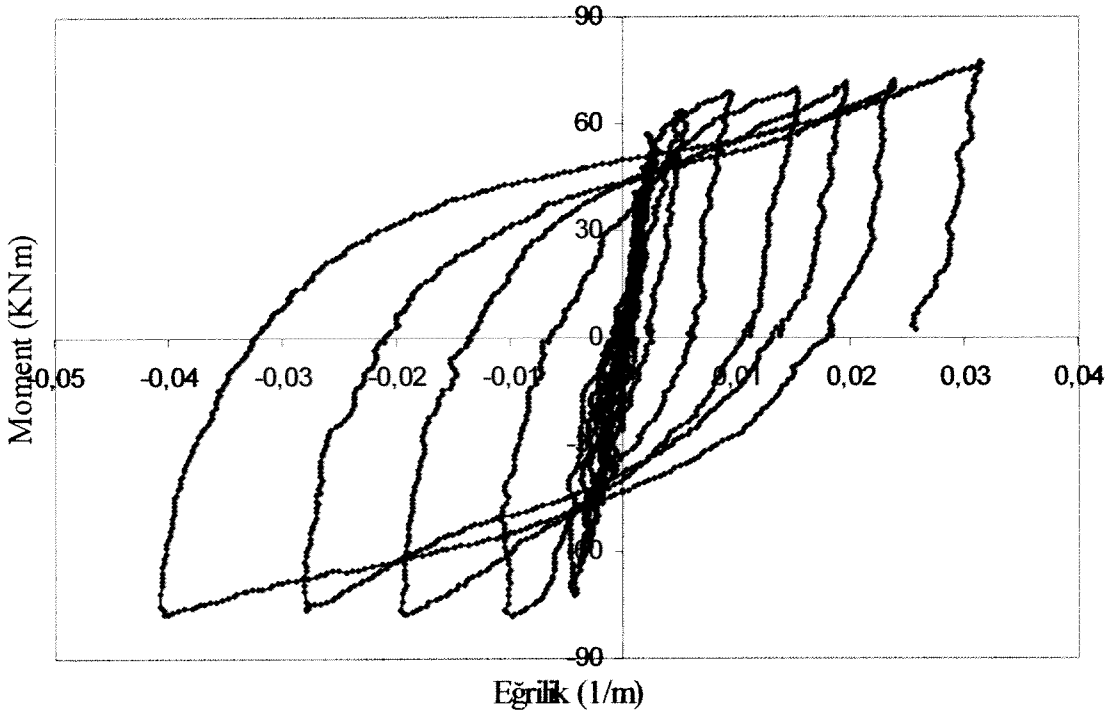
Şekil D.16: G2\_S4 Numunesi moment-eğrilik ilişkisi



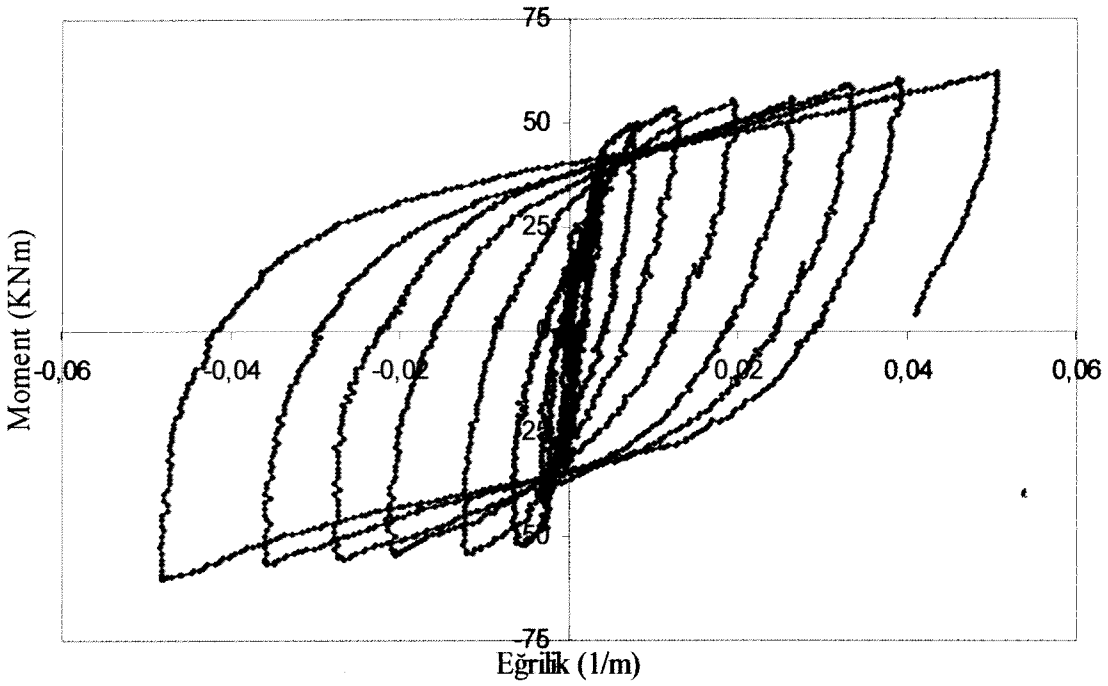
Şekil D.17: G3\_S1 Numunesi moment-eğrilik ilişkisi



Şekil D.18: G3\_S2 Numunesi moment-eğrilik ilişkisi



Şekil D.19: G3\_S3 Numunesi moment-eğrilik ilişkisi

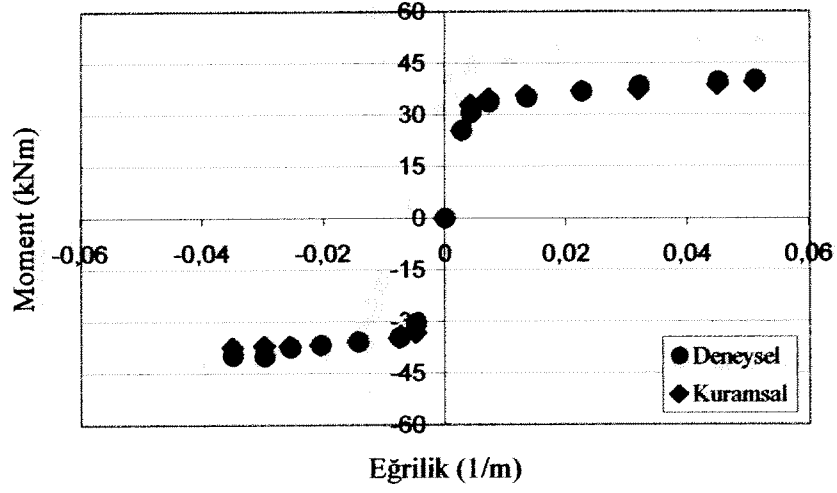


Şekil D.20: G3\_S4 Numunesi moment-eğrilik ilişkisi

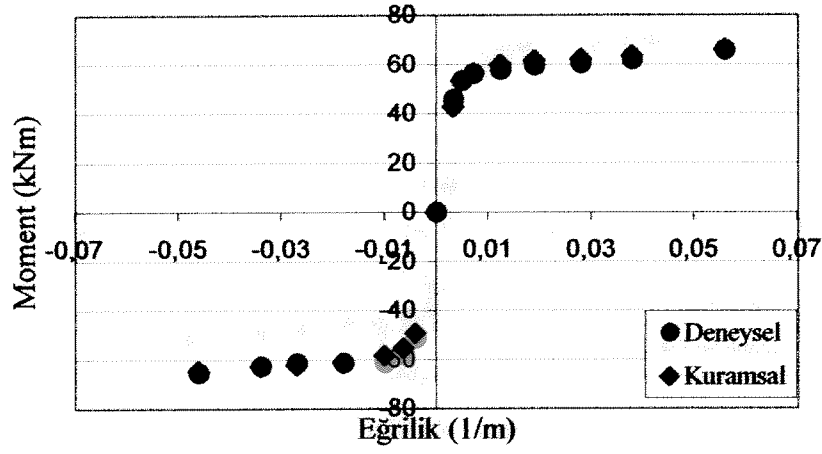


**EK - E**

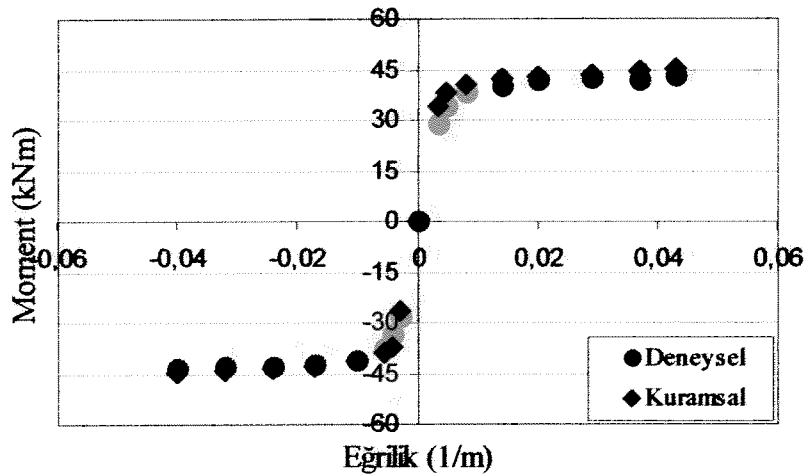
**KURAMSAL ve DENEYSEL MOMENT-EĞRİLİK  
İLİŞKİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**



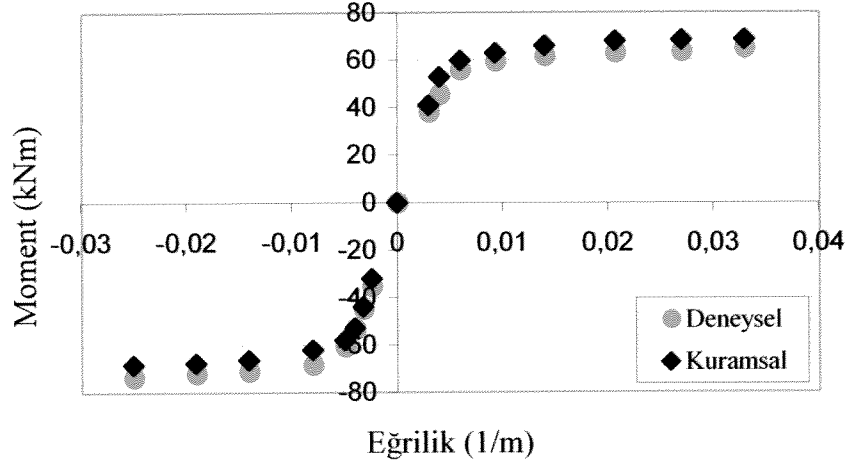
Şekil E.1: G1\_S1 numunesi için kuramsal ve deneysel sonuçların değişimi



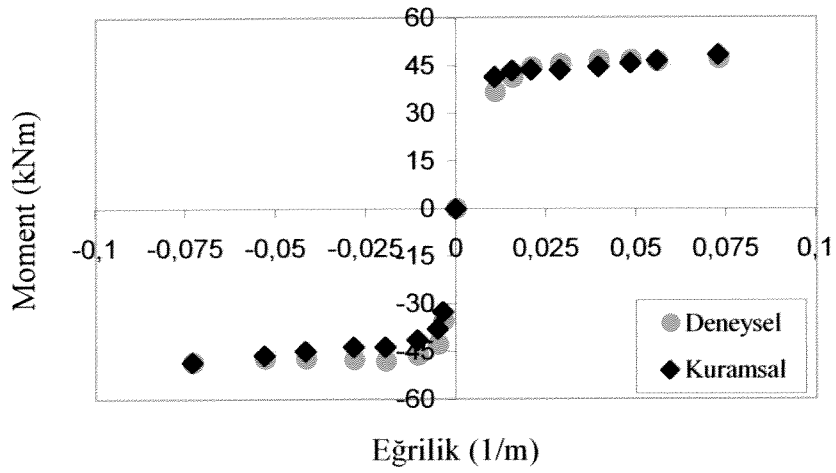
Şekil E.2: G1\_S3 numunesi için kuramsal ve deneysel sonuçların değişimi



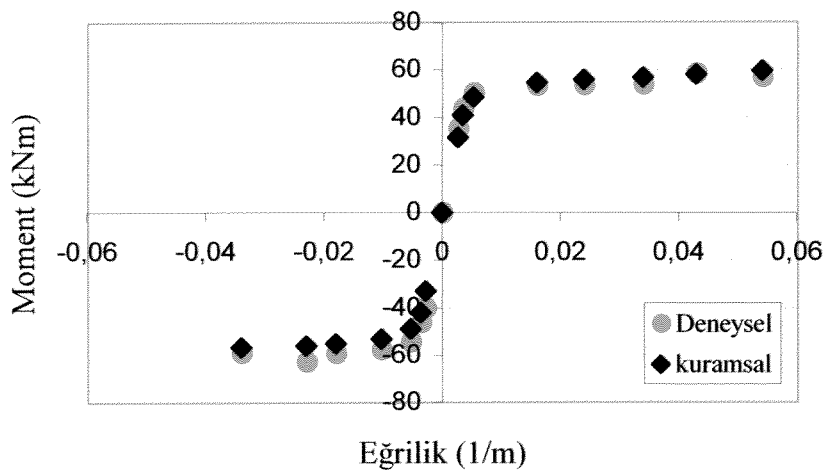
Şekil E.3: G2\_S1 numunesi için kuramsal ve deneysel sonuçların değişimi



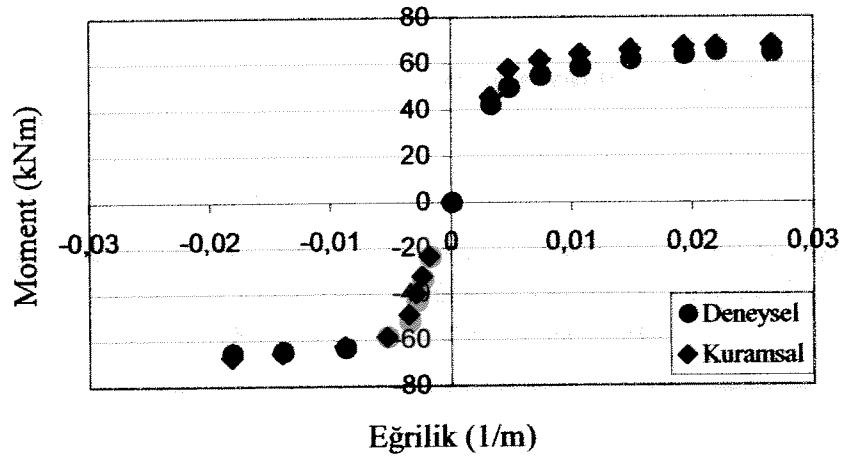
Şekil E.4: G2\_S3 numunesi için kuramsal ve deneysel sonuçların değişimi



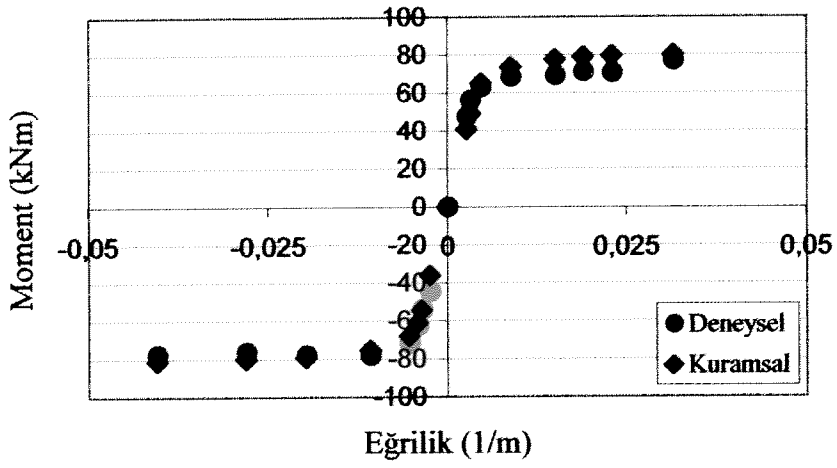
Şekil E.5: G2\_S4 numunesi için kuramsal ve deneysel sonuçların değişimi



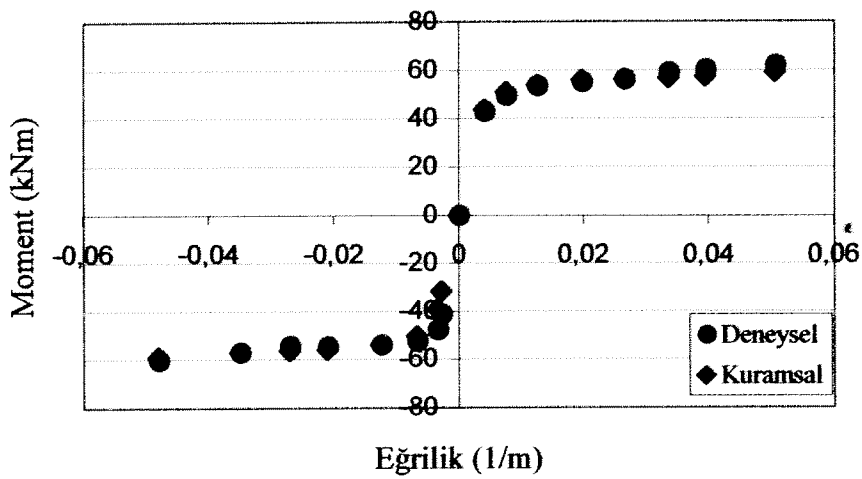
Şekil E.6: G3\_S1 numunesi için kuramsal ve deneysel sonuçların değişimi



Şekil E.7: G3\_S2 numunesi için kuramsal ve deneysel sonuçların değişimi



Şekil E.8: G3\_S3 numunesi için kuramsal ve deneysel sonuçların değişimi



Şekil E.9: G3\_S4 numunesi için kuramsal ve deneysel sonuçların değişimi

**Anahtar Kelimeler:**

**Derin kiriş, betonarme, deprem dayanımı, tersinir yükleme, eğrilik sünekliği, deplasman sünekliği, sargılı beton**

**Projeden Kaynaklanan Yayınlar :**

**ŞENEL, Ş. M., KAPLAN, H., "Farklı Uç Sargı Şekillerinin Perde duvarların Moment Eğrilik Davranışı Üzerindeki Etkilerinin Doğrusal Olmayan Analizi (Kuramsal Çalışma)", PAÜ. Mühendislik Bilimleri Dergisi, ( Yayın için kabul edildi)**

## PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

**Proje Kodu :INTAG-564**

**Proje Başlığı :**

**DEĞİŞİK DONATI TAŞIYAN DENGE ALTI BETONARME KİRİŞLERİN EĞİLME DAVRANIŞININ TERSİNİR YÜKLEME ALTINDA İNCELENMESİ**

**Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar :**

**DOÇ. DR. HASAN KAPLAN, DR. ŞEVKET MURAT ŞENEL**

**Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi :**

**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ, MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ, İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ, KINIKLI KAMPÜSÜ, DENİZLİ**

**Destekleyen Kuruluşun Adı ve Adresi :**

**TÜRKİYE BİLİMSEL ve TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU (TÜBİTAK)  
ATATÜRK BULVARI N0:221, KAVAKLIDERE, 06100, ANKARA**

**Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri : 01.11.1999 – 01.02.2002**

**Öz :**

Betonarme elemanlarda boyuna donatı oranını arttırmanın sünekliği düşürdüğü, uç bölgelerde uygulanan sargılama işleminin ise sünekliği arttırdığı, yapılan kuramsal ve deneysel çalışmalar ile gösterilmiştir. Yürütülen proje çalışması sırasında on iki adet derin kiriş numunesinin yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki davranışı deneysel ve kuramsal olarak incelenmiş, dayanım, süneklik ve enerji sönümlenme özellikleri araştırılmıştır. Deney numuneleri hazırlanırken, gövde ve sargı donatısı yerleşimleri ve miktarları değişken olarak alınmış, numunelerin yük-deplasman ve moment-eğrilik mukabeleleri araştırılmıştır. Deneysel ve kuramsal çalışmalar gövde ve/veya sargı bölgelerinde kullanılan boyuna donatı miktarını arttırmanın elemanların dayanımını yükselttiğini, eğrilik ve deplasman sünekliğini düşürdüğünü göstermiştir. Dayanım ve sönümlenen enerji miktarlarında sağlanan artış oranı, boyuna donatı oranında sağlanan artışın gerisinde kalmıştır.